

**Всероссийская
научно-техническая конференция**
Пром-Инжиниринг



Челябинск, 2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)

Пром-Инжиниринг
труды V Всероссийской научно-технической конференции

25-29 марта 2019 года

Москва-Челябинск-Новочеркасск-Волгоград-Сочи

Челябинск, 2019

Пром-Инжиниринг: труды V всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – 362 с.

В научный сборник включены материалы научно-технической конференции, посвященные рассмотрению вопросов динамики машин и рабочих процессов, конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, особенностей построения наземных транспортно-технологических машин, изучению вопросов трения, смазки и износа машин. Приводятся результаты теоретических исследований и особенности практического применения новых функциональных материалов и технологий. Рассмотрены вопросы инноваций и ресурсосбережения в металлургии. Изложены особенности построения систем и технологий управления, промышленных мехатронных, робототехнических и электроэнергетических систем. Приводятся результаты исследований электрических машин и электроприводов, устройств силовой электроники и возобновляемых источников энергии. Также рассмотрены вопросы моделирования и компьютерных технологий промышленных установок, объектов, процессов, вопросы теории и практики динамических измерений.

Материалы опубликованы в авторской редакции.

Ответственный редактор: профессор, доктор техн. наук А.А. Радионов

ISBN 978-5-696-05099-7

© Авторы, 2019

© Издательский центр ЮУрГУ

ОРГКОМИТЕТ КОФЕРЕНЦИИ

Председатель

Радионов А.А., доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

Программные сопредседатели

Кравченко О.А., доктор техн. наук, доцент, Новочеркасск, Российская Федерация

Боровин Ю.М., кандидат техн. наук, доцент, Москва, Российская Федерация

Навроцкий А.В., доктор химических наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Международный программный комитет

Анучин А.С., доктор техн. наук, доцент, Москва, Российская Федерация

Амбарцумянц Р.В., доктор техн. наук, профессор, Одесса, Украина

Беспалов В.Я., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Бигеев В.А., доктор техн. наук, профессор, Магнитогорск, Российская Федерация

Бочкарев И.В., доктор техн. наук, профессор, Бишкек, Кыргызская Республика

Браславский И.Я., доктор техн. наук, профессор, Екатеринбург, Российская Федерация

Брованов С.В., доктор техн. наук, доцент, Новосибирск, Российская Федерация

Букреев В.Г., доктор технических наук, профессор, Томск, Российская Федерация

Вартаков М.В., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Васильев А.С., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Винник Д.А., канд. техн. наук, доцент, Челябинск, Российская Федерация

Гасанов Б.Г., доктор техн. наук, профессор, Новочеркасск, Российская Федерация

Гейчук В.Н., доктор техн. наук, доцент, Киев, Украина

Горбатенко Н.И., доктор технических наук, профессор, Новочеркасск, Российская Федерация

Гузев В.И., доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

Гуревич Л.М., доктор техн. наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Дибров И.А., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Димитров Л.В., Ph. D., профессор, София, Болгария

Добров И.В., доктор техн. наук, профессор, Днепропетровск, Украина

Дорофеев Ю.Г., доктор техн. наук, профессор, Новочеркасск, Российская Федерация

Ершов М.Ю., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Зюев А.М., доктор техн. наук, доцент, Екатеринбург, Российская Федерация

Исаков В.С., доктор техн. наук, профессор, Новочеркасск, Российская Федерация

Калашников А.С., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Карандаев А.С., доктор техн. наук, профессор, Магнитогорск, Российская Федерация

Казаринов Л.С., доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

Кондаков А.И., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Кравец А.Г., доктор техн. наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Красновский Б.М., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Липкин М.С., доктор техн. наук, доцент, Новочеркасск, Российская Федерация

Малолетов А.В., доктор физ.-мат. наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Моргунов Ю.А., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Пинчук В.А., доктор техн. наук, профессор, Луганск, Украина

Пятибратов Г.Я., доктор техн. наук, профессор, Новочеркасск, Российская Федерация

Радев Х., Ph. D., профессор, София, Болгария

Рачков М.Ю., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Рождественский Ю.В., доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

Стефаненко И.В., доктор техн. наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Сердобинцев Ю.П., доктор техн. наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Скибин Г.М., доктор техн. наук, профессор, Новочеркасск, Российская Федерация

Труханов А.В., канд. физ.-мат. наук, Минск, Республика Беларусь

Харитонов С.А., доктор техн. наук, профессор, Новосибирск, Российская Федерация

Храмшин В.Р., доктор техн. наук, доцент, Магнитогорск, Российская Федерация

Оргкомитет

Воронин С.С., Челябинск, Российская Федерация

Гасияров В.Р., канд. техн. наук, доцент, Челябинск, Российская Федерация

Кульмухаметова А.С., канд. техн. наук, доцент, Челябинск, Российская Федерация

Макаров А.М., канд. техн. наук, доцент, Волгоград, Российская Федерация

Сафонов Е.В., канд. техн. наук, доцент, Москва, Российская Федерация

Сухенко Н.А., канд. техн. наук, доцент, Новочеркасск, Российская Федерация

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| Вступительное слово председателя оргкомитета конференции..... | 8 |
| Машиностроение | |
| <i>Шкрабак В.С., Калугин А.А., Аверьянов Ю.И.</i> Оценка эффективности технических мероприятий по улучшению условий труда операторов колесных транспортных средств..... | 9 |
| <i>Махнович С.В., Пермяков Д.А., Хищенко Ю.М.</i> Деформирование и устойчивость цилиндрических оболочек при неравномерном радиальном нагружении..... | 15 |
| <i>Сошинов А.Г., Галушак В.С.</i> Направление техперевооружения сельхозпроизводства путём перевода тракторов и сельхозмашин на электротягу.... | 22 |
| <i>Горелова А. Ю., Кристаль М. Г., Мартыненко В. А.</i> Автоматизация обработки отверстий в корпусных заготовках теплообменных аппаратов..... | 27 |
| <i>Фиронов А.М., Хортов В.П.</i> К выбору концепции перспективных приводных установок транспортных средств..... | 32 |
| <i>Шароглазов Б.А., Клементьев В.В.</i> Влияние основных конструктивных параметров механизма преобразования движения бескривошипной поршневой машины (двигателя) на величину крутящего момента на выходном валу при условиях реализации рабочего цикла, сходственных с кривошипно-шатунными ДВС..... | 37 |
| <i>Артюнин А.И., Барсуков С.В., Суменков О.Ю.</i> Особенности движения маятника на вращающемся валу двигателя механической системы..... | 43 |
| <i>Серёгин С.В.</i> О расщеплении изгибного частотного спектра геометрически несовершенных оболочек..... | 48 |
| <i>Шишков В.В.</i> Рабочий цикл дизеля при пуске..... | 52 |
| <i>Чернышов К.В., Поздеев А.В., Рябов И.М.</i> Виброзащитные свойства подвески автомобиля при оптимальном мгновенном регулировании демпфирования в цикле колебаний..... | 57 |
| <i>Новиков В.В., Поздеев В.В., Чумаков Д.А.</i> Результаты стендовых испытаний пневмоподвески с воздушным и гидравлическим демпфированием..... | 63 |
| <i>Серёгин С.В.</i> Влияние асимметричных начальных несовершенств формы на свободные колебания тонких оболочек..... | 69 |
| <i>Фоминов Е.В., Шучев К.Г.</i> Динамика процесса надмолекулярной самоорганизации в граничном смазочном слое..... | 72 |
| <i>Карелина М.Ю., Черепнина Т.Ю., Бугакова Н.Ю.</i> Улучшение эксплуатационных характеристик агрегатов путем наноструктурирования поверхностей трибосопряжений..... | 77 |
| <i>Горобоцов А.С., Громов Е.Г., Чигиринская Н.В.</i> Метод моделирования циркуляции смазывающей жидкости в машиностроительных изделиях..... | 83 |
| <i>Титенок А.В., Титенок И.А.</i> Дискретный контакт в зубчатом зацеплении..... | 88 |
| <i>Огарков Н.Н., Платов С.И., Звягина Е.Ю.</i> Моделирование процесса переноса шероховатости валков на полосу при прокатывании на дрессировочном стане.... | 94 |
| <i>Логинов А.Ю.</i> Информационная модель для хранения состава машиностроительного изделия..... | 98 |
| <i>Агуреев И.Е., Платонов К.Ю., Хмелев Р.Н.</i> Расчетно-экспериментальные исследования деформаций цилиндров дизелей с воздушным охлаждением на этапе сборки..... | 103 |
| <i>Полянчикова М.Ю.</i> Влияние термической обработки на структурные и упругие характеристики однокомпонентного абразивного инструмента..... | 108 |
| <i>Караванова А.Г., Калашников А.С.</i> Исследование операции зубохонингования ведущих зубчатых колес с расчетно-экспериментальной оценкой характеристик..... | 113 |
| <i>Балабина Т.А., Мамаев А.Н., Карелина М.Ю.</i> Механика качения эластичного колеса по жесткому барабану..... | 119 |
| <i>Чабуткин Е.К.</i> Изменение структуры дисперсного материала при воздействии динамических нагрузок..... | 124 |
| <i>Тюремнов И.С., Морев А.С.</i> Новый показатель для систем непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками..... | 128 |

| | |
|---|-----|
| <i>Дыгало В.Г., Жуков И.С.</i> | |
| Оценка тепловой нагруженности пар трения автоматизированной тормозной системы автомобиля..... | 133 |
| <i>Возмилов А.Г., Глемба К.В., Власов Д.Б.</i> | |
| Исследование характеристик работы двигателя в режиме стресс-тестирования электрического бензинового насоса... | 137 |
| <i>Войку И.П., Комиссаров И.А.</i> | |
| Разработка двусторонней летне-зимней пневматической шины..... | 142 |
| <i>Фурманов Д.В., Николаев В.А., Клочко Н.Н.</i> | |
| Асфальтобетон – как объект разрушения рабочими органами фрезерных машин..... | 146 |
| <i>Тюремнов И.С., Федорова Д.В., Морев А.С.</i> | |
| К обоснованию влияния количества амортизаторов на характеристики колебаний вальца и рамы вибрационного катка..... | 150 |
| <i>Гусев В.Г., Фомин А.А.</i> | |
| Обеспечение геометрии поверхностей на стадии проектирования операции профильного фрезерования некондиционных заготовок..... | 156 |
| <i>Морозов А.В., Гусев В.Г.</i> | |
| Способ совмещенного плоского периферийного шлифования..... | 161 |
| <i>Грубый С.В., Чаевский П.А.</i> | |
| Повышение эффективности обработки канавок на валах из конструкционной стали повышенной твердости..... | 166 |
| <i>Усов С.В., Давыденко П.А., Свириденко Д.С.</i> | |
| Общие закономерности формирования поверхностного слоя деталей машин при обработке комбинированными электротехнологическими методами..... | 171 |
| <i>Грубый С.В., Шавва М.А., Лапшин В.В.</i> | |
| Сверхточная обработка поверхностей элементов приборов из оптических материалов..... | 178 |
| <i>Ильина Л., Шагарова А., Гончаров Н.</i> | |
| Экспериментальные исследования снижения гидравлического сопротивления при движении высоковязких жидкостей в трубопроводе..... | 183 |
| <i>Материаловедение и технологии промышленного производства</i> | |
| <i>Чэнь Янян, Малышева Г.В.</i> | |
| Оптимизация технологии режима отверждения композитов на основе эпоксидных связующих..... | 188 |
| <i>Нелюб В.А.</i> | |
| Многокритериальная оптимизация технологии нанесения металлических покрытий на углеродные ленты..... | 193 |
| <i>Божко Ю.А., Лапунова К.А., Постой Л.В.</i> | |
| Лицевой керамический кирпич мягкой формовки на основе опоковидного сырья..... | 198 |
| <i>Смолий В.А., Косарев А.С.</i> | |
| Физико-химические свойства энергосберегающих трехслойных панелей для энергоэффективных жилых и общественных объектов крупнопанельного и каркасно-панельного домостроения..... | 203 |
| <i>Лонзингер Т.М., Скотников В.А., Сухарев А.М.</i> | |
| Исследование влияния структуры огнеупорной футеровки на эксплуатационные свойства обжиговых печей..... | 208 |
| <i>Яценко Е.А., Смолий В.А., Чумаков А.А.</i> | |
| Физико-химические исследования и оценка пригодности диатомита Черноярского месторождения для синтеза пеностекла..... | 214 |
| <i>Кузнецов В.А., Кот А.В., Сапрыкин О.А.</i> | |
| Экспериментальные исследования над моделями аналога лунного реголита..... | 219 |
| <i>Свинооров Ю.А., Терновский О.А., Дядичев В.В.</i> | |
| Исследование возможностей применения продувочных методов для изготовления литейных стержней из смесей на основе вторичных полимеров и технических лигносульфонатов..... | 222 |
| <i>Герасимова А.А., Дмитриев В.А.</i> | |
| Изготовление деталей методом холодной штамповки..... | 228 |
| <i>Белоусов В.Б., Типалин С.А., Калтин Ю.Г.</i> | |
| Исследование влияние толщины материала на свойства холоднокатаной листовой стали с содержанием углерода 0,08%..... | 231 |
| <i>Курунина Г.М., Иванкина О.М., Бутов Г.М.</i> | |
| Новые каталитические системы на основе платиновых катализаторов..... | 236 |
| <i>Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С.А.</i> | |
| Износостойкость и характеристики поверхности трения металла покрытий с нитридо-боридным легированием..... | 240 |
| <i>Злобин В.Н., Сорокин А.М., Кудашев А.С.</i> | |
| Нанесение каталитических покрытий методом ионной имплантации..... | 245 |
| <i>Крыхтин Ю.И., Карлов В.И., Леонард А.В.</i> | |
| Разработка технологических основ изготовления заготовок фрикционных дисков с молибденовым газотермическим покрытием для работы в масле в узлах транспортных машин..... | 249 |

| | |
|--|-----|
| <i>Фанда А.Ю., Керимова В.В., Яценко Л.А.</i> Проблема защиты стальных трубопроводов и пути её решения..... | 254 |
|--|-----|

Энергетика

| | |
|--|-----|
| <i>Казымов И.М., Компанеец Б.С.</i> Определение факта и места потерь в электрических сетях низкого напряжения..... | 261 |
| <i>Власов А.И., Филин С.С., Кривошеин А.И.</i> Концепция универсального интеллектуального смарт-автомата..... | 267 |
| <i>Симанков В.С., Буцацкий П.Ю.</i> Методологические основы оценки эффективности вовлечения возобновляемой энергии в региональный энергобаланс..... | 272 |
| <i>Максатов Б.М., Дерюгина Г.В., Пугачев Р.В.</i> Оценка ветровых и солнечных ресурсов Кыргызстана..... | 277 |
| <i>Григораиш О.В.</i> Энергообеспечение сельскохозяйственных объектов Краснодарского края за счет использования возобновляемой энергии..... | 281 |
| <i>Горячев С.В., Харченко П.А.</i> Использование безопасного генератора в ветроэнергетике..... | 287 |
| <i>Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Христофоров М.С.</i> Экспериментальное определение характеристик синхронизированной аксиальной двухвходовой генераторной установки..... | 293 |
| <i>Вольмер Е.А., Дерюгина Г.В., Пугачев Р.В.</i> Обоснование сетевой электростанции на базе возобновляемых источников энергии на территории Алтайского края..... | 298 |
| <i>Григораиш О.В., Кириченко А.С., Пигарев К.В.</i> Модель индукционного нагревателя на постоянных магнитах, использующего энергию ветра..... | 303 |
| <i>Шлейников В.Б., Коблова Т.В., Муллаянов Р.И.</i> Повышение устойчивости и снижение эксплуатационных затрат на ЛЭП за счет установки композитных опор..... | 309 |

Системы управления и автоматизации технологических процессов и объектов

| | |
|--|-----|
| <i>Шутиков М.А., Феофанов А.Н.</i> Применение MES-систем в контексте обмена информацией между производственными участками и отделами контроля продукции на предприятии..... | 314 |
| <i>Сапрыкин О.А., Погонин В.И.</i> О разработке глубинного каротажного зонда для исследования структуры лунных пород на космическом аппарате «Луна-Ресурс-1»..... | 319 |
| <i>Зинина И.Н., Ильченко Е.Н.</i> Изучение возможностей применения мобильных роботов в машиностроительном производстве..... | 323 |
| <i>Соломин В.А., Соломин А.В., Замшина Л.Л.</i> Математическое моделирование токов во вто-ричном элементе линейного асинхронного дви-гателя с поперечным магнитным потоком для магнитнолевитационного транспорта..... | 329 |
| <i>Бурков А.Ф., Красковский М.В., Юрин В.Н.</i> Определение параметров трехфазных асинхронных двигателей..... | 334 |
| <i>Вайтеленок Л.В.</i> Работа цифровых органов релейной защиты при насыщении трансформаторов тока: моделирование и анализ..... | 341 |
| <i>Солопов Р.В., Самульченко А.С.</i> Разработка функции приспособленности эволюционной модели электрической сети для расчета установившегося режима методом генетического алгоритма..... | 347 |
| <i>Пономарев К.С., Феофанов А.Н., Гришина Т.Г.</i> Цифровой двойник как инструмент развития информационных технологий предприятия..... | 353 |
| <i>Алехин А.Г., Силаев А.А.</i> Конечные автоматы как модель управления производственной системой дискретного типа..... | 357 |

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ОРГКОМИТЕТА КОНФЕРЕНЦИИ

5-я Всероссийская научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» прошла 25-29 марта 2019 года. Организаторами конференции выступили университета – Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Московский политехнический университет, Волгоградский государственный технический университет. Основная площадка работы конференции была организована в г. Сочи. На базе всех университетов – соорганизаторов были организованы дополнительные площадки, с которыми на протяжении всей конференции был установлен видео-мост.

Конференция проведена при финансовой поддержке Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), а также при организационной и информационной поддержке Южно-Уральской группы Сибирской секции Института инженеров электротехники и электроники (IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Для участия в конференции программным комитетом было отобрано чуть более 700 докладов. В работе конференции приняли участие ученые и практики из 80 городов, из 11 стран мира. В том числе из России из 63 городов от западной и центральной части до Дальнего Востока. Иностранцы участники представляли такие государства, как Германия, Казахстан, Китай, Кыргызстан, Португалия, США, Саудовская Аравия, Таджикистан, Украина, Узбекистан.

Участники конференции представили свои доклады, отражающие последние достижения в области промышленного инжиниринга, на русском и английском языках. Работа конференции была организована в 25 секциях, включая:

Раздел 1. Машиностроение:

- 1.1. Конструирование машин и механизмов;
- 1.2. Динамика машин и рабочих процессов;
- 1.3. Трение, смазка, износ машин;
- 1.4. Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств;
- 1.5. Транспортно-технологические машины и оборудование;
- 1.6. Механическая обработка материалов;
- 1.7. Промышленные гидравлические и пневматические системы и оборудование;
- 1.8. "Зеленые технологии" в машиностроении.

Раздел 2. Материаловедение и технологии промышленного производства:

- 2.1. Полимеры, композиты и керамика;
- 2.2. Стали и сплавы, металлургические и металлообрабатывающие технологии;
- 2.3. Химические и гидрометаллургические технологии;
- 2.4. Технологии покрытия и обработка поверхности;
- 2.5. Методы контроля и анализа материалов.

Раздел 3. Энергетика:

- 3.1. Интеллектуальные системы электроснабжения;
- 3.2. Малая распределенная энергетика;
- 3.3. Возобновляемая энергетика;
- 3.4. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость;
- 3.5. Высоковольтные ЛЭП постоянного тока и гибкие системы электроснабжения.

Раздел 4. Системы управления и автоматизации технологических процессов и объектов:

- 4.1. Системы и технологии управления;
- 4.2. Промышленные мехатронные системы и робототехника;
- 4.3. Силовая электроника, электрические машины и электроприводы;
- 4.4. Микропроцессорные системы управления;
- 4.5. Датчики и системы технического зрения;
- 4.6. Теория и практика динамических измерений;
- 4.7. Моделирование и компьютерные технологии в промышленности.

В настоящем сборнике опубликованы доклады, представленные участниками конференции на русском языке.

Без сомнения, общение специалистов в рамках прошедшей конференции способствовало информированию ученых и практиков о наиболее перспективных направлениях исследований и достижениях в области промышленного инжиниринга. Представленные результаты исследований будут способствовать решению приоритетных задач, стоящих на современном этапе развития промышленности, техники и технологий.

Председатель оргкомитета конференции, доктор техн. наук, профессор А.А. Радионов

Оценка эффективности технических мероприятий по улучшению условий труда операторов колесных транспортных средств

Шкрабак В.С.
ФГБОУ ВО «СПбГАУ»
Санкт-Петербург, Россия
v.shkrabak@mail.ru

Калугин А.А.
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский ГАУ»
Троицк, Россия
starfruitworks@gmail.com

Аверьянов Ю.И.
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»
Челябинск, Россия
aver541710@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема оценки эффективности технических мероприятий по улучшению условий труда операторов колесных транспортных средств. Проблема обусловлена наличием противоречия с одной стороны необходимостью оценки эффективности технических мероприятий, а с другой – отсутствием объективной методики их оценки, с учетом условий труда оператора. Решение существующей проблемы предлагается за счет оригинальной методики сравнительной оценки эффективности технических мероприятий, позволяющих улучшить условия труда операторов колесных транспортных средств. Методика оценки эффективности технических мероприятий базируется на обоснованном допущении, что технические устройства неравнозначны в части их влияния на уровень условий и безопасности труда операторов колесных транспортных средств. Апробация предложенной методики проведена на основе сравнительных испытаний существующих и разработанных технических устройств колесных транспортных средств. Получены результаты оценки эффективности предлагаемых технических устройств по сравнению с аналогами. Реализация предлагаемой методики оценки эффективности технических мероприятий по улучшению условий труда операторов колесных транспортных средств позволит повысить их безопасность в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: колёсное транспортное средство, условия труда оператора, безопасность, сравнительные испытания, оценочная методика.

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение основных технологических и транспортных операций предполагает использование колесных транспортных средств. Эффективность использования колесных транспортных средств во многом зависит от состояния их безопасности. Повышение безопасности эксплуатации колесных транспортных средств возможно за счет применения технических мероприятий, направленных на улучшение условий труда операторов. Эффективность технических мероприятий по улучшению условий труда операторов колесных транспортных средств оценивается с помощью различных методик [4,8,15]. Известно, что технические мероприятия по повышению безопасности эксплуатации колесных транспортных средств по-разному влияют на условия труда оператора [8,12,13...5,17,18]. Так внедрение нового технического мероприятия без его предварительной сравнительной оценки может оказаться малозначимым с точки зрения его влияния на улучшение условий труда. Поэтому важен не только сам факт внедрения какого-либо мероприятия по повышению безопасности эксплуатации колесных транспортных средств, но и его значимости с точки зрения влияния на условия труда операторов [4,8,15]. Стоит отметить, что, к примеру, корейскими учеными [19] установлена

четкая корреляция между тем, что они называют «этика безопасности» и количеством несчастных случаев. Уровень последней в нашей стране не позволяет компенсировать отсутствие защищающих работника технических решений.

Исходя из такого положения, можно констатировать, что в настоящее время существует противоречие с одной стороны необходимость оценки эффективности технических мероприятий, а с другой – отсутствие объективной методики их оценки, с учетом условий труда оператора. Наличие противоречия выдвигает проблему обоснования методики оценки эффективности технических мероприятий, по улучшению условий труда операторов колесных транспортных средств. Решение существующей проблемы возможно за счет решения задач по разработке методики и проведения сравнительной оценки эффективности технических мероприятий, позволяющих улучшить условия труда операторов колесных транспортных средств. Разработка методики оценки эффективности технических мероприятий должна базироваться на обоснованном допущении, что технические устройства неравнозначны в части их влияния на уровень условий и безопасности труда операторов колесных транспортных средств. Для апробирования методики оценки эффективности технических мероприятий предполагается проведение сравнительных испытаний существующих и предлагаемых технических устройств колесных транспортных средств.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ УСЛОВИЙ ТРУДА

Эффективность технических мероприятий по улучшению условий труда операторов колесных транспортных средств может быть оценена показателем, учитывающим их суммарную значимость. Предлагаемый показатель (1), в отличие, например, от известных интегральных показателей [1,4...3,5,12], не просто суммирует степень влияния факторов производственной среды, а подсчитывает суммарную значимость внедренных технических мероприятий на единице колесной техники на основе градации класса условий труда (WCC – working conditions class). Под значимостью внедряемого мероприятия K понимается его прогнозируемая способность снизить класс условий труда или степень его вредности [8,9]:

$$M_{is} = \sum_{i=1}^n K_i \quad (1)$$

где M_{is} (Measures of industrial safety) – показатель эффективности технических мероприятий, балл; K_i – значимость внедряемого технического мероприятия; n – количество внедряемых технических мероприятий, ед.

Из формулы (1) видно, что суммируя значимость внедряемых технических мероприятий, можно получить величину показателя M_{is} , которая дает возможность сделать вывод об их эффективности. Целесообразно стремиться не только к увеличению числа внедряемых мероприятий, но и к повышению их значимости, то есть выбирать для внедрения технические мероприятия, позволяющие максимально снизить WCC. Это позволит получить максимальную эффективность технических мероприятий при меньшем их количестве.

Основой для определения значимости внедряемых технических мероприятий с помощью показателя M_{is} является известный показатель WCC, учитывающий все элементы условий труда, в том числе травмобезопасность рабочего места и состояние производственной среды [1...3,7]. К вопросу определения значимости технических мероприятий можно подойти следующим образом, например: если предлагаемое техническое мероприятие снижает WCC на единицу, то значимость мероприятия K_i можно оценить одним баллом, а если на две единицы, то значимость K_i оценивается двумя баллами и т.д.

Может наблюдаться и обратная ситуация, когда внедряемое техническое мероприятие по каким-либо причинам не улучшает, а ухудшает условия труда. Так, в производственном помещении для снижения предельной допустимой концентрации пыли были установлены воздушно-тепловые завесы. При этом для одних работающих улучшились условия труда, а для других работающих, которые находились ближе всего к завесам, ухудшились, так как участились простудные заболевания [6,7,9]. В таких случаях значимость мероприятия может принимать отрицательные значения, а эффективность внедрения стремиться к нулю.

Рассмотрим возможные состояния эффективности технических мероприятий:

- техническое мероприятие эффективно, значит, WCC становится ниже, а его значимость выше, например: если WCC снижается на 1 единицу, то $K_i = 1$ и т.д.;

- техническое мероприятие не изменяет условия труда, значит, класс условий труда остается прежним, а его значимость равна нулю, например: если $WCC = const$, то $K_i = 0$;

- техническое мероприятие неэффективно, значит, класс условий труда становится выше, а его значимость может принимать отрицательные значения, например: если WCC повышается соответственно на 1 единицу, то $K_i = -1$; на 2 единицы, то $K_i = -2$ и т.д.

С учетом возможных состояний эффективности технических мероприятий и выражения (1) совокупность условий для определения показателя эффективности технических мероприятий по повышению безопасности эксплуатации колесных транспортных средств представляет собой градацию WCC на основе изменения количества и значимости мероприятий.

Например, если каждое из двух технических мероприятий снижает WCC на единицу, то в целом показатель их эффективности $M_{is} = 2$, а другое мероприятие, которое снижает WCC на три единицы, соответственно, $M_{is} = 3$. То есть в данном случае одно техническое мероприятие будет эффективнее двух совместных технических мероприятий.

Из иллюстрации теоретической зависимости показателя эффективности технических мероприятий (рис. 1), дающих положительный эффект, видно, что при внедрении

трех мероприятий (в случае снижения каждым мероприятием WCC на одну единицу) значение $M_{is} = 3$, а при внедрении трех мероприятий (при снижении каждым мероприятием WCC на три единицы) значение $M_{is} = 9$. Из этого следует, что при внедрении равного количества мероприятий более эффективными будут мероприятия, имеющие более высокую значимость.

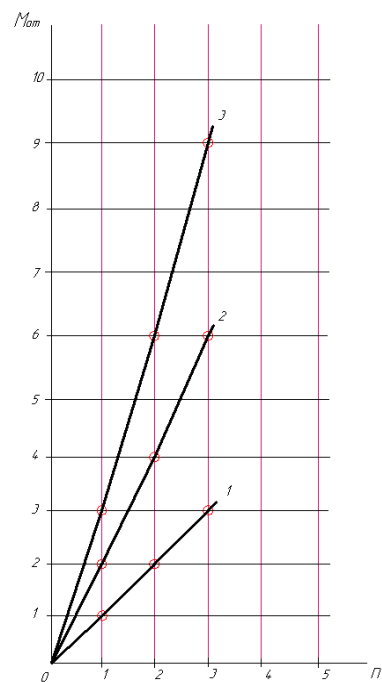


Рис. 1. Иллюстрация теоретической зависимости показателя эффективности технических мероприятий по M_{is} от их количества n с учетом значимости K_i : 1 – при внедрении мероприятий, снижающих WCC на одну единицу; 2 – при внедрении мероприятий, снижающих WCC на 2 единицы; 3 – при внедрении мероприятий, снижающих WCC на три единицы

Для оценки эффективности комплекса предлагаемых технических устройств по методике, изложенной в работе [9], необходимо определить класс условий труда WCC и, на его основе, величину показателя M_{is} для рабочего места оператора до и после внедрения технического мероприятия или нескольких из них на одной колёсной машине. В этом случае можно судить о значимости каждого технического мероприятия, например: по сравнению с машиной, необорудованной дополнительными средствами улучшения условий и безопасности труда или средствами, имеющими сравнительно малую эффективность (аналогами). А также определить, какое из предлагаемых технических мероприятий или их совокупность наиболее эффективны для улучшения условий труда оператора колёсной машины. Для сопоставления результатов оценки условий труда операторов колёсных машин при подсчёте показателя M_{is} используем критерии гигиенической оценки факторов рабочей среды и трудового процесса [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ

Рассмотрим оценку эффективности от внедрения технических мероприятий по улучшению условий труда опера-

торов колёсных транспортных средств на примере устройства автоматической блокировки дифференциала транспортного средства, автоматического догрузителя сцепного веса, устройства для предупредительного подогрева ДВС транспортного средства и устройства для подогрева пола кабины транспортного средства.

ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ БЛОКИРОВКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛА

Сравнительные испытания устройства автоматической блокировки дифференциала транспортного средства и механизма полуавтоматической блокировки дифференциала ведущего моста автомобиля ЗИЛ-4331 (например, изготавливаемой и устанавливаемой предприятием ООО «Наш Профиль», г. Новосибирск, серийный номер узла: №433112400010) были оценены предлагаемым показателем $M_{от}$. Предварительно экспериментальными исследованиями установлено [9], что использование устройства автоматической блокировки дифференциала (рис. 2) (патент №122460 РФ, 2011 г.) позволяет значительно (от 18 до 32%) снизить буксование грузового автомобиля ЗИЛ-4331 на поверхностях с малой несущей способностью. Снижение буксования происходит за счёт повышения сцепных качеств ведущих колес с дорожным покрытием, что приводит к улучшению устойчивости прямолинейного движения, уменьшению тормозного пути и к снижению вероятности возникновения дорожно-транспортных происшествий.

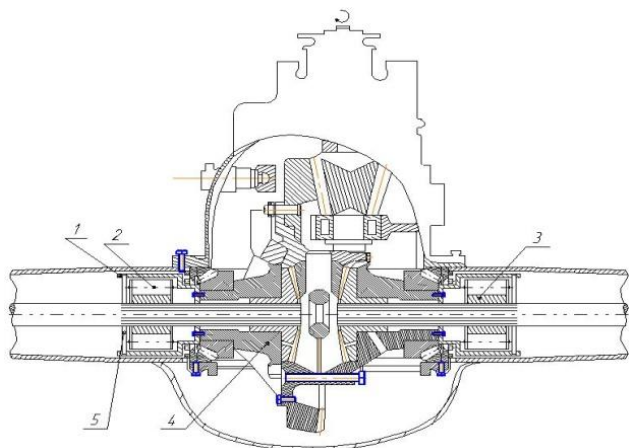


Рис. 2. Принципиальная схема автоматической блокировки дифференциала: 1 – наружная обойма; 2 – сепаратор с роликами и пружинами; 3 – звездочка; 4 – корпус дифференциала; 5 – стопорное кольцо

В связи с этим, обеспечиваемое предлагаемым устройством блокировки дифференциала снижение буксования приводит к улучшению условий и охраны труда в целом.

В результате сравнительной оценки внедрения двух вариантов блокировок установлено, что степень вредности класса условий труда, определенная по методике интегральной оценки, снижается на одну единицу (с $WCC = 3.3$ до $WCC = 3.2$) для устройства полуавтоматической блокировки дифференциала и на две единицы (с $WCC = 3.3$ до $WCC = 3.1$) для предлагаемого автоматического механизма. Положительный эффект проявляется за счет уменьшения влияния факторов тяжести трудового процесса оператора: общая нагрузка (с участием мышц рук, корпуса, ног), количество воспринятых сигналов в единицу времени (п.п.

5.10.3 Руководства Р2.2.2006-05, табл. 17...19) [11]. Детальные замеры указанной активности конечностей проводятся как российскими, так и зарубежными [16] учеными, например, при изучении биомеханики рук. При этом при использовании полуавтоматической блокировки дифференциала показатель эффективности мероприятий по охране труда M_{is} , подсчитанный в соответствии с системой (2), будет равен двум ($M_{is} = 2$), а при использовании устройства автоматической блокировки дифференциала соответственно – трем ($M_{is} = 3$). Это обусловлено тем, что в первом случае оператор затрачивает время на оценку момента включения механизма и действия по приведению его в работу, а во втором этих действий не требуется.

ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДОГРУЖАТЕЛЯ СЦЕПНОГО ВЕСА

Увеличение сцепного веса трактора для снижения буксования зачастую происходит с помощью различных способов: заполнение шин водой, использование установки на ведущие колеса металлических грузов (дисков), установки грузов на специальные платформы в передней и задней части трактора [9], а также устройства автоматического догрузителя сцепного веса (рис. 3), патент №110357 РФ, 2011 г.).

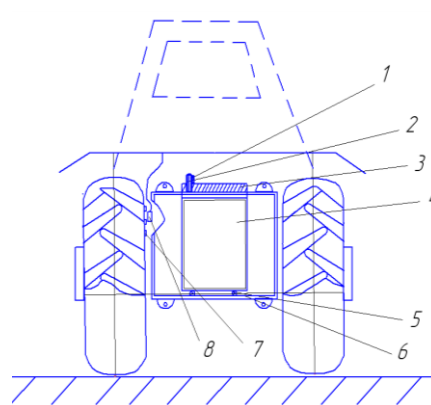


Рис. 3. Принципиальная схема трактора, оборудованного весовым догрузителем с автоматическим перемещением массы: 1 – зубчатая рейка передаточного механизма гидrocилиндра; 2 – приводная шестерня передаточного механизма; 3 – зубчатая рейка съёмного бака; 4 – съёмный бак с жидкостью; 5 – обрезиненные ролики; 6 – рама с кронштейнами для крепления на тракторе; 7 – корона; 8 – индуктивный датчик

Проведённые сравнительные испытания тракторов при установке на них грузов на специальные платформы в передней и задней части и предлагаемого автоматического догрузителя сцепного веса с целью оценки условий труда показали, что в первом случае степень вредности снижается с величины $WCC = 3.3$ до $WCC = 3.2$ а во втором соответственно снижается на две единицы с $WCC = 3.3$ до $WCC = 3.1$.

В первом случае небольшое снижение связано как со снижением процесса буксования, так и с увеличением трудоёмких операций по навеске и снятию грузов, что может приводить и к возникновению травм. Таким образом, показатель эффективности мероприятий по охране труда M_{is} , подсчитанный в соответствии с системой (2.2), будет равен единице ($M_{is} = 1$).

Во втором случае при применении автоматического догрузателя сцепного веса, трудоёмких операций по навеске и снятию грузов не требуется, а подсчитанный показатель M_{is} имеет значение, равное трем ($M_{is} = 3$).

ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРЕДПУСКОВОГО ПОДОГРЕВА ДВС ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Оператор транспортного средства может осуществлять пуск ДВС с помощью имеющихся в распоряжении средств, таких как заводная рукоятка. Пуск двигателя автомобиля с помощью заводной рукоятки не является безопасным и может быть малоэффективен при довольно низких температурах (-25°C и ниже), что обуславливает нахождение водителя длительное время (до одного часа) в неблагоприятных условиях труда. В настоящее время на многих сельскохозяйственных предприятиях широко распространено применение индивидуальных и групповых факельных предпусковых подогревателей. Они позволяют сократить время пуска ДВС, но пуск двигателя таким способом зачастую приводит к возгоранию мобильной техники и травмированию работников [5,8,9].

Предлагаемое устройство (патент на изобретение №2451207 РФ, 2012 г.) для предпускового подогрева ДВС транспортного средства (рис. 4) исключает вышеуказанные недостатки.

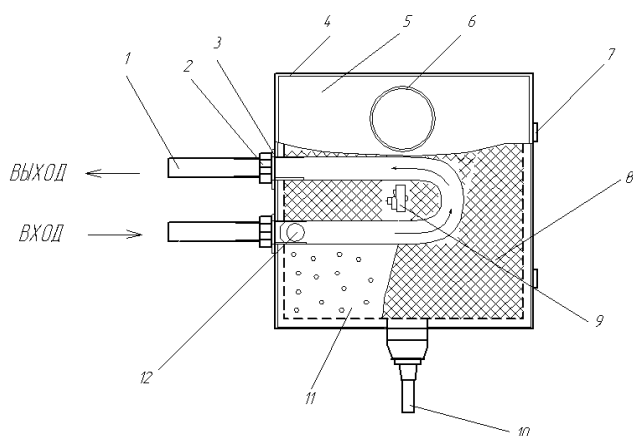


Рис. 4. Принципиальная схема газоподогревателя ДВС: 1 – фигурный патрубок; 2 – гайка; 3 – уплотнительная шайба; 4 – корпус подогревателя; 5 – крышка подогревателя; 6 – патрубок горячего воздуха; 7 – шарнир крышки подогревателя; 8 – сетка инфракрасной горелки; 9 – кнопка пьезоподжига; 10 – штуцер для соединения с газовым редуктором; 11 – керамический нагревательный элемент

Кроме того, газовый инфракрасный предпусковой подогреватель обеспечивает более быстрый запуск ДВС колёсной машины (УАЗ-2206), что сокращает время пребывания водителя при низких температурах до 11...20 минут, к тому же его применение практически полностью исключает травмо- и пожароопасность по сравнению с факельным предпусковым подогревателем.

Проведённые сравнительные испытания тракторов, которые были оснащены устройством факельного предпускового подогрева и устройством газоподогревателя ДВС с целью оценки условий труда оператора показали, что степень вредности в первом случае снижается на одну единицу (с $WCC = 3.4$ до

$WCC = 3.3$), а во втором соответственно – на три единицы (с $WCC = 3.4$ до $WCC = 3.1$). Наибольшая эффективность газового инфракрасного предпускового подогревателя ДВС происходит за счёт уменьшения производственно обусловленной заболеваемости работников на основе снижения влияния либо исключения действия вредных факторов производственной среды: WCC по показателю температуры воздуха (табл. 9...11 Руководства Р2.2.2006-05) [9].

Таким образом, в первом случае (использование факельного подогревателя) показатель эффективности мероприятий по охране труда M_{is} , подсчитанный в соответствии с системой (2), будет равен единице ($M_{is} = 1$), а во втором случае (при применении предлагаемого нами устройства на основе инфракрасного излучателя), подсчитанный показатель M_{is} будет иметь значение, равное трем ($M_{is} = 3$).

ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОДОГРЕВА ПОЛА КАБИНЫ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Эффективность работы предложенного электронагревательного напольного покрытия для подогрева подошв ног оператора (рис. 5), была подтверждена результатами экспериментальных исследований [9].

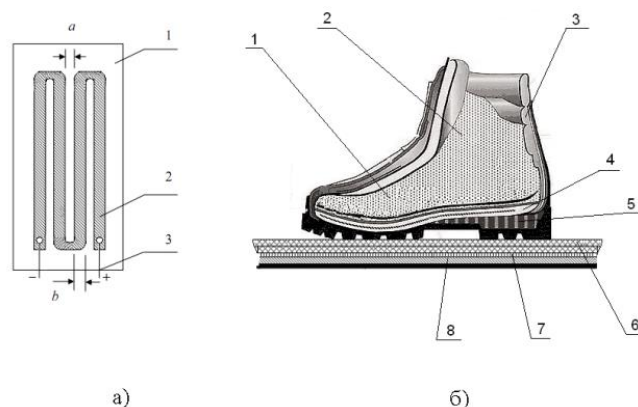


Рис. 5: а) – Принципиальная схема устройства плёночного лучистого электронагревателя: 1 - двухслойное полотно из полиэтилентерефталатовой плёнки; 2 – резистивные элементы; 3 – токоподводящие провода; а – расстояние между ветвями резистивных элементов; b – ширина ленты резистивного элемента; б) - расположение ступни оператора в обуви на поверхности напольного покрытия: 1 – ступня человека; 2 – носок (х/б); 3 – кожаный материал обуви; 4 – стелька; 5 – подошва обуви; 6- слой резины коврика; 7 – нагревательный элемент; 8 – металлический пол кабины

Устройство за счёт автоматического терморегулятора в установленном режиме обеспечивает значения температуры поверхности пола кабины в пределах выбранных границ ($18...22^{\circ}\text{C}$), что удовлетворяет требованиям действующих нормативных документах (табл. П17.2 Руководства Р2.2.2006-05).

Степень вредности класса условий труда при внедрении покрытия в кабине автомобиля ЗИЛ-4331 снижается на две единицы: с $WCC = 3.2$ до $WCC = 2$, что попадает в классификацию допустимых условий труда. Улучшение условий труда подтверждается и увеличением предлагаемого оценочного показателя $M_{от}$, подсчитанного до и после внедрения мероприятия на автомобиле ЗИЛ-4331. При рассмотре-

нии показателя эффективности мероприятий $M_{от}$ для штатного автомобиля, его величина (по критериям охлаждающего и нагревающего микроклимата на рабочем месте), подсчитанная в соответствии с системой (1), будет равна единице ($M_{is}=1$).

В случае внедрения электронагревательного напольного покрытия подсчитанный показатель M_{is} будет иметь значение, равное двум ($M_{is}=2$).

Величина показателя $M_{от}$ в два раза больше в случае внедрения предлагаемого нами устройства, что подтверждает, тем самым, его эффективность для улучшения условий труда оператора.

После оценки эффективности внедрения предлагаемых технических устройств [9] была составлена сводная таблица по их влиянию на условия труда операторов (табл. 1).

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний технических мероприятий по улучшению условий труда операторов

| Наименование технического мероприятия | Результаты оценки эффективности технических мероприятий по охране труда показателем M_{is} до и после внедрения | |
|---|---|-----------------|
| | До внедрения | После внедрения |
| Автоматическое устройство для блокировки дифференциала | 1 | 3 |
| Автоматический догрузитель сценного веса колёсного трактора | 1 | 2 |
| Устройство для предпускового подогрева ДВС | 1 | 3 |
| Электронагревательное напольное покрытие | 1 | 2 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Результаты проведённых сравнительных испытаний позволяют заключить, что предлагаемая методика оценки эффективности технических мероприятий может быть использована для выбора наиболее эффективных технических решений для улучшения условий труда операторов колёсных транспортных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянов Ю.И. Повышение безопасности процесса уборки зерновых культур на основе совершенствования системы «Оператор-Машина-Среда»: автореф. дис. докт. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2006. – 42 с.
2. Андрос В.А. Обоснование исходных положений для анализа причин производственного травматизма // ТР. ВИМ. – Москва: изд. ВИМ, 1970. – Т. 46.
3. Андрос В.А. Теоретические исследования действия факторов опасности на человека оператора. – Москва: Знание, 1973. – 64 с.
4. Богданов А.В. Повышение безопасности и совершенствование оценки условий труда операторов мобильных колёсных машин в агропромышленном производстве: дис. докт. техн. наук. – Санкт-Петербург-Пушкин, 2010. – 359 с.
5. Борисова Е.В. Материально-техническая обеспеченность и эффективность аграрного производства (на материалах Российской Федерации): автореф. дис. ...канд. экон. наук. – Москва, 2013. – 18 с.

6. Гавриченко А.И. Охрана труда на современном этапе // Состояние и научные проблемы риска травматизма и профессиональной заболеваемости работников АПК России: Сб. науч. тр. – Орел: ВНИИОТ, 1998. – С. 11-16.

7. Гавриченко А.И. Условия труда и заболеваемость сельских механизаторов / А.И. Гавриченко, Г.П. Васильев // Техника и оборудование для села – 1999. – №7. – С. 21-22.

8. Горшков Ю.Г. Оценка организационных и технических мероприятий по повышению безопасности операторов мобильных колёсных машин / Ю.Г. Горшков, А.А. Калугин, А.В. Богданов // Охрана труда и техника безопасности в сельском хозяйстве. – 2011. – №2. – С. 43-45.

9. Горшков Ю.Г. Повышение эффективности и безопасности движения колёсных машин в условиях сельского хозяйства: монография / Ю.Г. Горшков, С.В. Золотых, И.Н. Старунова, А.А. Калугин. – Челябинск: типография «Сити-Принт», ИП Мякотин И.В., 2016. – 484 с.

10. Калугин А.А. Экспертная оценка – инструмент управления показателями профессионального риска в агропромышленном комплексе РФ / Ю.Г. Горшков, И.Н. Старунова, А.А. Калугин // Наука. – Костанай: КИНЭУ, 2013. – №3. – С.74-81.

11. Руководство Р 2.2.2006-05 "Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда" (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 29 июля 2005 г.) // Guide on Hygienic Assessment of Factors of Working Environment and Work Load. Criteria and Classification of Working Conditions.

12. Anishchenko EB, Trankovskaya LV. Hygienic aspects of the working conditions assessment and state of health of the workers of the railway departmental security forces. Gig Sanit. 2014 Mar-Apr 48-50. PMID: 25051740.

13. P.C. Cacciabue, G. Cojazzi A human factors methodology for safety assessment based on the DYLAM approach, Reliability Engineering & System Safety, Volume 45, Issues 1–2, 1994, Pages 127-138, ISSN 0951-8320, [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(94\)90081-7](https://doi.org/10.1016/0951-8320(94)90081-7).

14. Dame Carol Black Work, Health and Wellbeing, Safety and Health at Work, Volume 3, Issue 4, 2012, Pages 241-242, ISSN 2093-7911, <https://doi.org/10.5491/SHAW.2012.3.4.241>.

15. Iraj Mohammadfam, Mojtaba Kamalinia, Mansour Momeni, Rostam Golmohammadi, Yadollah Hamidi, Alireza Soltanian Evaluation of the Quality of Occupational Health and Safety Management Systems Based on Key Performance Indicators in Certified Organizations, Safety and Health at Work, Volume 8, Issue 2, 2017, Pages 156-161, ISSN 2093-7911, <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.09.001>.

16. Kyung-Sun Lee, Myung-Chul Jung, Ergonomic Evaluation of Biomechanical Hand Function, Safety and Health at Work, Volume 6, Issue 1, 2015, Pages 9-17, ISSN 2093-7911, <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.09.002>.

17. Lu Meng, Marilyn B. Wolff, Kelly A. Mattick, David M. DeJoy, Mark G. Wilson, Matthew Lee Smith Strategies for Worksite Health Interventions to Employees with Elevated Risk of Chronic Diseases, Safety and Health at Work, Volume 8, Issue 2, 2017, Pages 117-129, ISSN 2093-7911, <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.11.004>.

18. Melanie Carder, Louise Hussey, Annemarie Money, Matthew Gittins, Roseanne McNamee, Susan Jill Stocks, Dil Sen, Raymond M. Agius The Health and Occupation Research Network: An Evolving Surveillance System, Safety and Health at Work, Volume 8, Issue 3, 2017, Pages 231-236, ISSN 2093-7911, <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.12.003>.

19. Yangho Kim, Jungsun Park, Mijin Park, Creating a Culture of Prevention in Occupational Safety and Health Practice,

Safety and Health at Work, Volume 7, Issue 2, 2016, Pages 89-96, ISSN 2093-7911, <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.02.002>.

20. E. Zio, P. Baraldi, M. Librizzi, L. Podofillini, V.N. Dang, A fuzzy set-based approach for modeling dependence among human errors, Fuzzy Sets and Systems, Volume 160, Issue 13, 2009, P. 1947-1964/

Assessment of the Effectiveness of Technical Measures Improving the Working Conditions of Wheeled Vehicles Operators

Kalugin A.A.

South-Ural state agrarian university, SUSAU
Troitsk, Russia
starfruitworks@gmail.com

Averyanov Y.I.

South-Ural state university, SUSU
Chelyabinsk, Russia
aver541710@mail.ru

Abstract. The article considers the issue of assessing the effectiveness of technical measures aimed at improving the working conditions of wheeled vehicle operators. A problem is caused by a contradiction between the need to assess the effectiveness of technical measures, on the one hand, and the lack of an objective methodology for their assessment which would take into account the operator working conditions, on the other hand. The paper proposes a solution to the existing problem, which is based on an original method for comparative assessment of the effectiveness of technical measures that contribute to the improvement of working conditions for wheeled vehicle operators. The methodology for assessing the effectiveness of technical measures is based on the justified assumption that technical devices do not equally influence the safety level and conditions of wheeled vehicle operators. The

proposed methodology was approved based on comparative testing of the existing and newly-developed technical devices of wheeled vehicles. We assessed the effectiveness of the proposed technical devices and compared it with that of their analogues. The implementation of the proposed methodology for assessing the effectiveness of technical measures for the improvement of working conditions of wheeled vehicle operators will improve their safety in the operational process.

Keywords: wheeled vehicles, operator working conditions, safety, comparison testing, assessment methodology.

Деформирование и устойчивость цилиндрических оболочек при неравномерном радиальном нагружении

Махнович С.В., Пермяков Д.А., Хищенко Ю.М.
Южно-Уральский государственный университет
Челябинск, Россия
makhnovichsv@susu.ru

Аннотация. Рассматривается неосесимметричное деформирование и устойчивость сжатых оболочек корпуса летательного аппарата с учетом поперечных локальных воздействий. Основное внимание уделено моделированию контактного взаимодействия оболочек с поясами поперечной амортизации. Для анализа деформирования оболочек используется процедура последовательных приближений с учётом нелинейного изменения реакции пояса амортизации при смещениях конструкции. Уравнения устойчивости оболочки дискретизируются методом Бубнова-Галёркина с использованием рядов Фурье. С помощью разработанной модели исследуются особенности деформирования конструктивно- и технологически ортотропных оболочек под действием локальных нагрузок от поясов амортизации. Расчётные модели верифицируются по результатам испытаний модельных и натурных оболочек.

Ключевые слова: ортотропная оболочка, неравномерное давление, контактная нагрузка, несимметричное деформирование, устойчивость оболочки, сравнение с экспериментом.

ВВЕДЕНИЕ

В работе обсуждается расчетная модель деформирования цилиндрических оболочек корпуса летательного аппарата (ЛА) при воздействии нагрузок движения. Кроме традиционных нагрузок – осевого сжатия N и внешнего давления p в этом случае на корпус действуют силы реакции поясов поперечной амортизации \underline{z}_R и направляющих устройств [1]. Воздействие этих реакций на оболочку корпуса неосесимметрично и носит контактный характер. Это обстоятельство представляет основную трудность формирования модели деформирования оболочки и особенно потери устойчивости.

Решение контактных задач теории оболочек обсуждается в работах [2-5]. При относительно малой ширине области контакта рассматривают контакт только вдоль образующей или меридиана. Контактная задача становится одномерной и обычно решается методом интегральных уравнений. В такой постановке решены задачи контактного воздействия жестких ложементов по дугам окружности полубесконечной оболочки. Задачи контактного взаимодействия цилиндрических оболочек с упругим основанием рассмотрены в работе [6]. Рассмотрены случаи узких опор, когда область контакта допустимо считать отрезком линии, а также взаимодействие по двумерной области контакта. Для решения используется метод тригонометрических рядов. Отмечается важность выбора модели упругого основания. Обычно используется простейшая

линейная модель Винклера с одним или двумя коэффициентами постели. Коэффициенты определяются из приближенных моделей упругого тела или экспериментально. Отмечено, что жесткостные параметры основания значительно влияют на распределение контактных усилий. Основными недостатками таких моделей являются сложность решения задачи, особенно при выраженной нелинейности жесткостной характеристики упругого основания. Это обстоятельство наряду с несимметрией воздействия значительно усложняет и анализ устойчивости деформированного состояния оболочки. По-видимому, впервые решение задачи устойчивости цилиндрической оболочки под действием неосесимметричного давления рассматривалось Х.М. Муштари в работе [7]. Однако, численные результаты были получены позднее [8]. Причем, в отличие от классической постановки работы [7], докритическое состояние оболочки определялось из уравнений линейной моментной теории. Характерные особенности потери устойчивости цилиндрических оболочек при неосесимметричном косинусоидальном и локально-равномерном давлении исследовались в работах [9, 10]. Качественные изменения, выявленные в деформировании и устойчивости оболочек при таких нагрузках, оказались столь разнообразны, что исследования их продолжаются. Важные результаты получены в работах [11-14].

Анализ уже полученных результатов показывает, что несмотря на локальный характер давления, во многих случаях метод Эйлера позволяет получать значение критических нагрузок с достаточной для практики точностью. При этом решение выполняется значительно проще, чем решения методами, в которых приходится обращаться к геометрическим нелинейным уравнениям теории оболочек. Отметим также, что в известных работах функция распределения поперечной нагрузки по поверхности оболочки полагается неизменяющейся в процессе нагружения. Исследования деформирования и устойчивости оболочек при нагрузках контактного характера, нелинейно изменяющихся в процессе нагружения, находятся на начальном этапе, несмотря на их практическую важность.

В работе рассматривается расчетная модель деформирования ортотропной оболочки при нагружении, включающем поперечные воздействия контактного характера. Её достоверность подтверждена на основе сравнения с экспериментами и с известными решениями задачи при поперечной нагрузке без учета особенностей контакта.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ОБОЛОЧКИ ДО ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ

Ортотропная цилиндрическая оболочка радиусом R , толщиной h , длиной L , нагружена осесимметричными осевой и радиальной нагрузками, а также неравномерным давлением $q_z = q_0 z_1(\xi, \theta)$ по части боковой поверхности, где $\xi = x/R$ и $\theta = y/R$ – продольная и окружная относительные координаты на рис. 1. В полотне оболочки пакет слоев композитного материала в целом ортотропен и оси упругой симметрии параллельны координатным осям.

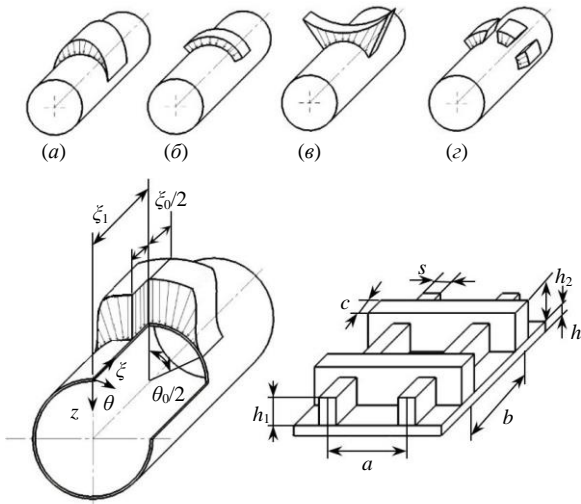


Рис. 1. Расчетная схема оболочки и виды локальных нагрузок: (а) – косинусоидального вида; (б) – локально равномерная; (в) – параболически распределенная; (г) – давление на нескольких площадках

Подкрепляющие ребра однонаправленно армированы и расположены вдоль линий главных кривизн оболочки. Механические характеристики каждого слоя полотна оболочки и ребер определяются, как для однонаправленно армированного материала [15]. Компоненты матрицы жесткости для многослойного пакета определены при условии совместной работы слоев без скольжения [16] с использованием гипотез Кирхгофа-Лява для описания деформации оболочки. Уравнения упругого равновесия оболочки в цилиндрической системе координат ξ, θ, z запишутся в матричном виде:

$$\mathbf{LW} = \mathbf{Z}_H R^2, \quad (1)$$

где $\mathbf{W} = \{u_0, v_0, w_0\}^T$ – вектор-столбец перемещений оболочки до потери устойчивости по осям ξ, θ, z ; $\mathbf{Z}_H = \{q_x, q_y, q_z\}^T$ – вектор внешней нагрузки; $\mathbf{L} = \{L_{ij}\}$, $(i, j = 1, 2, 3)$ – матрица дифференциальных операторов:

$$L_{11} = C_{11} \frac{d^2}{d\xi^2} + C_{66} \frac{d^2}{d\theta^2}; L_{12} = (C_{12} + C_{66}) \frac{d^2}{d\xi d\theta};$$

$$L_{13} = C_{12} \frac{d}{d\xi} + \frac{1}{R^2} \left(D_{11} \frac{d^3}{d\xi^3} - D_{66} \frac{d^3}{d\xi d\theta^2} \right);$$

$$L_{21} = L_{12}; L_{22} = C_{66} \frac{d^2}{d\xi^2} + C_{22} \frac{d^2}{d\theta^2};$$

$$L_{23} = -C_{22} \frac{d}{d\theta} + \frac{1}{R^2} (D_{12} + 3D_{66}) \frac{d^3}{d\xi^2 d\theta};$$

$$L_{31} = L_{13}; L_{32} = L_{23};$$

$$L_{33} = C_{22} + \frac{1}{R^2} \left[D_{11} \frac{d^4}{d\xi^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{d^4}{d\xi^2 d\theta^2} + D_{22} \left(\frac{d^4}{d\theta^4} + 2 \frac{d^2}{d\theta^2} + 1 \right) \right].$$

Компоненты матрицы жесткости C_{ij} и D_{ij} имеют вид:

$$C_{11} = C_{11}^0 + \frac{E_{1p} s h_1}{a}; C_{22} = C_{22}^0 + \frac{E_{2p} c h_2}{b}; C_{12} = C_{12}^0;$$

$$C_{66} = C_{66}^0; D_{11} = D_{11}^0 + \frac{E_{1p} s h_1}{4a} (h_1 + h)^2 + \frac{E_{1p} s h_1^3}{12a}; \quad (2)$$

$$D_{22} = D_{22}^0 + \frac{E_{2p} c h_2}{4a} (h_2 + h)^2 + \frac{E_{2p} c h_2^3}{12b}; D_{12} = D_{12}^0; D_{66} = D_{66}^0;$$

где для многослойного полотна оболочки согласно [16]:

$$C_{ij}^0 = 2 \left[B_{ij}^{k+1} h_{k+1} + \sum_{n=1}^k B_{ij}^n (h_n - h_{n+1}) \right]; \quad i, j = 1, 2$$

$$D_{ij}^0 = 2 \left[B_{ij}^{k+1} h_{k+1}^3 + \sum_{n=1}^k B_{ij}^n (h_n^3 - h_{n+1}^3) \right];$$

E_{1p} и E_{2p} – приведенные модули упругости соответственно продольных и окружных ребер. Коэффициенты упругости B^{kij} для k – того элементарного слоя с толщиной h_k получаются в результате разрешения системы шести уравнений обобщенного закона Гука при симметричном расположении слоев относительно срединной поверхности полотна оболочки.

При условии шарнирного опирания торцов оболочки $v_0 = 0$; $w_0 = 0$; $N_{11}^0 = 0$; $M_{11}^0 = 0$; ($\xi = 0, L/R$) решение уравнений (1) может быть найдено в следующем виде:

$$u_0 = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} u_{mn} \cos \bar{m} \xi \cos n \theta; v_0 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} v_{mn} \sin \bar{m} \xi \sin n \theta \quad (3)$$

$$w_0 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} w_{mn} \sin \bar{m} \xi \cos n \theta,$$

где $\bar{m} = \frac{m\pi R}{L}$; $m = 1, 2, 3 \dots$; $n = 0, 1, 2 \dots$

$$w_{mn} = \frac{q_0 R^2}{C_{11}} \frac{\Delta_{33}}{\Delta} q_{mn}; u_{mn} = \frac{q_0 R^2}{C_{11}} \frac{\Delta_{31}}{\Delta} q_{mn}; v_{mn} = \frac{q_0 R^2}{C_{11}} \frac{\Delta_{32}}{\Delta} q_{mn};$$

$$\Delta_{31} = a_{13} a_{22} - a_{12} a_{23}; \Delta_{32} = a_{13} a_{21} - a_{11} a_{23}; \Delta_{33} = a_{11} a_{22} - a_{12}^2;$$

$$\Delta = a_{13} \Delta_{22} - a_{23} \Delta_{23} + a_{33} \Delta_{33}; a_{11} = -(\bar{m}^2 + \delta_3 n^2);$$

$$a_{12} = (\delta_2 + \delta_3) \bar{m} n; a_{13} = -\delta_2 \bar{m} - \bar{m} (\omega_1 \bar{m}^2 - \omega_4 n^2); a_{21} = a_{12};$$

$$a_{22} = -(\delta_3 \bar{m}^2 + \delta_1 n^2); a_{23} = n \left[\delta_1 + (\omega_3 + 3\omega_4) \bar{m}^2 \right]; \quad (4)$$

$$a_{33} = \delta_1 + \omega_1 \bar{m}^4 + 2(\omega_3 + 2\omega_4) \bar{m}^2 n^2 + \omega_2 (n^2 - 1)^2$$

$$a_{31} = -a_{13}; a_{32} = -a_{23}; \delta_1 = \frac{C_{22}}{C_{11}}; \delta_2 = \frac{C_{12}}{C_{11}}; \delta_3 = \frac{C_{66}}{C_{11}};$$

$$\omega_1 = \frac{D_{11}}{C_{11} R^2}; \omega_2 = \frac{D_{22}}{C_{11} R^2}; \omega_3 = \frac{D_{12}}{C_{11} R^2}; \omega_4 = \frac{D_{66}}{C_{11} R^2};$$

$$q_{mn} = \frac{2\delta_n R}{\pi L} \iint_{S_0} z_1(\xi, \theta) \sin \bar{m} \xi \cos n \theta d\xi d\theta \quad - \text{коэффициенты}$$

разложения в ряд Фурье внешней нагрузки с интенсивностью q_z , распределенной в пределах области S_0 боковой поверхности оболочки по закону $z_1(\xi, \theta)$; $\delta_n = 1$ при $n = 0$; $\delta_n = 2$ при $n \geq 1$.

Докритическим перемещениям (3) из соотношений Коши и закона Гука соответствуют внутренние усилия и моменты в оболочке:

$$\begin{aligned}
 N_{11}^0 &= \frac{C_{11}}{R} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\delta_2 n v_{mn} - \bar{m} u_{mn} - (\delta_2 + \bar{m}^2 \omega_1) w_{mn} \right] (sc)_{mn}; \\
 N_{22}^0 &= \frac{C_{11}}{R} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \delta_1 n v_{mn} - \delta_2 \bar{m} u_{mn} - [\delta_1 + (1-n^2) \omega_2] w_{mn} \right\} (sc)_{mn}; \\
 N_{12}^0 &= \frac{C_{11}}{R} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[(\delta_3 + 2\omega_4) \bar{m} v_{mn} - \delta_3 n u_{mn} - 2\omega_2 \bar{m} n w_{mn} \right] (cs)_{mn}; \\
 M_{11}^0 &= C_{11} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\omega_1 \bar{m} u_{mn} - \omega_3 n v_{mn} + (\omega_1 \bar{m}^2 + \omega_3 n^2) w_{mn} \right] (cs)_{mn}; \\
 M_{22}^0 &= C_{11} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\omega_3 \bar{m}^2 - \omega_2 (1-n^2) \right] w_{mn} (sc)_{mn}; \\
 M_{12}^0 &= -2C_{11} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \omega_4 (\bar{m} v_{mn} + \bar{m} n w_{mn}) (cs)_{mn}; \\
 (sc)_{mn} &= \sin \bar{m} \xi \cos n \theta; (cs)_{mn} = \cos \bar{m} \xi \sin n \theta.
 \end{aligned} \tag{5}$$

ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЯСА АМОРТИЗАЦИИ С ОБОЛОЧКОЙ

Значительную сложность решения задачи деформирования оболочки представляет учет контактного взаимодействия поясов амортизации с её поверхностью. Реакция пояса амортизации образуется из отдельных усилий поджатия амортизирующих элементов, расставленных по окружности обоймы пояса в определенном порядке как показано на рис. 2а. Геометрические оси корпуса ЛА и обоймы пояса, закрепленной, например, на стенке оболочки, при отсутствии внешних возмущений совпадают. При перемещении ЛА в оболочке в процессе движения распределение реакций поясов по боковой поверхности оболочки корпуса определяется из решения контактной задачи. По условиям эксплуатации жесткостная характеристика амортизаторов, как видно по рис. 2а, существенно нелинейна. Часть её почти параллельна оси перемещений. Это значительно влияет на перераспределение контактного давления по поверхности оболочки в процессе нагружения. Для решения нелинейной контактной задачи предлагается алгоритм, представляющий сочетание шаговой процедуры по нагрузке и итерационной процедуры для определения зоны контакта и величины контактного давления.

Вследствие малости размеров контактной планки по сравнению с размерами оболочки, распределение контактной нагрузки в пределах её площадки принимаем равномерным. Касательные усилия, возникающие за счет кулоновского трения скольжения, считаем пропорциональными нормальному давлению на планку. Тогда радиальная q'_R и касательная τ'_R составляющие поверхностной нагрузки на оболочку от каждого амортизатора, контактирующего с ней, запишутся следующим образом:

$$q'_R = \begin{cases} 0, \text{ при } |\xi - \xi_i^l| > \frac{\xi_0^l}{2}, |\theta - \theta_i^l| > \frac{\theta_0^l}{2} \text{ или при } (A_0^l + w_i) \leq 0; \\ \frac{z'_R(\Delta_l)}{\xi_0^l \theta_0^l R^2}, \text{ при } |\xi - \xi_i^l| \leq \frac{\xi_0^l}{2}, |\theta - \theta_i^l| \leq \frac{\theta_0^l}{2} \text{ и } (A_0^l + w_i) > 0. \end{cases}$$

$$\tau'_R = f q'_R. \tag{6}$$

Здесь $\xi_1 = L_1/R$ и θ_1 – безразмерные осевая и окружная координаты планок амортизаторов; $\xi_0^l = l_0/R$ и θ_0^l – относительные размеры планки; $A_0^l = \Delta_0 \cos \theta_l$ – поджатие амортизатора при перемещении обоймы пояса относительно оболочки как жесткого целого на величину Δ_0 ; w_l – радиальный прогиб оболочки под центром амортизатора (положительный в направлении внутренней нормали к поверхности оболочки); $\Delta_l = A_0^l + w_l$ – полное поджатие амортизатора; z'_R – сила реакции амортизатора, зависит от поджатия Δ_l , и определяется по экспериментальной характеристике на рис. 2а; f – коэффициент трения скольжения, который считается не зависящим от скорости скольжения.

Полная суммарная реакция, действующая на оболочку в поперечном направлении, равна:

$$z_R = \sum_{l=1}^{l_c} z'_R(\Delta_l) \cos \theta_l = \sum_{l=1}^{l_c} q'_R \xi_0^l \theta_0^l R^2 \cos \theta_l, \tag{7}$$

где l_c – количество амортизаторов, находящихся в контакте с оболочкой, при $\Delta_l > 0$.

Уравнения равновесия (1) для оболочки с учетом контактной нагрузки можно записать в матричной форме следующим образом:

$$\mathbf{LW} = [\mathbf{Z}_H - \mathbf{L}_c \mathbf{Q}_c (\Delta_0 + \mathbf{W})] R^2; \tag{8}$$

$\mathbf{Q}_c = (\tau_{Rx}, \tau_{Ry}, q_R)$ – вектор контактных нагрузок на оболочку со стороны пояса, нелинейным образом зависящий от перемещений оболочки и уровня внешнего воздействия $z_{RЭ}$ на пояс; \mathbf{L}_c – оператор, характеризующий эту зависимость.

Алгоритм решения задачи построен в следующей последовательности:

а) пусть задан вектор внешних нагрузок \mathbf{Z}_H и уровень внешнего воздействия на пояс амортизации $z_{RЭ}$ (его полная суммарная реакция). В начальном приближении уравнения (8) решаются при косинусоидальном распределении поперечной нагрузки без учета её контактного характера:

$$\mathbf{W}_0 = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{Z}_H R^2;$$

б) при заданной суммарной реакции $z_{RЭ}$, считая оболочку абсолютно жесткой, определим смещение пояса на первом шаге Δ_{01} , пробную зону контакта l_{c1} и контактную реакцию на каждом амортизаторе (z'_R). Для этого, при начальном смещении пояса Δ_{01} , определяем поджатие амортизаторов $A_{01}^l = \Delta_{01} \cos \theta_l$. Проверив для каждого из них контактные условия (6), находим по жесткостной характеристике (рис. 2а) действующие усилия (z'_R)₁, количество амортизаторов, находящихся в контакте с оболочкой l_{c1} и суммарную реакцию z_{R1} по формуле (7). Эта процедура повторяется при последовательном увеличении смещения пояса с некоторым шагом $\delta \Delta_0 \approx 0,05 \Delta_0$ до тех пор, пока на очередном шаге $(k+1)$ значение $(z_R)_{k+1}$ не превысит $z_{RЭ}$. Затем значения Δ_l , z'_R и l_c уточняются, например, методом половинного деления шага $\delta \Delta_0$;

в) для определения вектора перемещений из уравнения (8) и корректировки контактной нагрузки с учетом этих перемещений формируется итерационный процесс:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{W}_1 &= \mathbf{L}^{-1} [\mathbf{Z}_H - \mathbf{L}_c \mathbf{Q}_c (\Delta_0^1 + \mathbf{W}_0)], \\
 \mathbf{W}_{i+1} &= \mathbf{L}^{-1} [\mathbf{Z}_H - \mathbf{L}_c \mathbf{Q}_c (\Delta_0^i + \mathbf{W}_i)].
 \end{aligned} \tag{9}$$

На каждой итерации (9) проводится проверка всех возможных зон контакта по условиям (6) и определение контактной реакции амортизаторов z'_R в этих зонах по жесткостной характеристике рис. 2а. Итерации прекращаются по условию:

$$\frac{|W_{i+1} - W_i|}{|W_i|} < \varepsilon, \quad \varepsilon - \text{заданная точность вычислений};$$

г) так как реакция пояса амортизации зависит нелинейно от смещений системы, то ее значение z_{R1} , вычисленное с учетом деформаций оболочки на первом шаге расчета, будет отличаться от заданного $z_{RЭ}$. Определив невязку $\delta_{z1} = z_{RЭ} - z_{R1}$, по ее величине и знаку можно судить, в какой степени «перегружена» или «недогружена» оболочка нагрузкой первого шага. С учетом вычисленной невязки найдем нагрузку следующего шага $z_{R1} = z_{RЭ} + \delta_{z1}$, и, повторяя вычисления с пункта (б), получим новые значения компонент вектора перемещения W_2 и реакции z_{R2} . Вычисления повторяются до тех пор, пока невязка по суммарной контактной реакции на очередном шаге не станет меньше принятой точности вычисления нагрузки.

В реальных условиях касательные компоненты контактного взаимодействия τ_R значительно меньше радиальной составляющей q_R и ими можно пренебречь. Тогда коэффициенты разложения в ряд Фурье контактной нагрузки (6):

$$q_R = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} q_{mn} \sin m \bar{\xi} \cos n \theta, \quad \left(\bar{m} = \frac{m \pi R}{L} \right),$$

имеют следующий вид:

$$q_{mn} = \frac{2}{n} \sin \left(n \frac{\theta_0'}{2} \right) A(\bar{m}) \sum_{i=1}^{l_c} q_R^i \cos n \theta_i,$$

$$q_{m0} = \frac{\theta_0'}{2} A(\bar{m}) \sum_{i=1}^{l_c} q_R^i, \quad A(\bar{m}) = \frac{4}{\pi^2 m} \sin m \bar{\xi}_1 \sin m \frac{\xi_1'}{2},$$

где l_c - количество планок (амортизаторов), находящихся в контакте с оболочкой на данном шаге итерации.

Программный выход из циклов суммирования вычисления рядов контактной нагрузки, а также перемещений и напряжений оболочки ($w, u, v, \sigma_1, \sigma_2$) осуществляется при достижении заданной точности (обычно 0,01) при сравнении суммы десяти членов остатка ряда с величиной уже накопленной суммы.

Для подтверждения достоверности расчетной модели проведены испытания вафельной оболочки с продольно-поперечным набором ребер прямоугольного сечения. Модуль упругости сплава $E = 4,5 \times 10^4$ МПа; $\nu = 0,3$. Геометрические параметры оболочки и ребер: $R/h = 575$; $L/R = 1,4$; $\psi = 1 + h_p/h = 6,5$; $h_1 = h_2 = h_p$; $\varphi_1 = 2\pi s/a = 0,396$; $\varphi_2 = 2\pi c/b = 0,476$. Нижний торцевой шпангоут оболочки жестко закреплён на плите испытательного стенда. Осевая сжимающая сила N_1 передавалась на верхний шпангоут через жесткую крышку. Поперечная нагрузка $z_{RЭ}$ прикладывали посередине оболочки ($L_1 = 836$ мм) при поперечном смещении обоймы пояса. Амортизирующие элементы закреплены в обойме с равномерным шагом 9° . Размеры контактных планок амортизаторов $\zeta_0 R \times \theta_0 R = 110 \times 125$ мм. Перемещения оболочки и обоймы пояса измерялись датчиками с погрешностью 6%.

На рис. 2 показано поле разброса силовой характеристики амортизаторов (а) и распределение расчетных контактных усилий по оболочке (б) в окружном направлении. Здесь же, для сравнения, пунктиром и точечной линией приведено косинусоидальное и равномерное распределение усилий на амортизаторах при одинаковой равнодействующей реакции пояса $z_{RЭ}$. Видно, что распределение контактной нагрузки в сечении оболочки по косинусоидальному закону, обычно принимаемому в расчетах [17], допустимо лишь на низких уровнях нагружения.

Экспериментальные значения перемещения оболочки в среднем её сечении (под серединой пояса) сравниваются с расчетными на рис. 3.

Экспериментальные значения перемещения оболочки в среднем её сечении (под серединой пояса) сравниваются с расчетными на рис. 3.

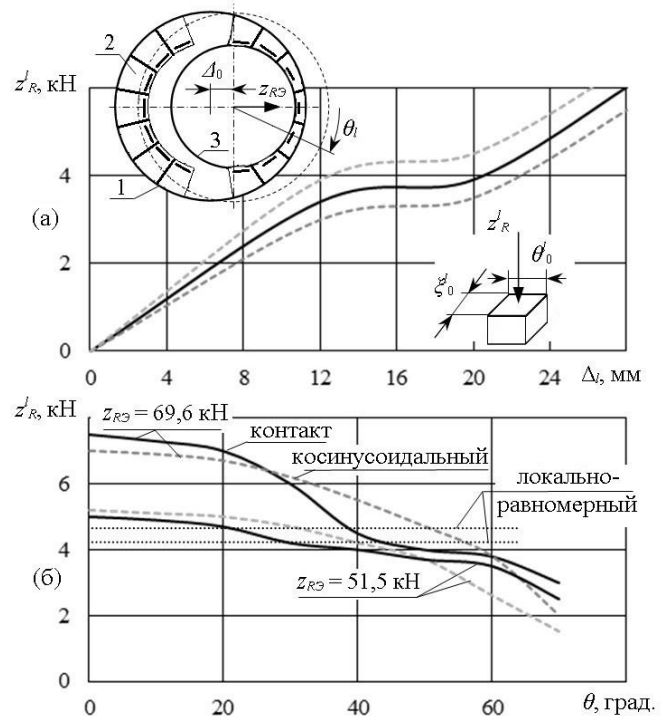


Рис. 2. Силовая характеристика амортизаторов (а) и распределение контактной нагрузки в поперечном сечении оболочки (б): 1 – обойма пояса; 2 – амортизаторы; 3 – оболочка

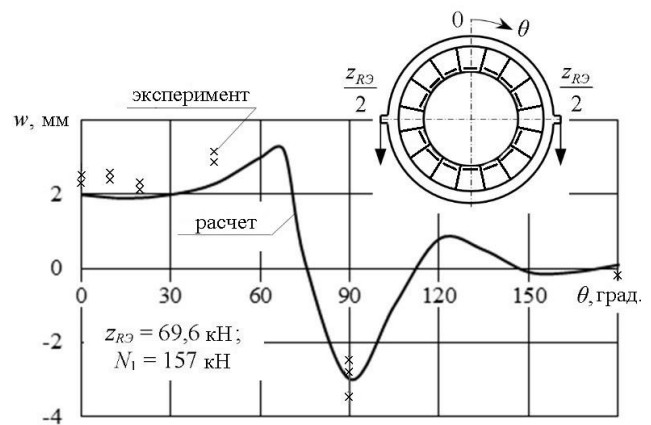


Рис. 3. Радиальный прогиб поперечного сечения оболочки под серединой пояса амортизации

Совпадение расчетного прогиба w в поперечном сечении оболочки на рис. 3 с результатами испытаний подтверждает адекватность принятой расчетной модели.

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Для оценки устойчивости упругого деформирования состояния оболочки используется система уравнений нейтрального равновесия [18]:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{11}}{\Omega_0} \frac{d^4 F}{d\xi^4} + \left(\frac{1}{C_{66}} - 2 \frac{C_{12}}{\Omega_0} \right) \frac{d^4 F}{d\xi^2 d\theta^2} + \\ & + \frac{C_{22}}{\Omega_0} \frac{d^4 F}{d\theta^4} + R \frac{d^2 w}{d\xi^2} + L(w_0, w) = 0; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{R^2} \left[D_{11} \frac{d^4 w}{d\xi^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{d^4 w}{d\xi^2 d\theta^2} + D_{22} \left(\frac{d^4}{d\theta^4} + \right. \right. \\ & \left. \left. + 2 \frac{d^2}{d\theta^2} + 1 \right) w \right] - \frac{1}{R} \frac{d^2 F}{d\xi^2} - \frac{1}{R^2} L(w_0, F) - Q = 0. \end{aligned}$$

Здесь $\Omega_0 = C_{11}C_{22} - C_{12}^2$; $L(x_0, x) = \frac{d^2 x_0}{d\xi^2} \frac{d^2 x}{d\theta^2} + \frac{d^2 x_0}{d\theta^2} \frac{d^2 x}{d\xi^2} -$

$$-2 \frac{d^2 x_0}{d\xi d\theta} \frac{d^2 x}{d\xi d\theta} \text{ при } (x_0, x) \rightarrow (w_0, w) \vee (w_0, F);$$

$$Q = N_{11}^0 \frac{d^2 w}{d\xi^2} + N_{22}^0 \left(\frac{d^2 w}{d\theta^2} + w \right) + 2N_{12}^0 \frac{d^2 w}{d\xi d\theta};$$

w_0 ; N_{11}^0 ; N_{22}^0 и N_{12}^0 – прогиб и внутренние усилия упруго-докритического состояния оболочки; w и F – функции прогиба и внутренних усилий для оболочки в момент потери устойчивости. При этом усилия выражены соотношениями:

$$N_{11} = \frac{1}{R^2} \frac{d^2 F}{d\theta^2}; \quad N_{22} = \frac{1}{R^2} \frac{d^2 F}{d\xi^2}; \quad N_{12} = -\frac{1}{R^2} \frac{d^2 F}{d\xi d\theta}.$$

Считая оболочку в момент потери устойчивости шарнирно опертой, решение системы уравнений (10) определяем в виде:

$$\begin{aligned} w &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} w_{ij} \sin(\tau\xi) \cos(j\theta); \quad F = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} F_{ij} \sin(\tau\xi) \cos(j\theta), \\ \left(\tau = \frac{i\pi R}{L} \right). \quad i &= 1, 2, 3, \dots, j = 0, 1, 2, \dots - \text{волновые параметры} \end{aligned} \quad (11)$$

Решая уравнения (10) методом Бубнова-Галеркина и исключая неизвестные F_{ij} получим систему однородных алгебраических уравнений относительно w_{ij} :

$$\begin{aligned} & A_{k,p} w_{k,p} + \sum_{i=1}^{\infty} w_{i,p} \left[\bar{Q} \beta_{i,p}^0 + \bar{Q}^2 (\gamma_{i,p}^0 + \gamma_{i,p}) \right] + \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [w_{i,p+n} (\bar{Q} \beta_{i,p+n} + \bar{Q}^2 \gamma_{i,p+n}) + \\ & + w_{i,p-n} (\bar{Q} \beta_{i,p-n} + \bar{Q}^2 \gamma_{i,p-n})] + \\ & + w_{i,p+2n} \bar{Q}^2 \gamma_{i,p+2n} + w_{i,p-2n} \bar{Q}^2 \gamma_{i,p-2n} = 0, \\ & k = 1, 2, 3, \dots; p = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $A_{k,p} = S_4(\bar{k}, p) + \frac{\bar{k}^4}{S(\bar{k}, p)}$; $\bar{k} = \frac{k\pi R}{L}$;

$$\bar{Q} = \frac{q_0 R}{\pi C_{11}}; \beta_{i,p}^0 = b_1 p^2 \sum_{m=1}^{\infty} f_{m,0} q_{m,0} \bar{m}^2 d_1 f_0;$$

$$\beta_{i,p\pm n}^0 = b_2 \sum_{m=1}^{\infty} f_{m,n} q_{m,n} \Phi(\pm n) f_1(\pm n);$$

$$\gamma_{i,p}^0 = b_3 p^2 \sum_{m=1}^{\infty} f_{m,0} q_{m,0} \bar{m}^2 d_1 (2\Psi_0 + \Psi_{p+n} + \Psi_{p-n}); \quad (13)$$

$$\gamma_{i,p} = b_4 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} f_{m,n} q_{m,n} [\Phi(-n)\Psi_{p+n} + \Phi(+n)\Psi_{p-n}];$$

$$\gamma_{i,p\pm n} = b_5 \sum_{m=1}^{\infty} f_{m,n} q_{m,n} \Phi(\pm n) \Psi_0;$$

$$\gamma_{i,p\pm 2n} = b_6 \sum_{m=1}^{\infty} f_{m,n} q_{m,n} \Phi(\pm 2n) \Psi_{p\pm n},$$

где $f_0 = \frac{\bar{k}^2}{S(\bar{k}, p)} - \frac{1}{p^2 \bar{m}^2 \Delta_{33}^0} [p^2 S_2(\bar{m}, 0) + \tau^2 S_1(\bar{m}, 0)] + \frac{\tau^2}{S(\tau, p)}$;

$$f_1(\pm n) = \frac{\bar{k}^2}{S(\bar{k}, p)} - \frac{f_2(\pm n)}{\Phi(\pm n) \Delta_{33}} + \frac{\tau^2}{S(\tau, p \pm n)};$$

$$f_2(\pm n) = [(p+n)^2 S_2(\bar{m}, n) + \tau^2 S_1(\bar{m}, n)] d_1 \mp \mp 2\tau(p \pm n) S_3(\bar{m}, n) d_2;$$

$$\Phi(\pm x) = [(p \pm x) \bar{m}^2 + n^2 \tau^2] d_1 \pm 2\bar{m}n\tau(p \pm x) d_2,$$

при значениях $x = 0, n, 2n$;

$$\Psi_0 = p^2 \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{m^2}{S(\tau, p)} f_{m,0} q_{m,0} d_1;$$

$$\Psi_{p\pm n} = \sum_{i=\bar{m}=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi}{S(\tau, p)} f_{m,n} q_{m,n}; \quad f_{m,0} = \frac{\Delta_{33}^0}{\Delta^0}; \quad f_{m,n} = \frac{\Delta_{33}}{\Delta};$$

$$d_1 = [(-1)^{k+m+i} - 1] [(k-m-i)^{-1} + (k+m+i)^{-1} - (k-m+i)^{-1} - (k+m-i)^{-1}];$$

$$d_2 = [(-1)^{k+m+i} - 1] [(k-m-i)^{-1} + (k+m+i)^{-1} + (k-m+i)^{-1} + (k+m-i)^{-1}];$$

$$S(x_1, x_2) = \frac{1}{\delta_1 - \delta_2^2} \left[x_1^4 + \left(\frac{\delta_1 - \delta_2^2}{\delta_3} - 2\delta_2 \right) x_1^2 x_2^2 + \delta_1 x_2^4 \right],$$

при $(x_1, x_2) = (\bar{k}, p) \vee (\tau, p) \vee (\tau, p \pm n)$;

$$S_1(\bar{m}, n) = \delta_2 (\bar{m} \Delta_{32} - \Delta_{33}) - \bar{m} \Delta_{31} - \omega_1 \bar{m}^2 \Delta_{33};$$

$$S_2(\bar{m}, n) = \delta_1 (n \Delta_{32} - \Delta_{33}) - \delta_2 \bar{m} \Delta_{31} - \omega (1 - n^2) \Delta_{33};$$

$$S_3(\bar{m}, n) = \delta_3 (\bar{m} \Delta_{32} - n \Delta_{33}) + \omega_4 (2\bar{m}n \Delta_{33} - n \Delta_{31} - \bar{m} \Delta_{32});$$

$$S_4(\bar{k}, p) = \omega_1 \bar{k}^4 + 2(\omega_3 + 2\omega_4) \bar{k}^2 p^2 + \omega_2 (p^2 - 1)^2;$$

$$b_1 = 0,5; b_2 = 0,25; b_3 = b_5 = 0,125; b_4 = b_6 = 0,0625.$$

$\Delta, \Delta_{31}, \Delta_{32}, \Delta_{33}$ – определитель и миноры, составленные из коэффициентов (4).

Таким образом, задача свелась к отысканию минимального значения собственного параметра \bar{Q} однородной системы алгебраических уравнений (12).

Условием существования нетривиального решения системы (12) является выполнение равенства

$$\det[\lambda^2 \mathbf{A}^{(k,p)} + \lambda \mathbf{B}^{(k,p)} + \mathbf{C}^{(k,p)}] = 0, \quad (14)$$

где $\lambda = 1/\bar{Q}$; $\mathbf{A}^{(k,p)} = \{A_{k,p}\}$ – диагональная матрица, а $\mathbf{B}^{(k,p)} = \{\beta_{ij}\}$ и $\mathbf{C}^{(k,p)} = \{\gamma_{ij}\}$ – матрицы, составленные из коэффициентов (13) системы (12). Критический параметр нагрузки \bar{Q}^* , находится как величина, обратная наибольшему корню λ^* характеристического уравнения (14). Собственный вектор $\{w_{ij}\}$, соответствующий этому значению,

определяет закритическую конфигурацию срединной поверхности оболочки.

При численном решении уравнений (12) рассматривались матрицы конечного порядка, который увеличивался до тех пор, пока значение λ^* не стабилизировалось в пределах заданной точности. На каждом таком шаге λ^* и соответствующий ему собственный вектор $\{w_{ij}\}$ определялись методом степенных итераций и проверялись по смене знака определителя (14).

Алгоритм уточнения критического значения нагрузки с учетом её контактного характера аналогичен представленному выше при решении уравнений деформирования (8). При этом значение нагрузки z_{R0} не задается, а определяется как критическое значение $z_{R\text{кр}}$ из решения задачи устойчивости (12).

СРАВНЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК С ИЗВЕСТНЫМИ ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Для подтверждения адекватности расчетной модели представлено сравнение критической нагрузки с известными по литературе экспериментальными и теоретическими данными. Таких данных опубликовано относительно немного. Авторы отмечают техническую сложность имитации неосесимметричных нагрузок при испытаниях конструкции.

Решения методом конечных разностей геометрически нелинейной задачи, а также задачи устойчивости нелинейного докритического состояния оболочки для частного случая локально-равномерно нагрузки – полосового нагружения – представлены в работах [9, 10]. Сравним эти решения с нашими результатами расчета критических нагрузок с учетом моментности докритического состояния оболочки по линейной теории (12). Это сравнение тем более интересно, что решения получены различными методами и могут быть сопоставлены с известными экспериментальными данными. [10, 21].

На рис. 4 показано изменение критического несимметричного давления q^* и относительного параметра критического давления $k_0 = q^* / q_0^*$ в зависимости от углового размера площадки нагружения θ_0 .

Здесь q_0^* – критическое значение осесимметричного бокового давления. Кривые КЛ получены из расчета критических нагрузок в рамках классического подхода Эйлера, кривые Л – при линейном докритическом состоянии (12), кривые НЛ – при нелинейном докритическом состоянии [20], Н – предельные нагрузки из решения геометрически нелинейной задачи [19]. Теоретические расчеты сравниваются с экспериментальными данными из работы [10, 13, 21]. Сопоставление показывает, что критические значения нагрузок, определенные из решения линеаризованных уравнений (12) при линейном докритическом состоянии, расположены ниже предельных (НЛ и Н) и отражают все качественные особенности зависимости этих нагрузок от размеров оболочки и ширины площадки нагружения. В тоже время, это решение вполне приемлемо для расчетной практики, так как представляет собой нижнюю оценку известных экспериментальных данных и гораздо проще по сравнению с нелинейным. Более того, в проектировочных расчетах оказывается вполне возможным использовать упрощенное решение линеаризованных уравнений (10) без учета докритического прогиба в урав-

нении совместности деформации. Тогда задача становится линейной относительно критической нагрузки, как собственного параметра матрицы системы. Нагрузки этого упрощенного решения приведены на рис. 4 штриховыми линиями.

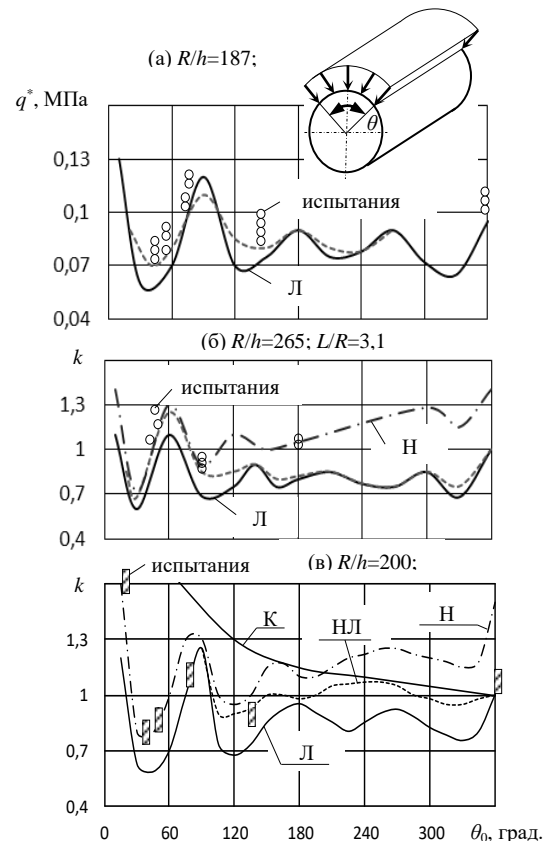


Рис. 4. Сравнение полученного решения (12) с известными экспериментальными [10, 21] и теоретическими [19, 20] данными

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При поперечном нагружении оболочек корпуса поясом амортизации характер распределения контактных усилий по амортизаторам зависит от уровня внешнего воздействия и соотношения жесткостных параметров оболочки и пояса. В известных расчетных моделях распределение давления на оболочку со стороны пояса в поперечном ее сечении задавалось косинусоидальным. Действительное распределение контактной реакции пояса оказывается промежуточным между косинусоидальным и равномерным распределением.

При оценке деформирования оболочек корпуса под действием реакции пояса амортизации следует учитывать, что на эксплуатационных уровнях нагружения максимальные перемещения и напряжения у оболочки действуют вне зоны контакта её с амортизаторами.

Хорошее совпадение расчета с экспериментом подтверждает достоверность полученных результатов и предложенного алгоритма последовательных приближений для учета нелинейной зависимости реакции пояса амортизации от смещений конструкции.

Впервые представлена расчетная модель задачи устойчивости деформированного состояния цилиндрической

оболочки с учетом особенностей контактного взаимодействия её с нелинейным упругим основанием на части боковой поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колюхов С.Н. Минометный старт межконтинентальных баллистических ракет / С.Н. Колюхов, П.П. Логачёв // Днепрпетровск: НАН, НКА Украины, Институт технической механики, ГКБ «Южное». – 1997. – 211 с.
2. Даревский В.М. Контактные задачи теории оболочек // В кн.: Труды 6 Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин. – Баку: Наука, 1966. – С. 927-934.
3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
4. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. – М.: Наука, 1984. – 232 с.
5. Емельянов И.Г., Кузнецов В.Ю. Решение контактных задач для цилиндрических оболочечных конструкций с учетом тангенциальных усилий // Пробл. машиностроения и надежности машин. – 2000. – № 1. – С. 59-64.
6. Моссаковский В.И. Контактные задачи теории оболочек и стержней. / В.И. Моссаковский, В.С. Гудрамович, Е.М. Макеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 247 с.
7. Муштари Х.М. Об устойчивости цилиндрической оболочки под действием неравномерных нагрузок. // В сб.: Труды физико-технического института. – Казань, 1954, – вып. I, – С.77-103.
8. Almroth B.V. Buckling of a cylindrical shell subjected to nonuniform external pressure // Trans. ASME. Ser. E. E. 1962. V. 29, N 4. – P. 675-682.
9. Андреев Л.В., Ободан Н.И. Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрической оболочки под действием неравномерного давления. // В кн.: Труды 6 Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластинок. – М.: 1966, – С. 74-76.
10. Андреев Л.В., Моссаковский В.И., Ободан Н.И., Об устойчивости цилиндрической оболочки при произвольном внешнем давлении. // В кн.: Труды 7 Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластинок. – М., 1970, – С. 629-633.
11. Кабанов В.В., Курцевич Г.И., Михайлов В.Д. Предельное состояние и устойчивость цилиндрической оболочки при неоднородном неосесимметричном внешнем давлении // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1978. – № 4. – С. 129-134.
12. Кабанов В.В. Исследование нелинейного деформирования и устойчивости цилиндрических оболочек при неосесимметричном давлении методом конечных элементов / В.В. Кабанов, Л.П. Железнов. // Прикладная механика. – 1981. – Т. 17. № 5. – С. 71–76.
13. Андреев Л.В. Устойчивость оболочек при неосесимметричной деформации / Л.В. Андреев, Н.И. Ободан, А.Г. Лебедев. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
14. Коломоец А.А. Устойчивость равновесных состояний цилиндрической оболочки при действии неравномерного внешнего давления / А.А. Коломоец, А.С. Модин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – № 1. – С. 13-17.
15. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление полимерных и композитных материалов. – Рига: Зинатне, 1980. – 572 с.
16. Амбацурмян С.А. Общая теория анизотропных оболочек. – М.: Наука, 1974. – 448 с.
17. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1994 – 382 с.
18. Григолок Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. – М.: Наука, 1978. – 360 с.
19. Кабанов В.В., Михайлов В.Д. Предельное состояние цилиндрической оболочки при неоднородном внешнем давлении // Изв. Вуз. Авиационная техника, – 1979, – №2. С. 27-31.
20. Кабанов В.В., Михайлов В.Д. Алгоритм исследования нелинейного деформирования и устойчивости цилиндрической оболочки при неосесимметричном нагружении – В кн.: Расчет элементов конструкций летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. – С. 55 – 64.
21. Кудинов А.Н. Результаты экспериментов по устойчивости оболочек при неравномерном внешнем давлении // В сб.: Труды НИИ прикладной математики и механики. – Томск: 1974, – Т. 4, – С. 150-154.

Deformation and Stability of Cylindrical Shells under Irregular Radial Loading

Makhnovich S.V., Permyakov D.A., Khishchenko Yu.M.

South Ural State University
Chelyabinsk, Russia
makhnovichsv@susu.ru

Abstract. The article considers a non-axisymmetric deformation and stability of compressed aircraft shell. Particular attention is paid to modeling contact interaction of shells with transverse shock-absorbing belts. To analyze shell deformations, we used the iteration method, taking into account a nonlinear change in the reaction of the shock-absorbing belt when there are structure displacements. The shell stability equations were discretized by the Bubnov-Galerkin method using Fourier series.

The developed model was used to study the deformation mode of constructively and technologically orthotropic shells exposed to local loads of shockabsorbing belts. The simulation models were verified with the results of testing model and actual shells.

Keywords: orthotropic shell, irregular loading, bearing pressures, asymmetric deformation, shell stability, comparison with an experiment.

Направление техперевооружения сельхозпроизводства путём перевода тракторов и сельхозмашин на электротягу

Сошинов А.Г., Галушак В.С.

Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО ВолгГТУ

Камышин, Россия

epp@kti.ru, turistu1@mail.ru

Аннотация. Актуальными проблемами дальнейшего развития отечественного агропромышленного комплекса является снижение издержек производства, в частности, снижения затрат сельхозпроизводителей на горюче-смазочные материалы. В настоящей статье высказано предложение постепенного отказа от применения в сельском хозяйстве двигателей внутреннего сгорания, использующих бензин и дизтопливо, путём перевода автомобилей, тракторов и комбайнов на электротягу. Приведены примеры современных и перспективных электромобилей, электротракторов и электрокомбайнов с бортовым запасом электроэнергии, предназначенных для работы в сельском хозяйстве. Расчётным путём на примере усреднённого сельхозпредприятия показана экономическая целесообразность вытеснения органического топлива электроэнергией, при этом в существующих ценовых пропорциях достигается значительный экономический эффект.

Ключевые слова: сельхозпроизводство, электромобили, электротрактора, электрокомбайны, топливо, электроэнергия, экономический эффект.

ВВЕДЕНИЕ

Правильно выбранное стратегическое направление развития любого производства определяет всё его последующее развитие, так как закладывает совершенно определённые затраты сил и средств, а также общий финансовый успех. В последние годы мы наблюдаем успешное развитие сельского хозяйства в нашей стране, которое из некогда отсталой отрасли постепенно становится локомотивом развития российской экономики. И как всякая динамично развивающаяся отрасль, современное сельхозпроизводство осуществляет поиск новых технологий, новых решений своих возникающих производственных проблем. Одним из перспективных направлений развития сельхозпроизводства, в нашей стране, да и в мире, на наш взгляд, является использование новейших достижений в области безрельсового электротранспорта работающего на бортовом запасе электроэнергии. А достижения двух последних лет в этой области впечатляющие. В конце 2017 года известный миллиардер и талантливый американский изобретатель Илон Маск продемонстрировал мировой общественности свою последнюю разработку в области электротранспорта, грузовой электромобиль-фуру «TESLA-Semeni» грузоподъемностью 36 тон (рис.1) [1].



Рис. 1. TESLA-Semeni

По заявлению разработчика «TESLA-Semeni» имеет дальность хода с полной загрузкой при одной зарядке аккумуляторов 800 км (!). При этом по динамическим характеристикам этот электромобиль превосходит аналогичные грузовики с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Кроме того электрофура легче своих аналогов и менее материалоемка. Тонно-километр перевозки груза на ней дешевле на 20% , чем на грузовиках с ДВС. Демонстрация этой фуры практически показала, что этап создания коммерческого грузового электромобиля успешно завершен, далее встают только задачи его массового производства.

Одним из недостатков электротранспорта с бортовым запасом электроэнергии противники развития этого направления называют большой вес аккумулирующей системы и длительность заряда аккумуляторов. Что касается весовых характеристик, то авторами на своих разработках электротранспорта показано, что применение Li-Ion аккумуляторных батарей позволило достичь показателей соотношения масса аккумуляторов/ масса электротранспорта - 3-5% , что сравнимо с таким соотношением для автомобиля с ДВС, имеющего бак с запасом топлива, топливный насос, фильтры, карбюратор или форсунки, трубопроводы [2,3]. В отношении другого недостатка, длительности заряда аккумуляторов - он устранён техническим прогрессом в разработках новых аккумуляторов. Так по сообщениям испанской фирмы «Graphenano» ими создан литий-полимерный аккумулятор, имеющий короткое время заряда – 7-8 минут, что практически совпадает со временем заправки обычного

автомобиля топливом. Ряд автопроизводителей Европы уже приступили к ходовым испытаниям полимер-графеновых аккумуляторов [4].

Из сказанного выше, следует, что основополагающие технические вопросы создания электромобиля с бортовым запасом электроэнергии успешно решены.

Цель настоящей статьи - показать, что наступило время отказа от применения ДВС в сельхозпроизводстве, как устаревшей технологии, и перейти на электротягу, реконструировав трактора, комбайны, другие сельхозмашины и автомобили сельхозпредприятий.

Работы по использованию электропривода в качестве тяговых устройств и электротракторов в земледелии проводились сразу же с началом повсеместного применения электричества [5,6,7]. Сейчас, на наш взгляд, необходимо вернуться к этому направлению на новом техническом уровне, с учётом последних достижений в развитии безрельсового электротранспорта. Что для этого уже есть?

ТРАКТОРА

Трактор класса 25-40. Как это ни парадоксально, но в Советском Союзе, а затем и в России длительно (1957–2013 г.г.) выпускался мощный электротрактор. Речь идёт о единственном в мире гусеничном дизель-электрическом тракторе ДЭТ-250 М2 Челябинского тракторного завода (рис. 2) [8]. Трактор имел электромеханическую трансмиссию состоящую из 12-цилиндрового V-образного дизеля В-31М2 (доработка танкового двигателя В-2) мощностью 238 кВт, коллекторного генератора смешанного возбуждения ГПА-222, мощностью 222 кВт и тягового коллекторного электродвигателя, независимого возбуждения, мощностью 196 кВт, массу 31 тонну и развивал тяговое усилие на крюке 250 кН. Необходимо заметить, что сельскохозяйственный трактор общего назначения трактор К-744 имеет тяговое усилие 80 кН.



Рис. 2. Дизель электрический трактор ДЭТ-250 М2

Модернизация трактора ДЭТ-250 М2 (или более современного ДТЭ-400) для целей земледелия должна состоять в снятии с него дизельного двигателя и силового генератора и установку на их место аккумулятора, ёмкостью в электрической форме замещающую 850 литровой бак трактора, заполненный топливом. При удельном расходе топлива 220 г/кВт·ч, эквивалентный объём запасённой

энергии в аккумуляторе должен составлять 3300 кВт·ч, при номинальном напряжении 310 В. Стационарные аккумуляторные батареи таких параметров давно используются в электроэнергетике. Технический прогресс позволяет прогнозировать появление в ближайшее время аккумуляторов требуемых параметров и в мобильном исполнении.

Трактор класса 1,4-1,5. К тракторам такого класса относятся тракторы МТЗ-80/82 с дизельным двигателем Д-243, ЮМЗ-6 с дизельным двигателем Д-65М, Беларусь-800/820 с дизельным двигателем Д-243.

В конце июня 2011 года компания MOBEL (г. Москва) представила общественности первый российский электротрактор с бортовым запасом электроэнергии, разработанные на основе популярной модели трактора «Беларусь-920» (МТЗ-920). Электротрактор, имеет электродвигатель мощностью 60 кВт и аккумуляторную батарею ёмкостью 56 кВт·ч, при номинальном напряжении 300В [9]. Предполагалось выпускать этот трактор в г. Пермь на площадке предприятия ЗАО «Электротехническая компания». По своим характеристикам этот электротрактор относится к тяговому классу 1,4. Смонтированная система накопления энергии и электромеханическая трансмиссия обеспечивала работу трактора в течение 4 часов. Таким образом, представленный трактор вполне работоспособен в сельхозпроизводстве, но требуется дальнейшее повышение ёмкости аккумулятора до уровня 500 кВт·ч, что соответствует запасу полностью заправленного топливного бака ёмкостью 135л. Близкий по своим характеристикам электротрактор «EDISON» планируется к выпуску на тракторном заводе в г. Харькове (Украина).

Интенсивные работы по созданию электротракторов ведутся также за рубежом. Так крупнейший производитель сельхозтехники John Deere представил электрический трактор класса 3 «SEKAM» (рис.3) [10]



Рис. 3. Электротрактор «SEKAM» фирмы John Deere

Трактор «SEKAM» имеет два электродвигателя мощностью по 150 кВт каждый, аккумуляторную батарею ёмкостью 130 кВт·ч, обеспечивающей ему время работы 4 часа. При этом время заряда батарей составляет около 4-х часов. Очевидно, что требуется дальнейшее увеличение ёмкости аккумулятора и сокращение время заряда, что может быть достигнуто применением полимер-графеновых аккумуляторов.

ЗЕРНОУБОРОЧНЫЕ КОМБАЙНЫ

Компания «Агромашхолдинг» представила на выставке

«АгроТек Россия 2010» первый в мире комбайн с электроприводом на все его рабочие части. Его производительность превышает показатель базовой модели на 20%. Комбайн «АГРОМАШ-Енисей 4000 Э» создан конструкторами ОАО «Красноярский ПКТИ комбайностроения» и планировался к производству на специализированных производственных площадках машиностроительно-индустриального холдинга «Концерн «Тракторные заводы». За основу взята базовая модель «Енисей-4000» производства Красноярского завода комбайнов, каждая рабочая часть, которой была оснащена отдельным электроприводом (рис.4) [11].



Рис. 4. База электрического зерноуборочного комбайна «Агромаш-Енисей-4000Э»

И хотя это новейшие разработки, но не всё ещё понятно как и что делать. Но если произойдёт техническая реализация этих идей – ГСМ уйдут из села за ненадобностью.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Выполним расчетные оценки перспективы техпереворужения усреднённого сельхозпредприятия в действующих ценах на моторное топливо и электроэнергию.

Состав машинотракторного парка расчётного сельхозпредприятия

Автомобили [12,13,14]:

КАМАЗ (мощность 240 л.с./ 176 кВт)-2 шт;

ГАЗ 52 (бензовоз) (мощность 115 л.с./85 кВт)-1шт;

ГАЗ 3307 (бортовой) (мощность 120 л.с./ 88 кВт)-6 шт;

Трактора[15,16,17]:

КИРОВЕЦ 744Р (мощность 300 л.с./220 кВт)-9 шт;

ДТ 75 (мощность 170 л.с./ 67 кВт)-9 шт;

МТЗ 82.1«Беларусь» 90 л.с./ 55 кВт)-9 шт;

Комбайны[18]:

Дон -1500Б (мощность 300 л.с./ 220 кВт)-9 шт.

Суммарная мощность двигателей МТС «Расчётное» 6023 кВт \approx 6 МВт.

Исходными данными для расчёта энергозатрат является состав автомобильного и тракторного парка предприятия, основными показателями которого являются: тип транспортного средства, мощность его двигателя, удельный расход топлива на киловатт час выработанной энергии и число часов работы машины в году.

Присвоим соответствующие обозначения названным показателям.

1. Количество грузовых автомобилей предприятия обозначим N_z ; мощность двигателя грузового автомобиля обозначим P_z ; удельный расход топлива двигателем грузового автомобиля обозначим G_z ; годовое число работы грузового автомобиля обозначим T_z .

2. Количество тракторов предприятия обозначим N_m ; мощность двигателя трактора P_m ; удельный расход топлива двигателем трактора обозначим G_m ; годовое число

работы трактора обозначим T_m .

3. Количество комбайнов предприятия обозначим N_k ; мощность двигателя комбайна P_k ; удельный расход топлива двигателем комбайна обозначим G_k ; годовое число работы комбайна обозначим T_k .

Общий объём энергии, вырабатываемой двигателями грузовых автомобилей предприятия \mathcal{E}_z , определяется по выражению (1).

$$\mathcal{E}_z = N_z \cdot P_z \cdot T_z \quad (1)$$

где \mathcal{E}_z -общая энергия, выработанная двигателями грузовых автомобилей предприятия, кВт·час,

N_z -количество грузовых машин, шт,

P_z -мощность двигателя грузовой машины, кВт,

T_z -общегодое время работы двигателя грузовой машины, час.

Общий объём энергии, вырабатываемой двигателями тракторов предприятия \mathcal{E}_m , определяется по выражению

$$\mathcal{E}_m = N_m \cdot P_m \cdot T_m, \quad (2)$$

где \mathcal{E}_m -общая энергия, выработанная двигателями тракторов предприятия, кВт·час,

N_m -количество тракторов, шт,

T_m -общегодое время работы двигателя трактора, час.

Общий объём энергии, вырабатываемой двигателями комбайнов предприятия \mathcal{E}_k , определяется по выражению

$$\mathcal{E}_k = N_k \cdot P_k \cdot T_k, \quad (3)$$

где \mathcal{E}_k -общая энергия, выработанная двигателями комбайнов предприятия, кВт·час,

N_k - количество комбайнов, шт,

T_m - общегодое время работы двигателя комбайна, час.

Общий объём энергии, вырабатываемой двигателями внутреннего сгорания предприятия $\mathcal{E}_{\text{дн}}$, определяется по выражению

$$\mathcal{E}_{\text{дн}} = \mathcal{E}_z + \mathcal{E}_m + \mathcal{E}_k. \quad (4)$$

Очевидно, что электрозарядная станция (ЭЗС) должна обеспечить требуемый отпуск электроэнергии с учётом потерь в циклах заряд-разряд систем бортовых аккумуляторов электромобилей и бустерного аккумулятора самой зарядной станции. По многочисленным экспериментальным данным и опыту эксплуатации тяговых аккумуляторов потери этих циклов, с достаточной для практического использования точностью, можно принять равными 40%.

Тогда общий объём энергии, необходимый для заряда аккумуляторов сельхозтехники предприятия \mathcal{E}_z , составит

$$\mathcal{E}_z = 1,4 \cdot \mathcal{E}_{\text{дн}}. \quad (5)$$

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для определения основных параметров ЭЗС конкретного сельхозпредприятия зададимся следующими исходными данными:

1. Грузовые автомобили предприятия КАМАЗ-2 ед. мощность двигателя 176 кВт, удельный расход топлива 180 г/кВт·ч, 1200 мото·час/год;

2. Грузовой автомобиль ГАЗ-52-1ед., мощность двигателя 85 кВт, удельный расход топлива 320 г/кВт·ч, 2400 мото·час/год;

3. Грузовые автомобили предприятия ГАЗ 3307-6 ед. мощность двигателя 76 кВт, удельный расход топлива 180 г/кВт·ч, 1200 мото·час/год;

4. Трактор предприятия МТЗ-82.1-9 ед, мощность двигателя 96 кВт, удельный расход топлива 220г/кВт·ч, 800 мото·час/ год;

5. Трактор предприятия КИРВЕЦ 744Р-9 ед., мощность двигателя 220 кВт, удельный расход топлива 220 г/кВт·ч, 1000 мото·час/год;

6. Трактор ДТ 75 -9 ед., мощность 67 кВт, удельный расход топлива 218 г/кВт, 900 мото·час/год;

7. Комбайн зерноуборочный «Дон-1500Б»-9ед, мощность двигателя 220кВт, удельный расход топлива 220г/кВт·ч, 500 мото·час/год;

8. Тариф на покупную электроэнергию $T_3=5,5$ руб/кВт·ч;

9. Цена на органическое топливо (бензин, дизтопливо) $C_m=50$ руб/кг.

Используя выражения (4), определим общий объём энергии вырабатываемой ДВС автомобилей и тракторов предприятия

$$\begin{aligned} \text{Эдп} = & 2 \cdot 176 \cdot 1200 + 1 \cdot 85 \cdot 2400 + 6 \cdot 76 \cdot 1200 + 9 \cdot 96 \cdot 800 + \\ & + 9 \cdot 220 \cdot 1000 + 9 \cdot 67 \cdot 900 + 9 \cdot 220 \cdot 500 = 4 \, 686 \, 000 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \end{aligned}$$

Используя выражения (5), определим общий объём необходимой электроэнергии для заряда аккумуляторов электромобилей и электротракторов предприятия

$$\text{Эз} = 1,4 \cdot 4 \cdot 4 \, 686 \, 000 = 6 \, 560 \, 400 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Применяя тариф 5,5 руб/кВт·ч [19] определим ожидаемые затраты сельхозпредприятия (Z_3) на покупную электроэнергию при переводе тракторов и сельхозмашин на электротраг

$$Z_3 = 6 \, 560 \, 400 \cdot 5,5 = 36 \, 082 \, 200 \text{ руб.}$$

В то же время затраты предприятия на покупку дизтоплива и бензина по 50 руб/кг [20] для ДВС $Z_{\text{топ}}$ составляют

$$\begin{aligned} Z_{\text{топ}} = & 50 \cdot (422 \, 400 \cdot 0,18 + 204 \, 400 \cdot 0,320 + 547 \, 200 \cdot 0,22 + \\ & + 1 \, 980 \, 000 \cdot 0,22 + 542 \, 700 \cdot 0,218) = 52 \, 043 \, 700 \, 200 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Эксплуатационные затраты предприятия на текущие и капитальные ремонты двигателей, топливной аппаратуры и трансмиссии сельхозтехники с ДВС составят

$$Z_{\text{рем}} = 1 \, 600 \, 000 \text{ руб.}$$

Полные годовые затраты предприятия на содержание автотракторного парка с ДВС составят

$$Z_{\text{ан}} = 52 \, 043 \, 700 + 1 \, 600 \, 000 = 53 \, 673 \, 700 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект Эф от перевода автомобилей и тракторов предприятия на электрическую тягу на покупной электроэнергии взамен ДВС составляет

$$\text{Эф} = 53 \, 673 \, 700 - 36 \, 082 \, 200 = +17 \, 591 \, 500 \text{ руб.}$$

$$\text{Эф} \approx 32\%$$

ВЫВОДЫ

В результате проведённого исследования установлено,

1. Одним из перспективных направлений развития сельхозпроизводства является отказ от использования ДВС на тракторах, автомобилях и сельхозмашинах и переход на электрическую тягу.

2. Промышленность уже производит или осваивает все новые виды электротракторов, электромобилей и электрокомбайнов.

Показано, что для отечественных условий при цене на топливо 50 руб/кг и тарифах на покупную электроэнергию 5,5 руб/кВт·ч, положительный экономический эффект может достигать 32% годовых затрат сельхозпредприятия на топливо и техническое обслуживание агрегатов с ДВС.

1. <https://www.youtube.com/watch?v=I0X8y4q7jfQ> (дата обращения 20.12.2018).

Презентация грузовика «ТЕСЛА» – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=I0X8y4q7jfQ> (дата обращения 20.12.2018)

2. Галушак В.С. Солнцекаты – новый экономичный вид транспорта для сельских жителей / В.С. Галушак, А.Г. Сошинов, Т.Ю. Сухоручкина // XXI МНПК "Проблемы и решения современной аграрной экономики". (п. Майский, 23-24 мая 2017 г.). п. Майский, 2017. – С. 37-38.

3. В. С. Галушак, А. Г. Сошинов и др., всего 5 человек; заявитель и правообладатель // Патент на ПМ РФ 82640, Россия, МПК В60L 8/00. Гелиовелосипед - №2008150039/22 ; заявл. 17.12.2008 ; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13. – 4 с.

4. <https://www.youtube.com/watch?v=iI9Ly6qlrE> (дата обращения 20.12.2018).

Создана супер батарея для электромобиля один заряд на 1000 КМ за 8 минут – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=iI9Ly6qlrE> (дата обращения 20.12.2018).

5. Электроплуг : МСЭ под ред Б.А.Введенского // МСЭ.-1961. – №10. – 871 с.

6. Электротрактор: МСЭ под ред Б.А.Введенского // МСЭ.-1961. – №10. – 880 с.

7. <https://masterok.livejournal.com/4147654.html> (дата обращения 25.12.2018).

Советский электротрактор – URL: <http://masterok.livejournal.com/4147654.html> (дата обращения 25.12.2018).

8. <https://hard-machines.ru/buldozery/dizel-elektricheskie-buldozery-det-250-det-320-i-det-400.html> (дата обращения 22.12.2018)

Дизель электрические бульдозеры ДЭТ250, ДЭТ320 и ДЭТ400 – URL : <https://hard-machines.ru/buldozery/dizel-elektricheskie-buldozery-det-250-det-320-i-det-400.html> (дата обращения 22.12.2018)

9. https://www.liotech.ru/sectornews_207_148 (дата обращения 24.12.2018).

В Перми будут собирать первый в России электротрактор – URL: https://www.liotech.ru/sectornews_207_148 (дата обращения 24.12.2018).

10. <https://ecotechnica.com.ua/transport/1792-john-deere-predstavila-elektrotraktor-sesam-video.html> (дата обращения 24.12.2018).

John Deere представила электротрактор SESAM – URL: <https://ecotechnica.com.ua/transport/1792-john-deere-predstavila-elektrotraktor-sesam-video.html> (дата обращения 24.12.2018).

11. <https://www.plm-forum.ru/forum/viewtopic.php?t=2114> (дата обращения 15.12.2018).

Электрический комбайн – URL: <http://www.plm-forum.ru/forum/viewtopic.php?t=2114> (дата обращения 15.12.2018).

12. <https://massavto.pf/p28652710-kamaz-53215-052.html> (дата обращения 10.12.2018)

Камаз описание –URL: <https://massavto.pf/p28652710-kamaz-53215-052.html> (дата обращения 10.12.2018).

13. [https:// avtodvigateli.com/marki/gaz-52.html](https://avtodvigateli.com/marki/gaz-52.html) (дата обращения 10.12.2018).

ГАЗ-52 двигатель характеристики-URL:[https:// avtodvigateli.com/marki/gaz-52.html](https://avtodvigateli.com/marki/gaz-52.html) (дата обращения 10.12.2018).

14. [https:// all-auto.org/3150-gaz-3307.html](https://all-auto.org/3150-gaz-3307.html) (дата обращения 10.12.2018).

ГАЗ-3307 Технические характеристики-URL: <https://all-auto.org/3150-gaz-3307.html> (дата обращения 10.12.2018).

15. [https:// teh-agro.ru.traktory/kirovvetstekhnicheskie744r1](https://teh-agro.ru.traktory/kirovvetstekhnicheskie744r1) (дата обращения 10.12.2018)

Трактор К-744Р технические характеристики- URL: [https:// teh-agro.ru.traktory/kirovvetstekhnicheskie744r1](https://teh-agro.ru.traktory/kirovvetstekhnicheskie744r1) (дата обращения 10.12.2018)

16. [https:// traktorwork.ru/ustrojstvo/traktor-dt-75.html](https://traktorwork.ru/ustrojstvo/traktor-dt-75.html) (дата обращения 10.12.2018).

Трактор ДТ-75 технические характеристики – URL: [https:// traktorwork.ru/ustrojstvo/traktor-dt-75.html](https://traktorwork.ru/ustrojstvo/traktor-dt-75.html) (дата обращения 10.12.2018).

17. [https:// industrialmachine.ru/mtz-82-1-traktor-mtz-82-1](https://industrialmachine.ru/mtz-82-1-traktor-mtz-82-1) (дата обращения 10.12.2018).

Трактор МТЗ-82.1 Технические характеристики-URL:[https:// industrialmachine.ru/mtz-82-1-traktor-mtz-82-1](https://industrialmachine.ru/mtz-82-1-traktor-mtz-82-1) (дата обращения 10.12.2018).

18. [https:// selhoztehnik.com/kombajn-don-150](https://selhoztehnik.com/kombajn-don-150) (дата обращения 10.12.2018).

Комбайн «Дон-1500»его устройство и технические характеристики-URL: [https:// selhoztehnik.com/kombajn-don-150](https://selhoztehnik.com/kombajn-don-150) (дата обращения 10.12.2018).

19. <https://tarif-24.ru/russia/electro/2019-elektro/1225-tarify-na-elektroenergiyu-dlya-volgograda-i-volgogradskoj-oblasti-s-1-yanvaryu-2019-goda.html> (дата обращения 26.12.2018).

Тарифы на электроэнергию для Волгограда и Волгоградской области- URL: <https://tarif-24.ru/russia/electro/2019-elektro/1225-tarify-na-elektroenergiyu-dlya-volgograda-i-volgogradskoj-oblasti-s-1-yanvaryu-2019-goda.html> (дата обращения 26.12.2019).

20. <https://kasyinfo.ru/regionam-opredeli-ceny-na-benzin-tablica-po-oblastjam/> (дата обращения 26.12.2018).

Регионам определили цену на бензин-таблица-по областям- URL: <https://kasyinfo.ru/regionam-opredeli-ceny-na-benzin-tablica-po-oblastjam/> (дата обращения 26.12.2018)

Direction of Technical Transformation of Agricultural Production by way Transfer of Tractors and Agricultural Machinery on the Electron Trail

Soshinov A.G., Galushchak V.S.

Kamyshin Institute of Technology (branch) of the Volgograd state technical university

Kamyshin, Russia

epp@kti.ru, turistu1@mail.ru

Abstract. Actual problems of the further development of the domestic agro-industrial complex are the reduction of production costs, in particular, the reduction of the costs of agricultural producers for fuel and lubricants. This article proposes a steady rejection of the use in agriculture of internal combustion engines using gasoline and diesel fuel, by converting automobiles, tractors and com-units to electric traction. The examples of modern and prospective electric vehicles, electric tractors and electric combines with on-board electric power intended for work in agricul-

ture are given. By calculation, by the example of averaged agricultural enterprise, the economic feasibility of replacing organic fuel with electric energy is shown, while a significant economic effect is achieved in the existing price proportions.

Keywords: agricultural production, electric cars, electric tractor, electric combines, fuel, electric power, economic effect.

Автоматизация обработки отверстий в корпусных заготовках теплообменных аппаратов

Горелова А. Ю., Кристаль М. Г., Мартыненко В. А.
Волгоградский государственный технический университет
Волгоград, Россия
asya.gorelowa@yandex.ru

Аннотация. Основной деталью теплообменных аппаратов является обечайка с большим количеством приваренных к ней патрубков. Отверстия под патрубки, центральные и тангенциальные, выполняют с использованием специальных приспособлений при помощи плазменной резки вручную, что определяет высокую трудоемкость изготовления теплообменной аппаратуры. Для снижения трудоемкости авторами предложено автоматическое устройство, реализующее данную технологическую операцию. Выполнение отверстия в обечайке ТА возможно за счет сложения двух реверсивных движений резака: вдоль оси заготовки и вращательного вокруг ее оси. Предложена математическая модель, описывающая требуемую траекторию движения резака. Модель в параметрической форме описывает траекторию относительного движения плазменного резака и обечайки заготовки теплообменного аппарата. Для проверки теоретических положений разработан и изготовлен методом 3D-прототипирования экспериментальный макет предложенной автоматической установки. Макет реализован на базе шариковинтовой передачи для реверсивного линейного перемещения и шагового привода реверсивного вращения заготовки. Заготовка закреплена в цанговом патроне и опирается на роликовую кинематическую призму. Предложены принципы автоматического управления шаговыми двигателями приводов вращательного перемещения заготовки и линейного – плазменного резака на основе 3D модели обрабатываемого изделия.

Ключевые слова: обработка отверстий, автоматическая резка, плазменная резка отверстий, автоматическая установка.

ВВЕДЕНИЕ

Теплообменные аппараты (ТА) – это крупногабаритные изделия, диаметры цилиндрических обечайек которых варьируются в диапазоне 800...4000 мм, а толщины – 10...100 мм. Одной из операций при их производстве является изготовление центральных и тангенциальных отверстий под сварку с патрубками диаметром от 200...1000 мм [2, 3, 4, 15]. Эту операцию выполняют вручную с помощью плазменной резки и дополнительных приспособлений, что достаточно трудоёмко. Поэтому автоматизация процесса обработки отверстий под патрубки в заготовках корпусов ТА является актуальной задачей [5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 18]. При разработке автоматического устройства, реализующего рассматриваемую операцию, необходимо обеспечить способность его к переналадке на различные типоразмеры заготовок и регулирование скорости резания, в зависимости от материала и толщины металла заготовки, а также и вида отверстия (центральное или тангенциальное) [12, 16, 17, 19].

В общем случае все отверстия, выполняемые в обечайке аппарата можно разделить на центральные и тангенциальные (рисунок 1). Если инструмент (резак) разместить в центральной плоскости заготовки, то в зависимости от того, какое отверстие требуется вырезать, заготовку в начальный момент необходимо повернуть вокруг ее продольной оси таким образом, чтобы центр отверстия лежал в центральной плоскости поперечного сечения обечайки. Для обработки заготовок разного диаметра требуется, чтобы ось центров не меняла своего положения в пространстве. Для этого можно использовать трехручачковый патрон в сочетании с раздвигаемыми роликовыми опорами кинематической призмы (рисунок 2).

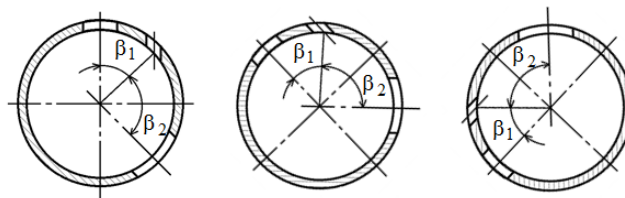


Рис. 1. Расположение отверстий в заготовке теплообменного аппарата

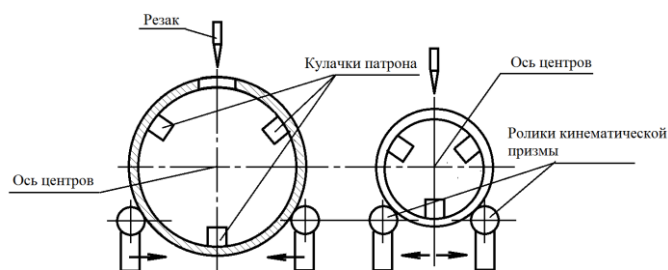


Рис. 2. Базирование обечайек заготовок теплообменных аппаратов различного диаметра

Такая схема базирования позволяет перейти к формированию математической модели, описывающей относительное перемещение инструмента (резака) и заготовки. При этом любая траектория может быть реализована движением по двум координатам: продольным возвратно-поступательным движением инструмента и возвратно-поступательным вращением заготовки вокруг оси центров.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ТРАЕКТОРИЮ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕЗАКА И ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ

В общем случае отверстие смещено на величину a относительно вертикальной оси обечайки теплообменного аппарата, (рисунок 3) система уравнений связи движение в двух плоскостях zOx и yOx имеет вид:

$$\begin{cases} x = a + r \cos \alpha, \\ y = r \sin \alpha, \\ z = \sqrt{R^2 - (a + r \cos \alpha)^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где R – радиус корпуса теплообменного аппарата; r – радиус отверстия; a – смещение оси отверстия от вертикальной оси; β – угол, под которым в каждый момент времени находится секущая плоскость отверстия в плоскости zOx ; α – угол, под которым в каждый момент времени находится секущая плоскость отверстия в плоскости yOx .

В частном случае, когда центр отверстия находится на вертикальной оси сечения заготовки величина $a = 0$, а система уравнений (1) приобретает вид:

$$\begin{cases} x = r \cos \alpha, \\ y = r \sin \alpha, \\ z = \sqrt{R^2 - r^2 \cos^2 \alpha}, \end{cases}$$

При этом уравнение плоскости инцидентной оси [9] заготовки имеет вид:

$$z = x \operatorname{tg}(\beta) \quad (2)$$

Чтобы исключить дополнительное перемещение резака, а, следовательно, и дополнительного привода в устройстве выполнения отверстий, для случая тангенциального расположения отверстия (рисунок 1) используем привод поворота обечайки, переведя ось этого отверстия в положение на вертикальной оси заготовки. Такому подходу соответствует поворот системы координат zOx вокруг оси на угол

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \beta_0, \text{ где } \beta_0 = \arccos \frac{a}{R} \text{ (рисунок 3).}$$

Тогда в системе координат ZoX получим:

$$\begin{cases} X = \frac{(a + r \cos \alpha)}{\cos \gamma} - Z \operatorname{tg} \gamma = \frac{(a + r \cos \alpha)}{\cos \gamma} - Z \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma}, \\ y = r \sin \alpha, \\ Z^2 + X^2 = R^2. \end{cases} \quad (3)$$

Исходя из (3), сохраняя движение по координате $y = r \sin \alpha = r \sin(\omega t)$ получим искомое уравнение связи в плоскости ZoX для получения желаемой траектории относительного перемещения заготовки и газового резака:

$$Z^2 + \left[\frac{(a + r \cos \alpha)}{\cos \gamma} - Z \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma} \right]^2 - R^2 = 0 \quad \text{или}$$

$$\frac{Z^2}{\cos^2 \gamma} - 2 \frac{(a + r \cos \alpha) \sin \gamma}{\cos^2 \gamma} Z - \left[R^2 - \left(\frac{(a + r \cos \alpha)}{\cos \gamma} \right)^2 \right] = 0$$

Умножив обе части этого уравнения на $\cos^2 \gamma$, получим окончательно:

$$Z^2 - 2Z(a + r \cos \alpha) \sin \gamma - \left[R^2 \cos^2 \gamma - (a + r \cos \alpha)^2 \right] = 0 \quad (4)$$

Решая уравнение (4), учетом того, что $Z = R \sin(\beta + \gamma)$, получим:

$$\sin(\beta + \gamma) = \frac{(a + r \cos \alpha) \sin \gamma \pm \sqrt{\frac{(a + r \cos \alpha)^2 \sin^2 \gamma}{R^2} + \frac{R^2 \cos^2 \gamma - (a + r \cos \alpha)^2}{R^2}}}{R} \quad (5)$$

Из решения (5) следует:

$$\beta = \arcsin \left[(\varepsilon + \mu \cos \alpha) \sin \gamma \pm \sqrt{(\varepsilon + \mu \cos \alpha)^2 \sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma - (\varepsilon + \mu \cos \alpha)^2} \right] - \gamma, \quad (6)$$

$$\text{где } \mu = \frac{r}{R}; \varepsilon = \frac{a}{R}.$$

Поскольку $\alpha = \omega t$; то функция (6) есть функция $\beta(t)$.

Если задаться скоростью перемещения $V = \text{const}$ резака, то, с учетом того, что $y(t) = r \sin(\omega t)$, а

$$V^2 = \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \left(R \frac{d\beta}{dt} \right)^2 \text{ с учетом выражения (6) можно}$$

вычислить величину круговой частоты ω , что однозначно позволяет реализовать законы управления возвратно-поступательными движениями: линейным – резака, вращательным – обечайки теплообменного аппарата.

Следовательно, полученные выражения позволяют разработать такой принцип управления процессом обработки отверстий, который обеспечит поддержание результирующей скорости V резака постоянной в автоматическом режиме.

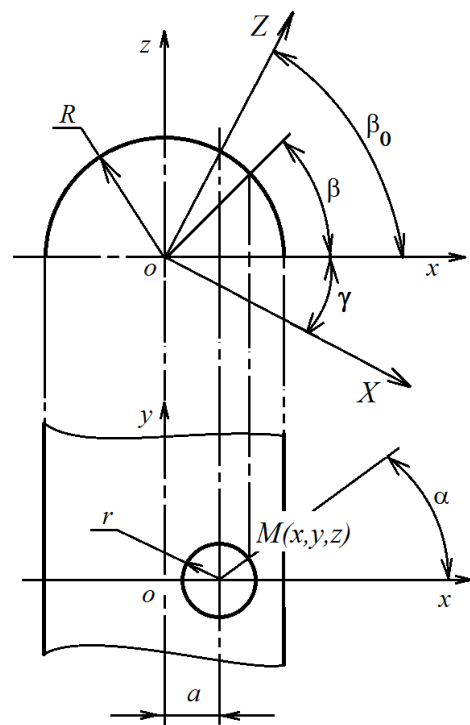


Рис. 3. Образование отверстия в заготовке теплообменного аппарата

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАКЕТ УСТРОЙСТВА ДЛЯ
АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ В ЗАГОТОВКАХ
ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Предложенное устройство, изготовленное по методу 3D – прототипирования, содержит цанговый зажим, в который устанавливают корпус теплообменного аппарата в кинематических призмах с возможностью реверсивного вращения вокруг его продольной оси; модуль для осуществления плазменной резки с возможностью продольного перемещения вдоль заготовки. Установка содержит два привода: вращения и линейного перемещения, которые, работая совместно, позволяют получить требуемые траектории и скорости перемещения резака, необходимые для выполнения отверстий разного диаметра и различного положения на поверхности обечайки.

Узел вращения заготовки, представленный на рисунке 4, обеспечивает реверсивное вращение корпуса теплообменного аппарата.

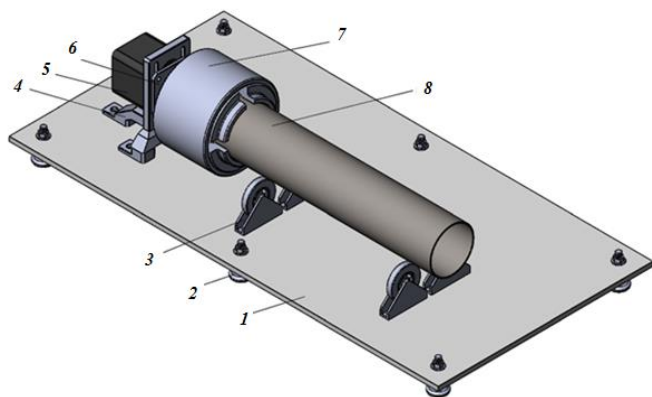


Рис. 4. Узел вращения заготовки: 1 – основание; 2 – регулируемые опоры; 3 – роликовые опоры; 4 – держатель для привода; 5 – привод; 6 – узел подшипниковый; 7 – цанговый зажим; 8 – заготовка

Заготовку 8 закрепляют в цанговом зажиме (7) (рисунок 5), и приводится во вращение с помощью привода, крепление которого показано на рисунке 3. Узел вращательного движения (рисунок 1) выполнен следующим образом. Основание (1) установлено на регулируемых опорах (2), что позволяет задавать ему строго горизонтальное положение. Заготовка (8) устанавливается в цанговый зажим (7), который закрепляется на валу привода (5) с помощью винта, и опирается на роликовые опоры (3), закрепленные с помощью болтовых соединений. Привод (5) крепится к кронштейну (4), который установлен на основании (1) и закреплен с помощью трех болтовых соединений. Вал привода (3) опирается на подшипниковый узел (6).

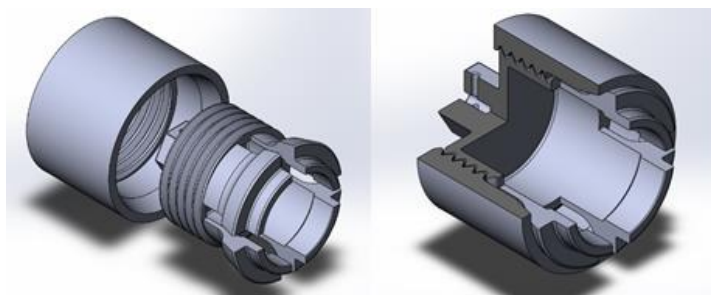


Рис. 5. Цанговый зажим

Узел продольного перемещения рабочего органа (рисунок 6) обеспечивает возвратно-поступательное движение рабочего органа и выполнен следующим образом. Узел установлен на опоры (3), которые базируются на основании (2), лежащем на регулируемых опорах (1). Привод (4) закреплен в держателе для привода (5) с помощью четырех винтов. Через муфту (7) момент вращения от привода передается на шариковинтовую передачу (8), которая приводит в движение узел рабочего органа (9) по цилиндрическим направляющим (11), закрепленным в кронштейнах (6) и (13). Оба кронштейна установлены на опорах (3). Вал шариковинтовой передачи (8) опирается на подшипники (12), которые закреплены в соответствующих кронштейнах с помощью винтов. В качестве инструмента использован маркер (10) установленный в узле рабочего органа (9) и закрепленный винтом.

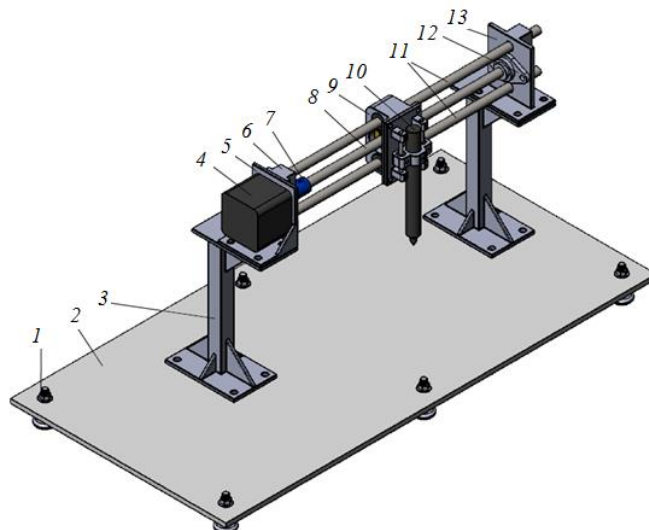


Рис.6. Узел продольного перемещения рабочего органа макета автоматической установки для обработки отверстий: 1 – регулируемая опора; 2 – основание; 3 – опоры; 4 – привод; 5 – держатель для привода; 6 – узел подшипниковый; 7 – муфта; 8 – шпилька резьбовая; 9 – узел рабочего органа; 10 – маркер; 11 – направляющие цилиндрические; 12 – упор подшипниковый; 13 – крепление для подшипникового упора

Работа описанной установки смоделирована в инженерном программном комплексе, где для двух двигателей заданы законы движения и получена результирующая траектория движения (рисунок 7). Реальный макет представлен на рисунке 8.

ПРИНЦИП УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

Для автоматического управления предложенной системой обработки отверстий может быть использован следующий подход (Рисунок 9). Зная параметры детали и отверстия, которое необходимо вырезать, в программном комплексе типа САЕ –системы разрабатывают твердотельную модель отверстия как показано на рисунке 10.

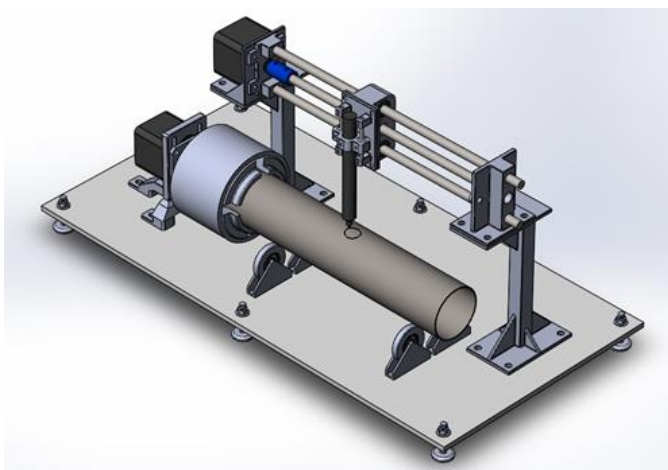


Рис. 7. Результирующая траектория перемещения инструмента, полученная при моделировании

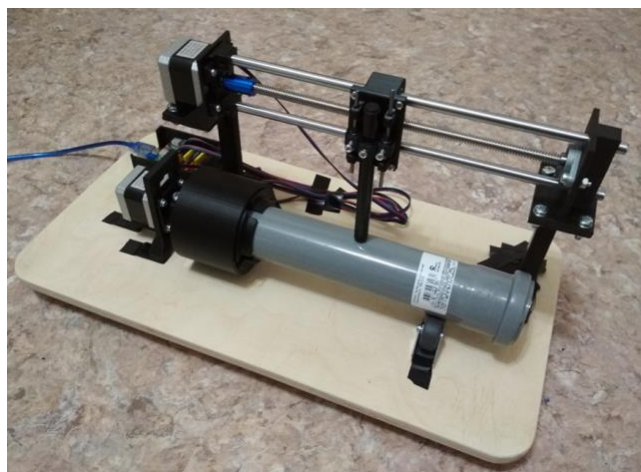


Рис. 8. Разработанный и изготовленный макет экспериментальной установки

Модель сохраняют в формате STL, в котором поверхность трехмерной модели представляется в виде списка треугольных граней (фасетов) и нормалей к ним [Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Далее с использованием специализированного программного обеспечения происходит считывание из файла информации о детали и формирование слоев [Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.]. На этом этапе задают обход детали по контуру. После окончания этого этапа формируется так называемый G-Code набор команд, содержащий информацию о перемещениях рабочих органов, которая загружается в память контроллера. Далее контроллер передает управляющую программу драйверам исполнительных механизмов,

которые приводят систему обработки отверстий в действие.

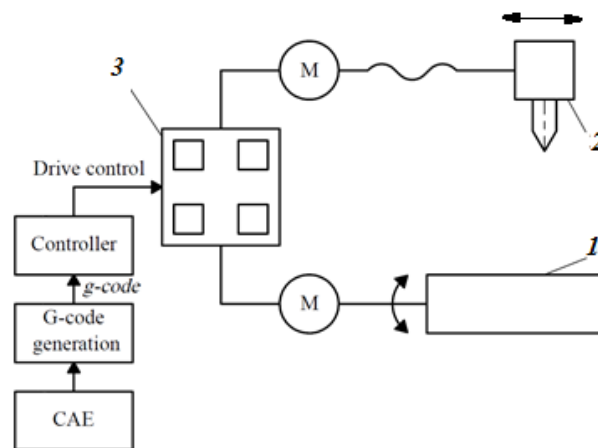


Рис. 9. Схема управления процессом обработки отверстия: 1 заготовка; 2 резак; 3 плата с драйверами



Рис. 10. Твердотельная модель вырезаемой части заготовки

ЛИТЕРАТУРА

- 3D Printing Industry (2012) 3D Printing Processes: Free Beginner's Guide 3D Printing Industry. Available via DIALOG. <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/> Accessed 10 Nov 2018.
- Baron V. G. (2018) The Heat Exchanger. RU Patent 182, 250, 9 Aug 2018.
- Baron V. G. (2018) The Heat Exchanger. RU Patent 182, 251, 9 Aug 2018.
- Baron V. G. (2018) The Heat Exchanger. RU Patent 182, 252, 9 Aug 2018.
- Bojtler Bit (2014) Laser Beam cutting system with variable cutting speed. CH Patent 2, 516, 155, 20 May 2014.
- Clark William Thomas, Partington Edward Colin (1978) Machining method. US Patent 4098153, 4 July 1978.
- Delzenne Michel, Augeraund Regis (2000) Oxygen arc cutting with plasma pre-heating of ferrous materials, such as structural steel workpieces. FR Patent WO 00/37207 29 June 2000.
- Drobotov A., Avdeev A., Shvets A. (2018) Magnetohydrodynamic pump application in complex form aluminum parts additive manufacturing. MATEC Web of Conferences International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2018 (ICMTME 2018) (Sevastopol, Russia, 10-14 September, 2018) 224: 1-6.
- Efimov N. (1965) Short course of analytic geometry. Nauka, Moscow.
- Fridel Jens, Irrgang Gerhard, Krink Folker, Ollmann Jens (2015) Method of plasma cutting at plasma cutting unit by

pul-sating electric current. RU Patent 2, 542, 158, 20 February 2015.

11. Gushin I., Avdeev A., Shvets A., Drobotov A (2015) Principles of creating a program for the 3D printing device operation. Izvestia VSTU. 11: 50-53 (in Russian)

https://doi.org/10.1007/978-981-10-8788-2_11

12. Kovalev O.B., Fomin V.M. (2013) Physical basics of thick sheet materials laser cutting. FIZMATLIT, Moscow.

13. Laurisch F., Krink V. (2018) Method of plasma cutting of workpieces. RU Patent 2, 647, 959, 21 March 2018.

14. Madeja Klaus, Laurisch Frank, Rueckert Roland, Krink Volker (2007) Device And Method For The Plasma-Cutting Of Workpieces With An Additional Fusible Electrode Guided Between The Nozzle And The Workpiece. DE Patent 102005039070, 22 February 2007.

15. Mokrozub V.G., Morozov S.V. (2013) The Structure of Informational and Logical Model of Shell-and-Tube Heat Exchangers. Vestnil TGTU 3: 518-525.

16. Monaenkov I. V. (2009) Method For Automatic Control Of Laser Cutting Or Hole Drilling Process And Device For Its Realisation. RU Patent 2, 375, 162, 10 Jun 2009.

17. Rodin A. O., Udaikov S. V., Strizevsky M. N. (2016) Bulk cutting machine. RU Patent 166, 992, 27 September 2016

18. Rudjak EH M, Rudjak E EH (1996) Plasma arc cutting device. RU Patent 9, 510, 23, 66, 20 November 1996.

19. Tverskoj Vladimir Semenovich, Tverskoj Aleksej Vladimirovich (2006) Method for treatment of surfaces. RU Patent 2, 286, 866, 10 November 2006.

20. Yakof, K.S.A., Zabudin, N.F., Mat Sahat, I., Mohd Adib, M.A.H. (2018) Development of 3D Printed Heart Model for Medical Training. In: Hassan M. (eds) Intelligent Manufacturing & Mechatronics. Lecture Notes in Mechanical Engineering 109-116.

Automation of Heat Exchanger Shell Holes Machining Operation

Gorelova A.Yu., Kristal M.G., Martynenko V.A.

Volgograd State Technical University

Volgograd, Russia

asya.gorelova@yandex.ru

Abstract. The design of the shell and tube heat exchanger includes a tube-like shell with holes to which an inlet and outlet pipes are welded. Radial and tangential holes are produced manually by means of plasma cutting with the use of specialized tools, which determines high laboriousness of heat exchangers production. An automatic device is proposed to reduce the laboriousness of this operation. To produce the hole in the heat exchanger shell, two reversible motions are superimposed: linear motion of the cutter along the longitudinal axis of the shell and the shell rotary motion. A mathematical model of the required cutter motion is proposed, which describes the relative trajectories of the plasma cutter and the shell in parametric form. To verify theoretical premises, a pro-

tototype of the device was produced using a 3D prototyping technology, a ball screw for the reversible linear motion of the cutter and a stepper motor for the reversible rotary motion of the shell. The shell is fixed by means of a collet chuck and rests on the pipe roller support. The principles of automatic control of the linear and rotary motions of the cutter and the shell are proposed, based on the 3D model of the shell.

Keywords: holes machining, automatic cutting, plasma cutting, automatic device.

К выбору концепции перспективных приводных установок транспортных средств

Фионов А.М., Хортов В.П.

ФГБОУ Московский политехнический университет
Москва, Россия
a.m.fironov@mospolytech.ru, eope@mospolytech.ru

Аннотация. Московский политехнический университет в кооперации с компанией АМФ Консалтинг ведет разработку концептуально новых перспективных силовых установок наземных транспортных средств. При выборе концепции проведен аналитический обзор ключевых аспектов, определяющих мировые тенденции в развитии инновационных технологий силовых энергетических установок на перспективу до 2050 года. Эти тенденции и факторы сопоставлены с возможностями и интересами отечественных разработчиков и автопроизводителей в поиске альтернативных инновационных решений при создании перспективных транспортных средств, конкурирующих на внутреннем и внешних рынках.

Ключевые слова: концепции приводных установок, двигатели внутреннего сгорания, силовые установки, гибридные приводы, электрические приводы, накопители энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Значение развития автомобильного производства для России трудно переоценить, но получить свое развитие оно сможет, если производимые автомобили будут конкурентоспособными. Автомобиль сегодня – не только средство передвижения, но и конечный продукт длинной технологической цепочки, определяющей уровень экономики и благополучия цивилизованной страны.

Исторический опыт отечественного автопрома указывает, что России следует идти своим путем, а не следовать в фарватере предложений внешних автопроизводителей, которые рассматривают Россию лишь как рынок сбыта.

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ, ГЛОБАЛЬНЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ В СОПОСТАВЛЕНИИ С РОССИЙСКИМИ УСЛОВИЯМИ В РАЗВИТИИ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СИЛОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ТС

Автомобильная отрасль имеет самый высокий мультипликативный фактор в создании рабочих мест и технологической инфраструктуры, является драйвером социального лифта и качества жизни. На одно рабочее место на заводе, собирающем готовые автомобили (конвейерный этап), приходится до 18-20 трудозанятых в подрядных и субподрядных подразделениях реального сектора экономики (пример - Германия) и этот эффект имеет тенденцию к росту занятости в предпроектной, проектной деятельности, и послепродажной сфере услуг, тогда как сам процесс тиражного производства интенсивно роботизируется [1].

Социальный аспект развития общества во многом коррелирует с техническими, технологическими прорывами и конкурентными экономическими преимуществами в машиностроении. Инвестиции в научно-исследовательские и опытно-конструкторские

работы (НИОКР) ведущих автопроизводителей мира составляют 4-5% от годового оборота. В России, это лишь ок. 1,5 %, при несопоставимо меньших масштабах производства и сбыта [2]. Вместе с тем, статистика мирового автопроизводства убедительно демонстрирует, что в среднем за последние 15 лет происходил ежегодный прирост производства ок. 2,5-3% “Рис.1”.

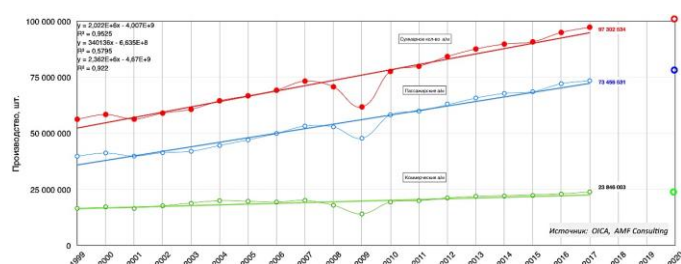


Рис. 1. Мировое производство пассажирских и коммерческих автомобилей 1999-2017г.г. и прогноз до 2020г.- ●

Этот тренд будет сохраняться в ближайшие несколько лет в силу инерционности процесса производства и гибкой конкурентной борьбы на рынках сбыта, а также специфики регистрации статистических данных, кризисные падения быстро восстанавливались отложенным спросом “Рис.2”.

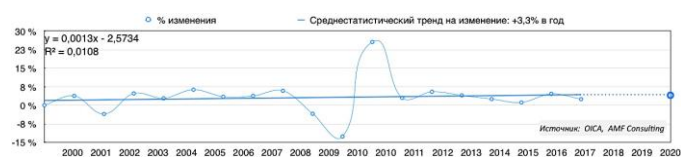


Рис. 2. Тренд на прирост мирового производства автомобилей 1999-2017г.г. и прогноз до 2020г.- ●

От общего объема производства по типам транспортных средств легковой пассажирский составляет ок. 75% . Остальные 25% - легкий коммерческий транспорт, грузовые а/м и автобусы малой, средней и большой вместимости.

В России это соотношение смещено в пользу легкового транспорта 87% к 13%. При этом доля производства автомобилей иностранных автопроизводителей растет, тогда как российские бренды теряют свои позиции на внутреннем рынке и практически не конкурирует на внешнем.

Основной причиной такого состояния дел является запаздывание в разработке и производстве конкурентных отечественных автомобилей и опережающем развертывании производства иностранных компаний на территории России с морально устаревающими технологиями и низкой себестоимостью. Иностранцы

автопроизводители легко конкурируют на нашем внутреннем рынке и сдерживают развитие отечественного автопрома, который, таким образом, теряет привлекательность к инвестициям в инновационные разработки, не развивается и слабеет.

Из растущей количественной динамики мирового автопрома, выделяются наиболее заметные тенденции перехода к качественным изменениям. По расходам на НИОКР автомобильная промышленность занимает первое место в Европе, опережая такие отрасли, как фармацевтика и биотехнология, машиностроение, авиация и оборона. В мировом рейтинге, из 2500 предприятий с самыми высокими расходами на исследования и разработки в 2016 году, автомобильная отрасль была лидирующей. Volkswagen - 1-е место (13.67 млрд. евро), GM -11-е (7.68 млрд. евро), Daimler -12-е (7.53 млрд. евро), Toyota -13-е (7.50 млрд. евро), Ford -15-е (6.92 млрд. евро) и Robert Bosch 20-е (5.58 млрд. евро) [2].

Основные инвестиции направляются на создание перспективных приводных установок, альтернативных приводу с ДВС. Причем, каждый из автопроизводителей рассматривает и реализует гамму альтернативных приводных концепций, что свидетельствует о неоднозначности в выборе оптимального решения и многозадачности текущих, и грядущих вызовов времени (кризисы экономические, скандалы, типа дизельгейтс, различные драйверы, как экологические и конкуренция за рынки сбыта и пр.).

Анализируя историю развития транспортных приводов мы выделили наиболее характерные тенденции. В хронологии существующих и появляющихся технических решений и технологий приводных систем транспортных средств, обнаруживаются различные, по степени зрелости теоретической и практической их проработки, установки вплоть до промышленных образцов.

S-образные процессы имеют ярко выраженные признаки этапов ускорения-замедления, а также качественных переходов на доминирующие, и дополняющие альтернативные типы приводных установок “Рис.3”.

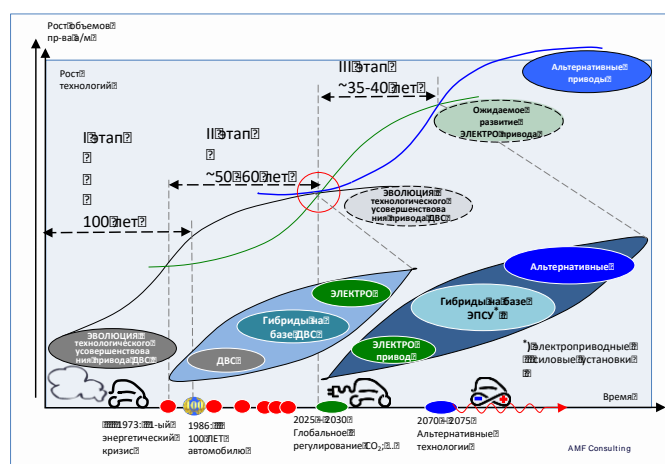


Рис. 3. Этапы совершенствования технологий приводов АТС (I – II – III)

Каждый последующий этап с доминирующим типом привода длится в своем развитии меньше по времени, чем предыдущий и, чтобы изменить положение в отечественном автопроме и стать полноправными

участниками экспортного рынка, необходимо сейчас инвестировать в свои перспективные, инновационные разработки, с которыми можно будет кооперироваться в технологиях промышленного производства с другими участниками международного автопрома на паритетных и взаимовыгодных условиях.

Здесь, возникает необходимость правильного выбора концепции разработки перспективных приводных установок с тем, чтобы получить преференции в практической реализации и коммерческой востребованности найденных решений.

Сейчас, следуя логике развития силовых установок “Рис.3”, мы находимся в фазе окончания второго, переходного этапа, где заканчивается доминирующая роль ДВС, активно закрепляются следующие типы силовых установок на основе электрических приводов, накопителей, источников зарядки. На 3-ем этапе именно они будут доминировать, активно воспроизводиться и тиражироваться, получат широкое развитие необходимых технологий в производстве и эксплуатации, определяют всю инфраструктуру транспортной отрасли.

На переходе от 2-го к 3-му этапу, в неявном виде, уже нарождается следующий альтернативный доминирующий тип силовых установок. На рисунке 3 он находится на пересечении трёх S-образных линий и выделен окружностью.

Таким образом, намечаются несколько перспективных направлений развития автомобильного транспорта с упреждающей возможностью развития применительно к российскому автопрому. Прежде всего, все перечисленные выше перспективные для рынка России направления развития автопрома непременно охвачены электромеханическими трансмиссиями, в которые входят электродвигатель, источник электрической энергии в виде химических или топливных элементов, тепловых двигателей и генераторов.

Основными вопросами выбора концепции, которые мы определили в нашем проекте, являются вопросы выбора перспективных приводов, накопителей и источников зарядки в которых электрическая компонента будет доминирующей.

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАРЯДКИ И НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

По одному из ключевых вопросов, наличия альтернативы углеводородным источникам энергии с сохранением автономности транспортных средств, при большом разнообразии предложений, наиболее часто рассматриваются электрические источники и накопители энергии, которые получили свое активное развитие за последние 30 лет, как экологически более “чистые”, высокоэффективные, безопасные, технологически более всего подготовленные к промышленному производству.

По своим отдельным характеристикам - удельная мощность $W/(l, kg)$ и удельная энергоёмкость $W*h/(l, kg)$, они уже приближаются к бензиновым “Рис.4”, однако, по совокупности эксплуатационных свойств, по стоимости еще уступают традиционным углеводородным.

Уже сейчас очевидно, что себестоимость электрических приводов и накопителей энергии снизится в разы в ближайшие годы, хотя бы только за счет увеличения объемов производства и совершенствования технологий, однако необходимо еще усовершенствовать эксплуатационные свойства и параметры энергетических

систем и установок, подготовить всю дорожно-транспортную инфраструктуру.

В выборе своей концепции перспективных накопителей энергии мы использовали комплексный подход, в котором комбинировали в одной накопительной системе различные по принципу действия накопители с лучшими характеристиками по удельной мощности и удельной энергоемкости. Это зона выделена пунктирной линией на “рис.4”, в I-ом квадранте параметров относительно точки “Бензин”.

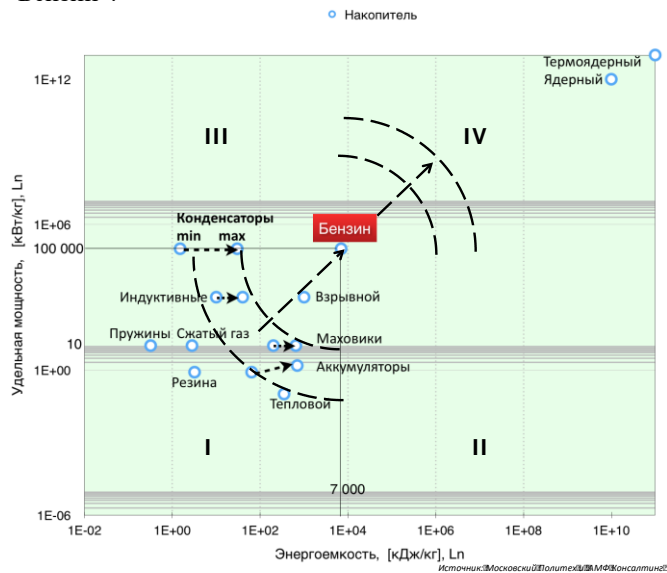


Рис. 4. Характеристики различных накопителей энергии

Комбинируя взаимодействие различных по принципу накопления и отдачи энергии систем, мы добиваемся эффекта, который описывается принципом суперпозиции, где результирующий параметрический вектор смещает суммирующие характеристики в сторону IV квадранта. При этом остается возможность подбора лучшей комбинации пиковых значений первого параметра под особенности транспорта большой грузоподъемности (HV), второго - для малой и средней (EV, PHEV). Кроме того, усовершенствование характеристик каждого из задействованных накопителей вносит свой положительный эффект в комплексный накопитель. Например, конденсаторные и твердотельные батареи с плотностью заряда 1000Wh/L уже сейчас обеспечивают высокую скорость зарядки (до 30 минут) [3, 4]. Аккумуляторные батареи различных типов также улучшили свои показатели за последние 15-20 лет и достигли 250-300 Вт*ч/кг, что позволяет им осуществлять пробег до 400 км без подзарядки.

В то же время, тепловые двигатели карбюраторного и дизельного типа, применяемые в качестве комбинированной энергоустановки с электрогенератором при совместных удельных показателях, достигли удельных значений от 3 до 10 кВт/кг. Электрохимические генераторы, могущие напрямую превращать водород в электрический ток достигли также рекордных показателей от 6 до 10 кВт/кг.

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ

Многообразие приводных схем альтернативных классическому приводу с ДВС транспортных средств можно структурированно представить, используя критерий

наличия и функционала бортовых электрических систем [5]:

Первый тип: традиционный автомобиль с ДВС (internal combustion engine - ICE) с бортовой сетью 12V,

Второй тип: относительно недорогие и простые - гибридные электрические автомобили (Hybrid Electric Vehicle - HEV), которые в свою очередь, можно подразделить на четыре категории “табл.1”:

Таблица 1

| Тип | Система старт-стоп | Рекуперативное торможение + электро доп.привод | Привод только от электродвигателя | Зарядка от внешнего источника | Тип |
|----------------|--------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------|----------------|
| Микро гибрид | + | - | - | - | Micro hybrid |
| Легкий гибрид | + | + | - | - | Mild hybrid |
| Полный гибрид | + | + | + | - | Full hybrid |
| Plug-in гибрид | + | + | + | + | Plug-in hybrid |

- микрогибриды (Micro hybrids) с ДВС (ICE) и системами Stop / Start, бортовой электрической сетью 12V и микрогибриды (Micro hybrids) с ДВС (ICE) с Stop / Start , 48V;

- легкие гибриды (Mild hybrids) - это, как правило, двигатели внутреннего сгорания, оснащенные электрической машиной (мотор/генератор в параллельной гибридной схеме подключения), позволяющий отключать двигатель в режиме Stop / Start), рекуперативное торможение, подключение к ДВС (ICE), но «легкие» гибриды не допускают только электрического привода;

- полные гибриды: (Full hybrids) - в дополнение к предыдущему, позволяет движение только на электрической тяге;

- подключаемые гибридные электрические автомобили (Plug-in-Hybrid Vehicle - PHEV). В дополнение к функционалу Full hybrid, позволяет производить зарядку электрического накопителя от внешних источников энергии.

Третий тип: электрические автомобили на водородных топливных элементах (Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle - FCEV).

Четвертый тип: Электромобили с питанием от батареи (Battery Electric Vehicle - BEV).

Пятый тип: Транспортные средства с другими альтернативными приводами (механическими, гидро-механическими, пневмо-механическими и пр.)

В настоящее время наблюдается ускоренный темп развития BEV и PHEV, несмотря на сдерживающее влияние стоимости, ограниченный запаса хода на электроэнергии, ограниченность развития инфраструктуры зарядки и генерации электроэнергии от возобновляемых и низкоуглеродных источников.

Вероятнее всего, именно эти типы приводных систем получат самое широкое распространение в обозримом будущем. Однако, открытым остается вопрос эффективной передачи энергии от накопителей на движители с учетом эксплуатационных требований к современным транспортным средствам.

Основные тренды таковы, что в большинстве случаев предлагаются электромеханические трансмиссии, в которые входят механические редукторы, электродвигатели, источники электрической энергии в виде химических или топливных элементов, тепловые двигатели и генераторы.

Применение электрической трансмиссии уже тоже становится возможным на транспортных средствах в связи с тем, что последние достижения в этой области позволяют это осуществить. Так, в области электродвигателей

произошли конструктивные изменения благодаря силовой электронике и повсеместному применению вместо двигателя постоянного тока синхронных, асинхронных, вентильных и двигателей с редкоземельными магнитами, доведя удельные показатели таких машин до предельных значений. Например, фирма ZYTEK сконструировала электродвигатель мощностью 90 кВт при 16 000 об/мин и массе всего 21 кг [6].

Сравнивая достоинства и недостатки этих двух типов трансмиссий, более перспективной нам представляется трансмиссия с минимальными механическими связями.

Расширение применения электропривода на безрельсовых транспортных машинах обуславливается целым рядом достоинств, к важнейшим из которых относятся:

Возможность рационального дробления мощности первичного двигателя и отсутствие механической связи между ним и тяговым двигателем, что позволяет создать автомобили с прогрессивными конструктивными решениями и высокими технико-экономическими показателями.

Улучшение использования мощности и повышение долговечности двигателей.

Надежность и экономичность в эксплуатации.

Гибкость управления транспортным средством и легкость его автоматизации.

Передача электрической энергии к тяговым двигателям производится значительно проще чем механическая передача, поэтому появляется возможность создания многозвенных транспортных машин с индивидуальным приводом на все колеса и применение мотор-колес.

Электрический привод обеспечивает более широкое и плавное регулирование тягово-скоростных характеристик автомобиля.

Надежность электропривода повышается из-за отсутствия ряда узлов и агрегатов, характерных для механических трансмиссий (механизм сцепления, карданные валы, коробки скоростей и т.д.).

Более низкая себестоимость перевозки на автомобилях с электрической трансмиссией по сравнению с механической на 20-30 % [6].

Уменьшение расходов на ремонт транспортных средств по сравнению механической трансмиссией в 6-7 раз [6].

Управление транспортным средством с электротрансмиссией отличается простотой и гибкостью, что значительно облегчает труд водителя.

К числу недостатков электропривода относятся:

Необходимость двойного преобразования энергии и снижение КПД системы.

Относительно большой вес электрических машин отнесенный к единице передаваемой мощности.

Расход меди.

Однако КПД современных электрических машин составляет 0,9-0,92 и сам факт двойного преобразования энергии еще не делает электропривод заведомо менее эффективным чем механический. Относительно большой вес электрических машин также не является препятствием, так как можно эффективно снижать вес машины за счет повышения частоты вращения и применения высококачественных технологий и электротехнических материалов.

Необходимость использовать медь для электрических машин можно также оптимизировать, применяя асинхронные машины переменного тока с короткозамкнутой обмоткой ротора, изготовленной из алюминия. Отсутствие коллектора в таком двигателе также снижает расход меди.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Таким образом, намечаются несколько перспективных направлений развития автомобильного транспорта с упреждающей возможностью развития применительно к российскому автопрому.

Обозначенные аспекты выбора систем и составных частей перспективных приводных установок реализуются в проекте Московского политехнического университета в кооперации с компанией АМФ Консалтинг по разработке концептуально новых перспективных силовых установок наземных транспортных средств.

Обоснованность практической реализации намеченных целей проекта подтверждается использованием высоких достижений в таких областях как энергомашиностроение, источники тока, конденсаторостроение, тяговые двигатели, силовая электроника, микроэлектроника и компьютерное управление систем накопления, накопителей энергии. Расширяется кооперация участников проекта. Технические решения регистрируются и публикуются.

Все это позволяет создать в будущем перспективные транспортные средства, вплоть до беспилотных автомобилей чего совершенно невозможно сделать при механической трансмиссии и устаревших подходов к решению транспортных проблем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Володин А.С. тезисы докл. Основные меры государственной поддержки и регулирования развития автомобильной промышленности. Директор департамента автомобильной промышленности и железнодорожного машиностроения. (Москва, декабрь 2016 г.). – Москва, 2016.
2. <https://home.kpmg.com/pl/en/home/insights/2018/03/r-and-d-in-the-automotive-sector.print.html>
3. Light Vehicle Prognose 2050 für Europa, Apr 2016. SuP.
4. Кутенев В.Ф., Анализ тенденций развития электрического привода легковых автомобилей / В.Ф. Кутенев, В.И. Сонкин // Труды НАМИ. – №2 (273). – 2018.
5. <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/mild-hybrid-electric-vehicle-mhev-introduction/>
6. Зуев С.М. Электрооборудование и электроника автомобилей в основных терминах с их объяснением на русском и английском языках. Учебный справочник / С.М. Зуев, Ю.М. Шматков, Р.А. Малеев, В.П. Хортов, А.А. Лавриков, Д.О. Варламов. – Москва: Московский Политех, 2017. – 196 с.

To the Choice of the Concept of Developing Promising Power Drives of Land Vehicles

Fironov A.M., Khortov V.P.
Moscow Polytechnic University
Moscow, Russia
a.m.fironov@mospolytech.ru, eope@mospolytech.ru

Abstract. Moscow Polytechnic University in cooperation with the company AMF Consulting is developing a conceptually new perspective power drives for ground transport mashins. While choosing a concept, was conducted an analytical review of the key aspects that determine global trends in the development of innovative technologies for power drives for the future until 2050. These trends and factors are compared with the capabilities and

interests of domestic R&D specialists and automakers in the search for alternative innovative solutions in the creation of promising vehicles competing in the domestic and foreign markets.

Keywords: concepts of power drives, internal combustion engines, power drive, hybrid drives, electric drives, energy storage.

Влияние основных конструктивных параметров механизма преобразования движения бескривошипной поршневой машины (двигателя) на величину крутящего момента на выходном валу при условиях реализации рабочего цикла, сходственных с кривошипно-шатунными ДВС

Шароглазов Б.А., Клементьев В.В.

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Челябинск, Россия

sharoglazovba@susu.ru, klementevvv@susu.ru

Аннотация. В статье рассмотрено решение задачи определения взаимосвязи основных конструктивных параметров механизма преобразования движения с конструктивными и техническими параметрами бескривошипной поршневой машины (двигателя) и выявления влияния этих параметров на работоспособность машины, а также величину развиваемого крутящего момента на выходном валу в сопоставлении с кривошипно-шатунным двигателем внутреннего сгорания. Сравнение произведено на основе сходственности (идентичности параметров, характеризующих условия реализации рабочего цикла тепловой машины) рабочих процессов, протекающих в цилиндре бескривошипной машины и кривошипно-шатунного двигателя. Сделан вывод о преимуществе бескривошипной машины в отношении возможностей конструктивного исполнения высокомоментных двигателей. Даны практические рекомендации по выбору конструктивных параметров в зависимости от предъявляемых технических требований, назначения и области использования бескривошипной машины.

Ключевые слова: тепловая машина, двигатель внутреннего сгорания, бескривошипный двигатель, рабочий цикл, крутящий момент, преобразующий механизм, конструктивный параметр.

ВВЕДЕНИЕ

Практика современного двигателестроения предъявляет все более жесткие требования по созданию энерго- и ресурсоэффективных поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), отличающихся высокими технико-экономическими показателями и эксплуатационными характеристиками. При этом существует запрос на создание научно-технического и конструкторско-технологического рывка в области поршневого двигателестроения. А резервы совершенствования “традиционных” двигателей, содержащих в основе своей конструкции криво-

шипно-шатунный механизм (КШМ) как систему, преобразующую возвратно-поступательное движение поршня (поршней) во вращение коленчатого вала, хоть и имеются, см. например, [1, 2], но в значительной степени исчерпаны. Вопросы улучшения технико-экономических и массогабаритных показателей поршневых и комбинированных ДВС за счет использования возможностей, предоставляемых отличными от кривошипно-шатунной кинематическими схемами преобразующих механизмов, остаются на данный момент относительно мало разработанными как в теории, так и на практике [3–10].

На кафедре “Двигатели внутреннего сгорания и электронные системы автомобилей” Южно-Уральского государственного университета разработана бескривошипная поршневая машина – двигатель (БПМ(Д)). БПМ(Д) не содержит таких дорогостоящих, технологически сложных, габаритных и массивных деталей “традиционного” ДВС, как коленчатый вал и шатуны. Эта машина в отличие от некоторых других ДВС нетрадиционных схем является обратимой и может быть выполнена в качестве поршневого компрессора или насоса. Конструктивная схема БПМ(Д) и целый ряд технических решений по такой машине защищены более чем 20 патентами и свидетельствами на полезные модели Российской Федерации. Например, [11–13], и др.

Поэтому работы, связанные с решением проблем создания перспективных энерго- и ресурсоэффективных ДВС на основе нетрадиционных конструктивных схем (в частности, бескривошипных тепловых машин) являются актуальными [14].

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА БЕСКРИВОШИПНОЙ МАШИНЫ (ДВИГАТЕЛЯ)

На рис. 1 приведена принципиальная схема механизма преобразования движения (МПД) бескривошипной поршневой машины (двигателя). Другие варианты схем машин такого типа опубликованы, например, в [15, 16].

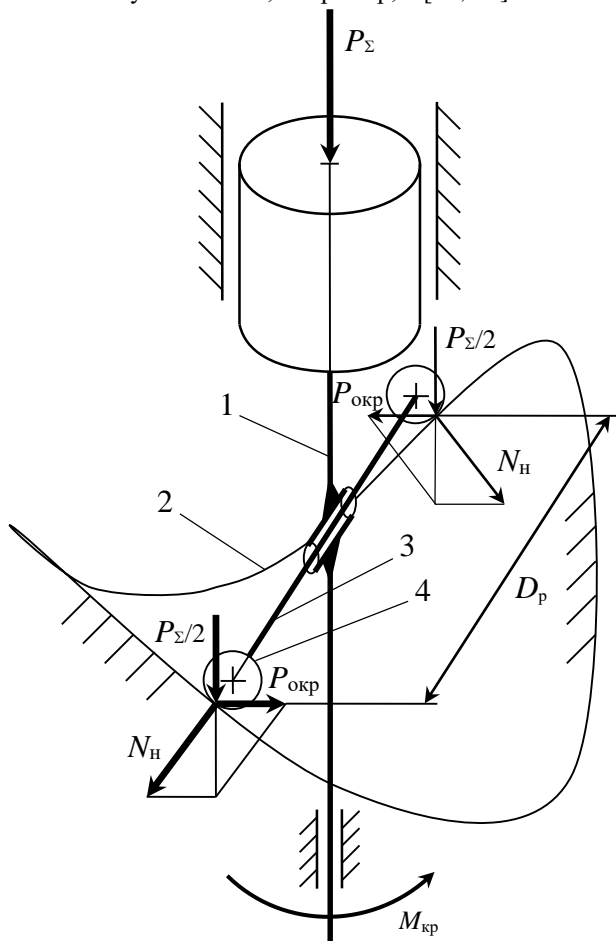


Рис. 1. Принципиальная (изометрическая) схема БПМ(Д) и действующих в нем сил (применительно к случаю двух-периодной беговой дорожки): 1 – шток, связанный с поршнем; 2 – беговая дорожка; 3 – ось каретки МПД (каретка на схеме не показана); 4 – ролики, установленные на оси (в расчетах их радиус принимается равным 0)

Работа такой машины осуществляется следующим образом. При сгорании и расширении рабочего тела газа, находящиеся в цилиндре, заставляют поршень перемещаться из одного крайнего положения в другое. В процессе своего движения поршень посредством центр- или осесимметричных тел вращения (шариков, роликов, подшипников скольжения или качения и т.д.) взаимодействует с беговой дорожкой (БД) криволинейного продольного профиля, выполненной, например, в корпусе машины. Закономерное согласование и синхронизация составляющих полученного таким образом сложного движения обеспечивается соответствующим профилированием беговой дорожки. Вращательная составляющая этого движения передается потребителю механической энергии, соединяемому с выходным валом машины.

На рис. 1 показаны также многоугольники сил, действующих в МПД и приводящих к возникновению крутящего момента на выходном валу машины:

P_{Σ} – суммарная сила, действующая на поршень;

N_n – нормальная сила, действующая перпендикулярно рабочей поверхности БД в точке касания БД и тела вращения МПД;

$P_{окр}$ – окружная сила, действующая в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра, и направленная по касательной к окружности, лежащей в этой плоскости и проходящей через точку касания БД и тела вращения МПД;

D_p – реактивный диаметр – диаметр проекции средней линии БД на плоскость, перпендикулярную оси цилиндра;

$M_{кр}$ – крутящий момент на выходном валу машины.

В случае, показанном на рис. 1, при формировании $M_{кр}$ учитываются два многоугольника сил соответственно конструктивному исполнению МПД, содержащему два тела вращения, взаимодействующих с БД. В общем, в зависимости от количества периодов (“волн”) беговой дорожки, механизм преобразования движения БПМ(Д) может содержать одно, два или более тел вращения. В таких случаях следует учитывать соответствующее число многоугольников сил, формирующих $M_{кр}$.

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БЕСКРИВОШИПНОЙ МАШИНЫ (ДВИГАТЕЛЯ), ВЛИЯЮЩИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Параметры механизма преобразования движения БПМ(Д) отражают кинематические особенности способа преобразования движения, положенного в основу конструкции машины. Следовательно, эти параметры оказывают непосредственное влияние на характеристики машины и, в том числе, на развиваемый ею крутящий момент.

К основным параметрам механизма преобразования движения БПМ(Д) относятся:

S_n – полный ход поршня;

D – диаметр цилиндра;

D_p – реактивный диаметр (см. рис. 1);

N – число периодов БД, равное количеству тел вращения (“точек опоры”) МПД (отметим, что в статье символом N_n обозначается вектор нормального воздействия ролика на поверхность БД);

β – угол наклона БД к плоскости, перпендикулярной оси поршня (цилиндра), определяемый как угол между касательной, проведенной к БД в точке касания БД и тела вращения МПД через точку окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра (рис. 2).

Зависимость угла β от ряда геометрических параметров кинематической схемы БПМ(Д) может быть выражена соотношениями (применительно к случаю синусоидального профиля БД при оговоренных ниже начальных условиях) [17]:

$$\beta = -\arctg \left[2 \left(\frac{S_n}{D_p} \right) \sin 2\alpha \right]; \quad (1)$$

$$\beta = -\arctg [2\mu_\alpha \mu_s \sin 2\alpha]; \quad (2)$$

где $\mu_\alpha = \frac{2}{D_p}$ и $\mu_s = \frac{S_n}{2}$ – масштабные коэффициенты

соответственно горизонтальной и вертикальной трансформации БД, определяющие изменение формы “теоретической” кривой, характеризующей беговую дорожку, в зависимости от реальных геометрических параметров МПД;

α – угол поворота штока (выходного вала) машины;

в записанных выражениях его начальное значение, точка отсчета, полагается равным 0 град. ПГВ (поворота грузового вала), когда поршень находится в верхней мертвой точке (ВМТ).

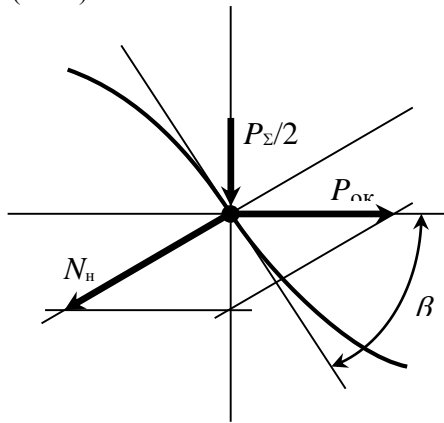


Рис. 2. Схема разложения сил, действующих в точке контакта ролика с поверхностью БД (по оси БД)

В общем случае (при N -периодной БД) выражения (1) и (2) примут вид:

$$\beta = -\arctg \left[N \left(\frac{S_{п}}{D_p} \right) \sin N\alpha \right]; \quad (3)$$

$$\beta = -\arctg [N \mu_{\alpha} \mu_s \sin N\alpha]. \quad (4)$$

Выражения для определения нормальной силы и окружного усилия, действующих на одной точке опоры МПД, имеют соответственно вид:

$$N_{н} = \frac{P_{\Sigma}}{N \cos \beta}; \quad (5)$$

$$P_{окр} = \frac{P_{\Sigma}}{N} \operatorname{tg} \beta. \quad (6)$$

$$P_{\Sigma} = P_r - P_{п} + P_j - \quad (7)$$

результатирующая (суммарная) сила, действующая на поршень бескривошипной машины в процессе ее работы, где P_r – сила давления рабочего тела; $P_{п}$ – сила давления газов в подпоршневой камере; P_j – сила инерции возвратно-поступательно движущихся масс механизма.

Вращающий момент, возникающий на одной точке опоры МПД при расположении всех точек опоры на одном и том же диаметре D_p (который, в частном случае, может быть равен D), определяется по соотношению:

$$M = P_{окр} \frac{D_p}{2} = \frac{D_p}{2N} P_{\Sigma} \operatorname{tg} \beta. \quad (8)$$

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕСКРИВОШИПНОЙ МАШИНЫ (ДВИГАТЕЛЯ) НА УСЛОВИЯ РАБОТЫ МЕХАНИЗМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Анализируя зависимости (1)–(4), можно определить, что с увеличением отношения $S_{п}/D_p$ машины увеличивается и угол β , то есть, тот угол, под которым на рабочую

поверхность беговой дорожки действуют силы, возникающие в преобразующем механизме в процессе работы. Следовательно, увеличение отношения $S_{п}/D_p$ может привести к выходу значения этого угла за допустимые пределы, а следовательно, к нарушению условий работоспособности преобразующего механизма. Таким образом, возникает задача определения области наиболее эффективной работы преобразующего механизма по условиям работоспособности бескривошипной машины (в частности, по параметрам $S_{п}$, D_p , K , N , β).

Результаты проведенного расчетно-теоретического исследования с использованием разработанного логико-математического аппарата позволили установить, что для обеспечения работоспособности машины ход поршня S , диаметр цилиндра D , реактивный диаметр $D_p = K \cdot D$ и число периодов беговой дорожки N должны подчиняться соотношению (см., например, [18]):

$$0,577 \cdot \frac{K}{N} \leq \frac{S_{п}}{D} \leq 1,732 \cdot \frac{K}{N}. \quad (9)$$

Расчетно-теоретические исследования влияния основных конструктивных параметров механизма преобразования движения, участвующих в формировании крутящего момента бескривошипной машины, на условия работы ее механизма позволили предложить полиграф функциональных параметров (ПФП) БПМ(Д). ПФП механизма бескривошипной машины представляет собой многопараметрическую номограмму, отображающую с качественной и количественной точек зрения комплексную взаимосвязь основных функциональных параметров механизма бескривошипной машины. Таких как ход поршня $S_{п}$, диаметр цилиндра D , реактивный диаметр D_p , коэффициент K , максимальные углы наклона беговой дорожки β_{\max} , число периодов беговой дорожки N . ПФП позволяет определять важнейшие конструктивные соотношения и основные геометрические параметры элементов МПД бескривошипных машин на этапах конструирования и проектирования с учетом их класса (размерности), назначения и особенностей эксплуатации. Один из вариантов ПФП (для бескривошипных машин с синусоидальными беговыми дорожками) представлен на рис. 3.

С увеличением D_p при прочих равных условиях (неизменной величине хода поршня, числе периодов беговой дорожки МПД и др.) БД сглаживается. Иными словами, изменяются (уменьшаются) по нелинейной зависимости максимальный и минимальный углы наклона дорожки к плоскости, перпендикулярной оси цилиндра. Это при чрезмерном увеличении D_p может привести к выходу значений угла β_{\max} за допустимые пределы, обеспечивающие работоспособность механизма, и к снижению крутящего момента бескривошипной машины. Обратный результат в отношении β_{\max} и аналогичные следствия применительно к функциональности кинематической схемы дает увеличение числа периодов беговой дорожки N при сохранении других конструктивных параметров БПМ(Д).

Вместе с тем, повышение N при росте значения D_p позволяет обеспечить повышение мощности бескривошипной машины, получаемой за один оборот выходного вала, а значит, и повышение формируемого на валу машины и передаваемого потребителю крутящего момента.

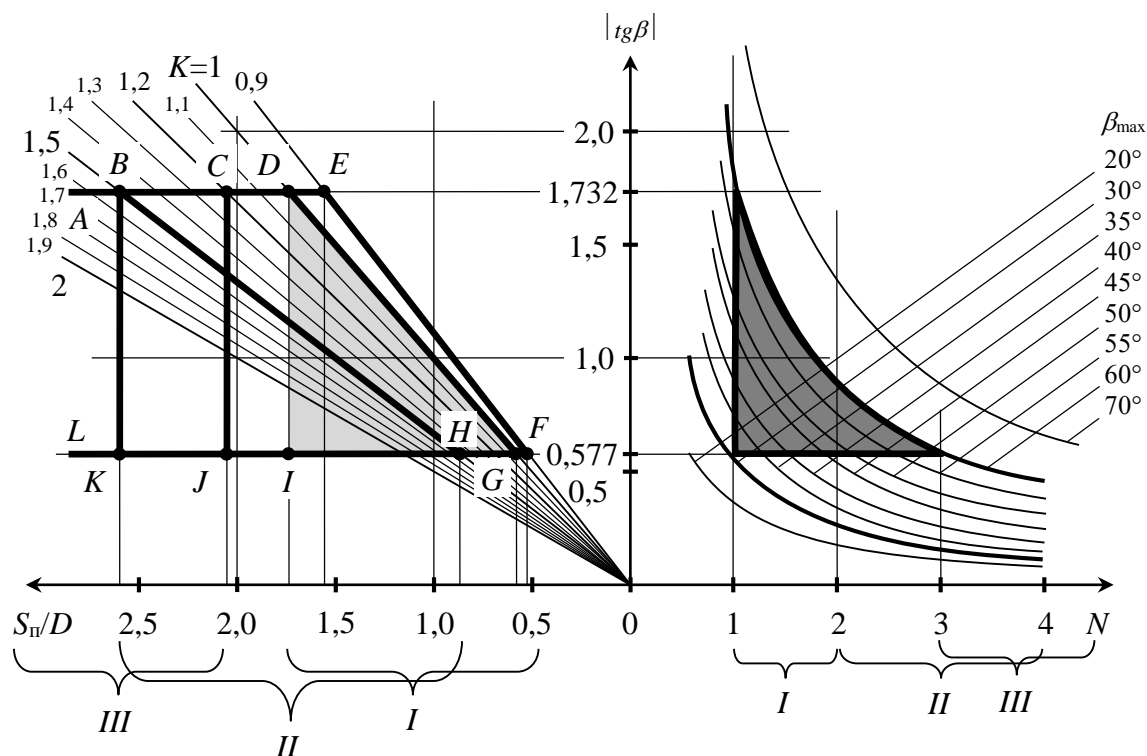


Рис. 3. Полиграф функциональных параметров бескрейшопных машин с синусоидальными беговыми дорожками:

CEFJ – быстроходные ($C_n > 10$ м/с) машины; *BDGK* – машины средней быстроходности (C_n ок. 10 м/с);

ABHL – тихоходные ($C_n < 10$ м/с) машины;

I – машины с относительно невысоким $M_{кр}$ (легконагруженные); *II* – средненагруженные машины;

III – машины с высоким $M_{кр}$ (тяжелонагруженные);

■ – область эффективной работы преобразующего механизма □ – *k*-я рабочая область относительных параметров

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА ВЫХОДНОМ ВАЛУ БЕСКРЕЙШОПНОЙ МАШИНЫ И КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Под сходственными условиями реализации рабочего цикла бескрейшопной машины-двигателя и двигателя с кривошипно-шатунным механизмом полагаем следующее:

- одинаковость конструктивных и технических параметров, а именно: диаметра цилиндра, хода поршня, степени сжатия, числа цилиндров, частоты вращения вала (выходного вала БПМ(Д) или коленчатого);

- сходственность условий, обеспечивающих организацию и протекание процессов рабочего цикла в цилиндре машины (коэффициента избытка воздуха, условий смесеобразования и сгорания и т.д.), и условий использования машины – одинаковость индикаторной нагрузки по величине индикаторной работы цикла.

В традиционных, кривошипно-шатунных, ДВС один полный рабочий цикл может совершаться только в течение одного (в двухтактных двигателях) либо двух (при четырехтактной организации цикла) оборотов коленчатого вала. Особенностью кинематической и конструктивной схем механизма БПМ(Д) является то, что, в отличие от кривошипно-шатунных ДВС, за один оборот выходного вала бескрейшопной машины в ее цилиндре может быть осуществлено большее число рабочих циклов. Следовательно, в БПМ(Д) появляется возможность реализации таких конструктивных решений, которые обеспечивают кратное по-

вышение мощности в сравнении с кривошипно-шатунными ДВС.

В [19, 20] показано, что при равенстве индикаторных работ циклов бескрейшопной машины и “соответствующего” ей кривошипно-шатунного ДВС мощность, развиваемая бескрейшопной машиной, в N раз превышает мощность двигателя с КШМ.

Сказанное справедливо и в отношении крутящего момента, формируемого бескрейшопной машиной. И особенность здесь в том, что $P_{окр}$, формируемое в БПМ(Д) и равное по величине T в ДВС с КШМ, работает “на два плеча” (при прочих равных условиях). Это обстоятельство не только снижает нагрузки в МПД, но и повышает крутящий момент.

При этом пределы повышения крутящего момента БПМ(Д) могут кратно превышать соответствующие возможности двигателей с КШМ. Преимущественно за счет повышения периодичности циклов за счет N и условий формирования $P_{окр}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований сделаны следующие основные выводы и практические рекомендации.

На базе предложенного логико-математического аппарата моделирования кинематических и динамических процессов разработаны алгоритмы расчета, позволяющие выявить особенности влияния различных конструктивных ре-

шений механизма преобразования движения на характеристики бескривошипных машин применительно к различным условиям их использования. Показано, что при прочих равных условиях в бескривошипной машине может быть реализован существенно больший крутящий момент, чем в двигателе, выполненном по традиционной (кривошипно-шатунной) схеме. Так, например, крутящий момент бескривошипного четырехтактного двигателя с двухпериодной беговой дорожкой при прочих равных условиях в два раза выше, чем крутящий момент соответствующего кривошипно-шатунного четырехтактного двигателя.

БПМ(Д) допускает относительно простую по отношению к традиционным (кривошипно-шатунным) двигателям конструктивную реализацию высокомоментных, высоконагруженных по условиям использования машин. В том числе низкооборотных, большой размерности и т.д.

В зависимости от класса, назначения и особенностей использования бескривошипных машин рекомендуется применять следующие соотношения реактивного диаметра и диаметра цилиндра:

– для высокооборотных и (или) легконагруженных по условиям совместной работы с потребителем механической энергии машин целесообразно применение механизмов преобразования движения с одно- или двухпериодными беговыми дорожками при $D_p \approx D$ (см. также рис. 3, области I, *CEFG*);

– для низкооборотных, высоконагруженных, высокомоментных машин наиболее рационально использование в преобразующих механизмах многопериодных (с числом периодов три, четыре и более) беговых дорожек при $D_p = 1,5 \dots 2 D$ (см. также рис. 3, области III, *ABHL*);

– в других случаях может оказаться рациональным применение двухпериодных преобразующих механизмов при возможном числе беговых дорожек от одной до трех с $D_p = 1 \dots 1,5 D$ (см. также рис. 3, области II, *BDGK*).

При определении области наиболее эффективной работы бескривошипных машин по условию работоспособности МПД и эффективного формирования крутящего момента установлено, что максимальный угол наклона беговой дорожки к плоскости, перпендикулярной оси цилиндра, на участках сжатия рабочего тела не должен превышать 60° , а на участках расширения не должен быть меньше 30° . В случае выхода значения этого угла за установленные пределы в интервале соответственно $\pm 4 \dots 6^\circ$ преобразующий механизм машины переходит в режим самотормозения. Дальнейшее увеличение предельных отклонений данного угла от названных пределов ведет к прекращению нормального функционирования преобразующего механизма ввиду невозможности осуществления движения основных силовых элементов кинематической цепи машины независимо от величины действующих на эти элементы механизма сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. Viebe I.I. Brennverlauf und Kreisprozeß von Verbrennungsmotoren. – Berlin: Vebverlagstechnik, 1970. – 275 p.
2. Viebe I.I. Elektronische Analyse der Arbeitsspiele von Verbrennungsmotoren. / Viebe I.I., Farafontov M.F. // Kraftfahrzeugtechnik. – 1967. – Hf. 10.

3. Axial Internal-Combustion Engines: <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/unusualICeng/axial-ICeng/axial-IC.htm>

4. Rotary Internal-Combustion Engines: <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/unusualICeng/rotaryIC/rotaryIC.htm>

5. Special Types of Internal Combustion Engines: <http://gluedideas.com/encyclopedia-britannica-volume-12-part-1-hydrozoa-jeremy/Special-Types-of-Internal.html>

6. Crankless. A new efficient mechanical transmission: <http://crankless.net/index.html>

7. Newcastle University. Free Piston Engine Project: <http://www.free-piston.eu>

8. The Rotary Engine: http://www.wankelsuper-tec.de/en_engine.html

9. Bensing W.D. Rotationskolben. / Berlin: Springer-Verlag, New York: Heidelberg, 1973. – 156 p.

10. Бирюков Б.Н. От водяного колеса до квантового ускорителя. – М.: Машиностроение, 1990. – 143 с.

11. Шароглазов Б.А., Пономарев А.В., Иванов Г.И. Бесшатунный двигатель внутреннего сгорания. Патент России № 5063986. 1996. Бюл. № 10.

12. Шароглазов Б.А., Клементьев В.В., Баранов П.Н. Бесшатунный двигатель внутреннего сгорания с вращающимися поршнями. Патент России № 96117967/06. 19 98. Бюл. № 22.

13. Шароглазов Б.А., Клементьев В.В. Поршневая машина для транспортировки (перекачки) газообразных и жидких агентов (варианты). Патент России № 2002121849/06. 2003. Бюл. № 26.

14. Клементьев В.В. Перспективы применения в поршневых ДВС нового способа преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращение вала / В.В. Клементьев // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: Тр. Междунар. науч.-техн. конф., 23–25 апр. 2003 г. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2003. – С. 34–37.

15. Шароглазов Б.А. Бескривошипная поршневая тепловая машина-двигатель: кинематика, рабочий цикл, показатели цикла: монография. / Б.А. Шароглазов, А.В. Гофман. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 71 с.

16. Шароглазов Б.А. Поршневая тепловая машина для преобразования энергии и производства работы на транспорте / Б.А. Шароглазов, А.В. Гофман // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение, 2014. – Т.14. – № 1. – С. 5–11.

17. Клементьев В.В. Кинематика и динамика нетрадиционной бескривошипной поршневой тепловой машины: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2002. – 23 с.

18. Шароглазов Б.А. О некоторых технических требованиях к конструктивным элементам нетрадиционной бескривошипной поршневой тепловой машины / Б.А. Шароглазов, В.В. Клементьев // Деп. в ВИНТИ 23. 12. 99, № 3818 – В 99.

19. Шароглазов Б.А. Аналитическая оценка соотношений основных показателей рабочего цикла поршневых кривошипно-шатунных и бескривошипных ДВС в сходствен-

ных условиях использования / Б.А. Шароглазов, М.К. Куанышев, К.Д. Подседов // Транспорт Урала. – 2018. – №1(56). – С. 45–48.

20. Sharoglazov B.A. The mechanism of transformation of movements of a piston engine two-stroke-engine and the char-

acteristic of operating on its elements of strength / B.A. Sharoglazov., A.V. Gofman // International Conference on Industrial Engineering. – Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 526–534.

Influence of the Main Design Parameters of the Motion Conversion Mechanism of a Crankless Reciprocating Machine (Engine) on the Torque Value on the Output Shaft under the Conditions for the Implementation of the Working Cycle Similar to Crank-Rocker ICEs

Sharoglazov B.A., Klementev V.V.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education South Ural State University

(National Research University)

Chelyabinsk, Russia

sharoglazovba@susu.ru, klementevvv@susu.ru

Abstract. The paper describes the solution of the problem of determining the relationship of the main design parameters of the motion conversion mechanism with the design and technical parameters of a crankless reciprocating machine (engine) and identifying the influence of these parameters on the machine performance, as well as the value of the developed torque on the output shaft as compared to the crank-rocker internal combustion engine. The comparison is made based on the similarity (identity of the parameters characterizing the conditions for the implementation of the working cycle of a heat engine) of the working processes flowing in a cylinder of a crankless machine and a crank-rocker

engine. A conclusion is made on the advantage of the crankless machine concerning the design of high-torque engines. Practical recommendations are given on the choice of design parameters depending on the technical requirements, the purpose and sphere of application of the crankless machine.

Keywords: heat engine, internal combustion engine, crankless engine, working cycle, torque, conversion mechanism, design parameter.

Особенности движения маятника на вращающемся валу двигателя механической системы

Артюнин А.И., Барсуков С.В.

Иркутский государственный университет путей
сообщения
Иркутск, Россия
bars_irkutsk@mail.ru, Artunina2107@yandex.ru

Суменков О.Ю.

Томский политехнический университет
Томск, Россия

Аннотация. Проведено механико-математическое моделирование движения маятника, установленного с возможностью свободного вращения на валу ротора электродвигателя, закрепленного в корпусе на упругих опорах. Выявлены особенности движения маятника в диапазоне от нуля до заданной величины угловой скорости ротора электродвигателя при наличии в этом диапазоне собственных частот колебаний механической системы. Установлено, что при изменении момента трения в опоре маятника или массы маятника возможен такой режим движения, когда ротор вращается с заданной угловой скоростью, в угловая скорость вращения маятника равна одной из собственных частот колебаний механической системы. Проведенные исследования подтвердили результаты ранее проведенного натурального эксперимента о возможности проявления эффекта “застревания” маятника на вращающемся валу механической системы.

Ключевые слова: механическая система, собственная частота, угловая скорость, маятник, эффект “застревания”.

ВВЕДЕНИЕ

Во все времена замечательным объектом исследований и практического применения в механике является маятник. Маятник был предметом исследования основателей механики Галилея, Ньютона, Гюйгенса [1, 2].

Маятник является основным элементом механических часов. Маятник Фуко используется в эксперименте для доказательства вращения Земли, маятник Фроуда иллюстрирует возможность появления автоколебаний. Крутильный маятник применяется в эксперименте по определению плотности Земли и гравитационной постоянной. Исследования движения маятника с малыми углами отклонения положили начало линейной теории колебаний механических систем, а с большими углами отклонений – созданию нелинейной теории колебаний.

В настоящее время работы, посвященные изучению движения маятника, можно условно разделить на две группы. В первой группе представлены исследования движения маятника на вибрирующем основании [3–10]. В другой группе расчет движения маятника является апробацией методов исследования нелинейных колебаний механических систем [11–16].

Маятник является также основным элементом обобщенной модели вибрационной нелинейной механики, предложенной в работе [17]. Частными случаями обобщенной модели в этой работе являются: модель для изучения явления устойчивости верхнего положения маятника на

вибрирующем основании [3]; модель для исследования процесса автоматической балансировки ротора с помощью маятников [18].

Основанием для проведения настоящей работы послужили результаты экспериментальных исследований движения маятника на вращающемся валу [19, 20].

В этих работах использовалась экспериментальная установка, изображенная на рис. 1, которая представляла собой электродвигатель 1, закрепленный на металлической пластине 2, которая в свою очередь крепилась с помощью 4-х пружин 3, на неподвижном основании 4. На валу двигателя с возможностью свободного вращения устанавливался маятник 5. Маятник состоял из стержня с резьбой для навешивания грузов, металлического кольца и подшипника качения. Для измерения угловой скорости вращения маятника и двигателя использовался оптический тахометр 6. Данная механическая система в плоскости, перпендикулярной плоскости вала электродвигателя, имела три собственные частоты колебания: $k_1 = 44,0$ рад/с; $k_2 = 100,5$ рад/с; $k_3 = 123,1$ рад/с. Эти частоты колебаний механической системы были меньше частоты вращения вала электродвигателя $\omega = 157,0$ рад/с.

Суть эксперимента заключалась в измерении угловой скорости маятника на вращающемся валу двигателя при различных моментах инерции массы маятника. В результате эксперимента при постоянном моменте трения в опоре маятника было установлено следующее. При моменте инерции в диапазоне $256,8 \leq I \leq 281,2$ г \times см², маятник вращался вместе с валом электродвигателя, и его угловая скорость равнялась $\omega = 157,0$ рад/с. При моменте инерции маятника в диапазоне $304,0 \leq I \leq 369,8$ г \times см² угловая скорость вращения маятника составила $\dot{\varphi} = 118,2$ рад/с, которая с точностью эксперимента равна третьей собственной частоте колебаний механической системы $k_3 = 123,1$ рад/с. При моменте инерции маятника в диапазоне $394,5 \leq I \leq 506,3$ г \times см² его угловая скорость вращения составила $\dot{\varphi} = 100,5$ рад/с. Это значение угловой скорости совпало со второй собственной частотой колебаний нашей механической системы $k_2 = 100,5$ рад/с. При моменте инерции маятника в диапазоне $531,0 \leq I \leq 603,2$ г \times см² угловая скорость вращения маятника составила $\dot{\varphi} = 44,0$ рад/с.



Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 – электродвигатель; 2 – металлическая пластина 3 – пружины; 4 – неподвижное основание; 5 – маятник; 6 – оптический тахометр

Это значение угловой скорости совпало с первой собственной частотой колебаний механической системы $k_1 = 44,0$ рад/с.

Таким образом, при постоянном моменте трения в опоре маятника и при изменении момента инерции его массы имеет место такой режим движения, при котором ротор вращается с угловой рабочей скоростью, а угловая скорость маятника близка или совпадает с одной из частот колебаний механической системы. Это новое явление было названо эффектом “застревания” маятника на вращающемся валу.

Целью настоящей работы является механико-математическое моделирование движения маятника на вращающемся валу двигателя механической системы для выявления эффекта “застревания” маятника, установленного в экспериментальных исследованиях [19, 20].

ВЫБОР И ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С МАЯТНИКОМ НА ВРАЩАЮЩЕМСЯ ВАЛУ

Для исследования была выбрана модель (рис. 2), которая представляет собой корпус как твердое тело симметричной кубической формы, который закреплен на неподвижном основании с помощью симметрично расположенных четырех вертикальных и четырех горизонтальных невесомых упругих опор. В корпусе установлен уравновешенный ротор с валом. На валу ротора установлен маятник с возможностью вращения относительно вала. Ось вращения ротора проходит через центр масс корпуса (точка O_1 на рис. 2). На рис. 2 также изображены демпферы, условно обозначающие наличие сопротивления, пропорционального скорости движения корпуса.

Движение модели будем изучать по отношению к неподвижной системе координат $Oxyz$, начало которой (точка O) совпадает с центром масс корпуса в положении его статического равновесия. Будем также считать, что движение вдоль оси z и поворот вокруг осей x, y, z отсутствуют. Тогда для описания движения модели можно использовать

три обобщенных координаты: x_1, y_1 – перемещения центра масс корпуса, θ_1 – вращение ротора. Кроме того, угол отклонения маятника от его нижнего положения обозначим ϕ .

Для вывода дифференциальных уравнений движения модели используем уравнения Лагранжа 2-го рода в следующей форме:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} + Q_{\phi} \quad (1)$$

В этом уравнении: T – кинетическая энергия механической системы; q_i – обобщенная координата; Π – потенциальная энергия механической системы; Φ – функция Релея (функция рассеивания); $Q_{\phi} = k(\omega - \dot{\phi})$.

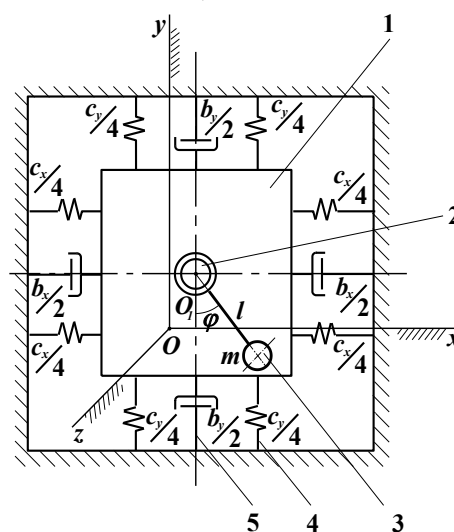


Рис. 2. Модель механической системы с маятником на вращающемся валу

1 – корпус (точка O_1 – центр масс корпуса и ротора); 2 – ротор; 3 – маятник; 4 – невесомые упругие опоры; 5 – демпферы

Здесь ω – угловая скорость ротора; $\dot{\phi}$ – угловая скорость маятника; ω – коэффициент сопротивления относительно вращению маятника на валу ротора.

При выбранных обобщенных координатах выражение для кинетической энергии модели, которая складывается из кинетической энергии корпуса, кинетической энергии ротора и кинетической энергии маятника, имеет вид:

$$T = \frac{1}{2}M(\dot{x}_1^2 - \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2}I_p\omega^2 + ml(\dot{x}_1\dot{\phi}\cos\phi + \dot{y}_1\dot{\phi}\sin\phi) + \frac{1}{2}ml\dot{\phi}^2.$$

В этом выражении $M = M_1 + M_2 + m$ (M_1 – масса корпуса, M_2 – масса ротора, m – масса маятника), I_p – момент инерции ротора, l – длина маятника.

Выражение для потенциальной энергии Π складывается из потенциальной энергии деформации упругих опор в горизонтальном и вертикальном направлениях и потенциальной энергии сил тяжести корпуса, ротора и маятника. Выражение для потенциальной энергии с учетом условия статического равновесия будет иметь вид:

$$\Pi = \frac{1}{2}c_x x_1^2 + \frac{1}{2}c_y y_1^2 + mgl \cos\phi.$$

Здесь c_x, c_y – суммарная жесткость невесомых опор в горизонтальном и вертикальном направлениях; g – ускорение свободного падения.

Выражение для функции Релея при наличии демпфирования корпуса будет иметь вид:

$$\Phi = \frac{1}{2}b_x \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}b_y \dot{y}_1^2,$$

где b_x, b_y – коэффициенты сопротивления движению корпуса в горизонтальном и вертикальном направлениях.

После выполнения процедуры Лагранжа (1) получим систему трех дифференциальных уравнений для описания движения модели.

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_1 + ml\ddot{\phi}\cos\phi &= ml\dot{\phi}^2\sin\phi - c_x x_1 - b_x \dot{x}_1; \\ M\ddot{y}_1 + ml\dot{\phi}\sin\phi &= -ml\dot{\phi}^2\cos\phi - c_y y_1 - b_y \dot{y}_1; \\ ml^2\ddot{\phi} + ml\ddot{x}_1\cos\phi + ml\ddot{y}_1\sin\phi &= k(\omega - \dot{\phi}) - mgl\sin\phi. \end{aligned} \quad (2)$$

Суть настоящего исследования заключалась в нахождении закона разгона маятника при различных значениях коэффициента трения k при численном интегрировании уравнений (2), которое осуществлялось в среде программирования Borland Delphi. Результаты математического моделирования разгона маятника при различных значениях коэффициента трения k представлены на рис. 3.

Численный эксперимент выполнялся при следующих исходных данных: $M_1 = 8$ кг; $M_2 = 2$ кг; $m = 0,020$ кг; $l = 0,221$ м; $c_x = 1 \cdot 10^5$ Н/м; $c_y = 4 \cdot 10^5$ Н/м; $b_x = b_y = 100$ Н·с/м; $0,142 \cdot 10^{-3} \leq k \leq 0,01$ Н·м·с.

Принятые исходные параметры задают две собственные частоты колебаний исследуемой механической системы:

$$k_1 = \sqrt{c_x / M} = 100 \text{ рад/с}; \quad k_2 = \sqrt{c_y / M} = 200 \text{ рад/с}.$$

Принято также, что при $0 \leq t \leq 10$ с угловая скорость ротора изменялась по закону $\omega = 30t$, а при $t > 10$ с угловая скорость имела постоянное значение $\omega = 300$ рад/с.

Первый эксперимент: коэффициент трения k изменялся от 0 до $0,142 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с. В этом случае маятник сразу или, совершив несколько оборотов, отклонялся на некоторый угол от нижнего положения, совершая малые колебания относительно этого положения.

Второй эксперимент: коэффициент трения k изменялся от $0,143 \cdot 10^{-3}$ до $0,494 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с. В этом случае маятник вначале сохранял свое неподвижное состояние как в первом эксперименте, а потом “увлекался” валом во вращение и его угловая скорость составляла $\dot{\phi} = 100$ рад/с (кривая 1 на рис. 3), которая равна первой собственной частоте колебаний механической системы. При дальнейшем увеличении коэффициента трения k уменьшалось время задержки вращения маятника.

Предельное значение коэффициента, при котором еще сохранялось устойчивое вращение маятника с угловой скоростью $=100$ рад/с составило $0,494 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с.

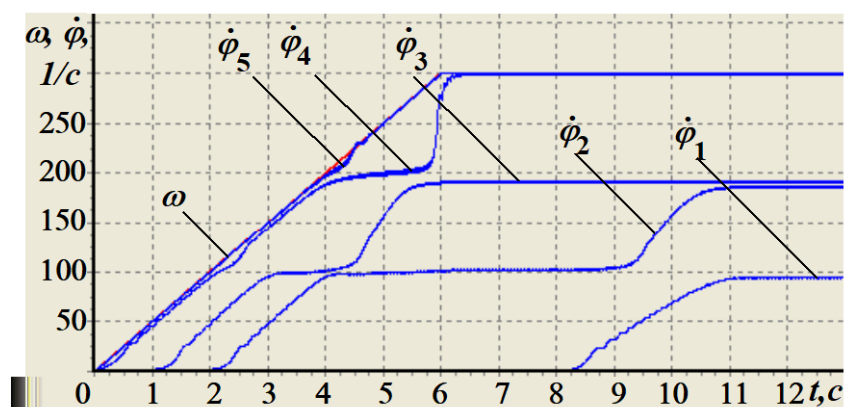


Рис. 3. Законы движения маятника при различных значениях коэффициента трения k :
1 – при $0,143 \cdot 10^{-3} < k \leq 0,494 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с; 2, 3 – при $0,494 \cdot 10^{-3} < k \leq 0,01$ Н·м·с; 4, 5 – при $0,01 < k$ Н·м·с

Предельное значение коэффициента k , при котором еще сохранялось устойчивое вращение маятника с угловой скоростью $\dot{\varphi} = 100$ рад/с составило $0,494 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с.

Третий эксперимент: коэффициент трения k изменялся от $0,494 \cdot 10^{-3}$ до $0,01$ Н·м·с. В этом диапазоне угловая скорость маятника вначале с задержкой порядка 4 секунд достигала угловой скорости $\dot{\varphi} = 100$ рад/с, которая равна первой собственной частоте колебаний механической системы. Спустя 9 секунд маятник разогнался и начинал вращаться с угловой скоростью $\dot{\varphi} = 200$ рад/с, которая равна второй собственной частоте колебаний системы (кривая 2 на рис. 3).

При плавном увеличении коэффициента трения k маятник с меньшей задержкой увлекался во вращение ротором двигателя и раньше переходил с первой собственной частоты колебаний механической системы (100 рад/с) на вторую частоту (200 рад/с).

Предельный режим, при котором маятник еще переходил с первой частоты на вторую показан на рис. 3 (кривая 3).

Четвертый эксперимент: коэффициент трения k принимал значения более $0,01$ Н·м·с. Маятник разогнался до угловой скорости $\dot{\varphi} = 300$ рад/с, то есть до скорости вращения ротора $\omega = 300$ рад/с и вращался далее вместе с ротором (кривые 4, 5 на рис. 3).

Линия $\omega(t)$ на этом рисунке показывает изменение угловой скорости ротора по времени.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАССЫ МАЯТНИКА НА ЕГО УГЛОВУЮ СКОРОСТЬ

Также как в предыдущем разделе исследование заключалось в нахождении закона разгона маятника с различными значениями его массы m при численном интегрировании уравнений (2). Результаты математического моделирования разгона маятника при различных значениях его массы представлены на рис. 4. Численный эксперимент проведен при тех же значениях массы ротора и корпуса, при тех же значениях коэффициентов жесткости и демпфи-

рования, при том же режиме разгона ротора, что и в предыдущих исследованиях. Коэффициент трения в опоре маятника принимался $k = 0,1 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с.

Первый эксперимент: масса маятника не превышала $0,060$ кг. В этом случае маятник отклонялся на некоторый угол, совершая малые колебания относительно этого положения равновесия.

Второй эксперимент: масса маятника изменялась в диапазоне $0,020 \leq m \leq 0,060$ кг. В этом случае маятник вначале сохранял свое неподвижное состояние как в первом эксперименте, а далее через 8 секунд после начала движения ротора разогнался и начинал вращаться с угловой скоростью $\dot{\varphi} = 100$ рад/с, равной первой собственной частоте колебаний механической системы (кривая 1 на рис. 4).

Третий эксперимент: масса маятника изменялась в диапазоне $0,005 \leq m < 0,020$ кг. Здесь маятник разогнался и начинал вращаться с угловой скоростью $\dot{\varphi} = 200$ рад/с, которая равнялась второй собственной частоте колебаний механической системы (кривая 2 на рис. 4).

Четвертый эксперимент: при массе маятника $m < 0,005$ кг он разогнался до угловой скорости $\dot{\varphi} = 300$ рад/с, то есть до скорости вращения ротора $\omega = 300$ рад/с и вращался вместе с ротором (кривая 3 на рис. 4). Закон разгона ротора на этом рисунке обозначен цифрой 4.

Выводы

В результате численного моделирования движения маятника на вращающемся валу ротора электродвигателя, закрепленного в корпусе на упругих опорах, установлено, что при изменении трения в опоре маятника или массы маятника возможен такой режим движения, когда ротор вращается с заданной угловой скоростью, а угловая скорость вращения маятника равна одной из собственных частот колебаний механической системы. Таким образом, результаты численного эксперимента с выбранной моделью подтвердили возможность появления эффекта “застревания” маятника на вращающемся валу механической системы, установленного в натурном эксперименте [19, 20].

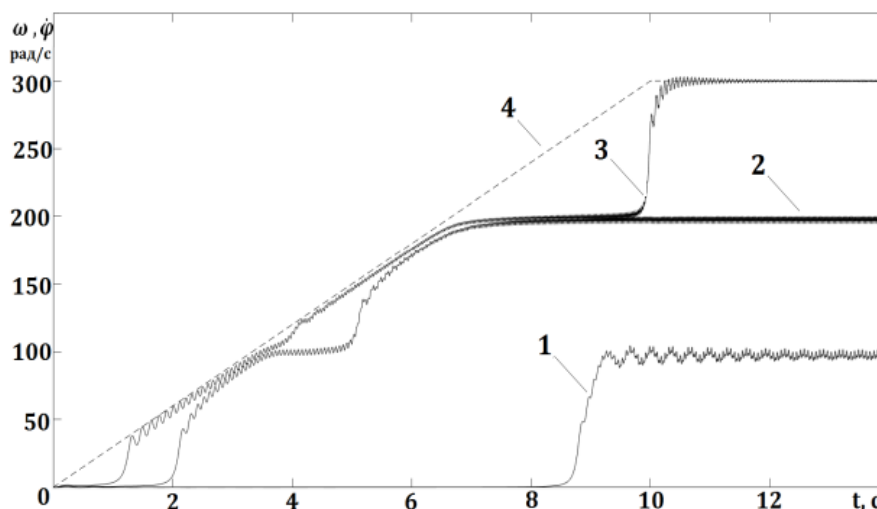


Рис. 4. Законы движения маятника при разной его массе:

1 – при $0,020 \leq m \leq 0,060$ (кг); 2 – при $0,005 \leq m < 0,020$ (кг); 3 – при $m < 0,005$ (кг); 4 – закон разгона ротора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. – М.: ЛЕНАНД, 2017. – 707 с.
2. Гюйгенс Х. Три мемуара по механике. – М.: АН СССР, 1951. – 578 с.
3. Капица П.А. Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса. // ЖЭТФ, – 1951. – Т.21, Вып. 5. – С. 588-597.
4. Рагульскис К.М. Механизмы на вибрирующем основании. – Каунас: Институт энергетики и электротехники. АН Лит. ССР, 1963. – 232 с.
5. Валеев К.Г. О динамической стабилизации маятника. / К.Г. Валеев, В.В. Доля // Прикладная механика. – 1974. – Т. 10, №2. – С. 88-99.
6. Челомей В.Н. Избранные труды. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
7. Стрижак Т.Г. Методы исследования динамических систем типа “маятник”. – Алма-Ата: Наука, 1991. – 253 с.
8. Бардин Б.С. Об устойчивости равновесия маятника при вертикальных колебаниях точки подвеса / Б.С. Бардин, А.П. Маркеев // Прикладная математика и механика. – 1995. – Т. 9, №6. – С. 922-929.
9. Морозов А.Д. К задаче о маятнике с вибрирующей точкой подвеса // Прикладная математика и механика. – 1995. – Т. 59, №4. – С. 590-598.
10. Сейранян А.А. Об устойчивости перевернутого маятника с вибрирующей точкой подвеса / А.А. Сейранян, А.М. Сейранян // Прикладная математика и механика. – 2006. – Т. 70, №5. – С. 835-843.
11. Малкин И.А. Некоторые задачи теории нелинейных колебаний. – М.: Гостехиздат, 1951. – 401 с.
12. Боголюбов Н.Н. Асимптотические методы в теории

нелинейных колебаний. / Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. – М.: Наука, 1974. – 501 с.

13. Моисеев Н.Н. Асимптотические методы нелинейной механики. – М.: Наука, 1969. – 380 с.

14. Волосов В.М. Метод осреднения в теории нелинейных систем. / В.М. Волосов, Б.И. Моргунов. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1971. – 509 с.

15. Гребенников Е.А. Метод усреднения в прикладных задачах. – М.: Наука, 1986. – 255 с.

16. Блехман И.И. Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.

17. Артюнин А.И. Обобщенная модель вибрационной нелинейной механики и эффект “застревания” маятника на резонансных частотах механической системы / А.И. Артюнин, А.П. Хоменко, С.В. Елисеев, Ю.В. Ермошенко // Машиностроение и инженерное образование. – 2015. – №1. – С. 61-67.

18. Артюнин А.И. Исследование движения ротора с автобалансиром // Известия ВУЗ. «Машиностроение». – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. – №1. – С. 15-19.

19. Артюнин А.И. Экспериментальные исследования эффекта “застревания” маятника на резонансных частотах механической системы / А.И. Артюнин, Ю.В. Ермошенко, С.И. Попов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – №2(46). – С. 20-25.

20. Artyunin A.I. Experimental Studies on Influence of Natural Frequencies of Oscillations of Mechanical system on Angular Velocity of Pendulum of Rotating shaft / A.I.Artyunin, S.V.Eliseev, O.Y. Sumenkov // Dynamics of Machines and Lecture Notes. Working Processes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 4th Integrational Conference on Industrial Engineering ICIE 2018. – p-p. 159–166.

Peculiarities of the Motion of the Pendulum on the Rotating Shaft of the Engine of the Mechanical System

Artyunin A.I., Barsukov S.V.

Irkutsk State Transport University
Irkutsk, Russia

bars_irkutsk@mail.ru, Artunina2107@yandex.ru

Sumenkov O.Yu.

Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia

Abstract. The authors carried out the mechanical and mathematical modeling of the motion of a pendulum mounted with the possibility of free rotation on the rotor shaft of an electric motor fixed in a housing on elastic supports. The peculiarities of the motion of the pendulum within the range from zero to a given value of the angular velocity of the rotor of the electric motor with the presence in this range of natural frequencies of oscillations of the mechanical system are revealed. It is established that when changing the friction moment in the pendulum support, a mode of movement is possible when the rotor rotates with a given angular velocity, and the angular velocity of the pendulum rotation is equal to

one of the natural frequencies of the mechanical system. The results of a numerical experiment conducted for the first time in a mechanical and mathematical modeling of the motion of a pendulum on a rotating shaft confirmed the results of a previous full-scale experiment on the possible emergence of a pendulum “sticking” effect for mechanical systems of a general form.

Keywords: Mechanical system, Natural frequency, Angular velocity, Pendulum, “Sticking” effect.

О расщеплении изгибного частотного спектра геометрически несовершенных оболочек

Серёгин С.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
Комсомольск-на-Амуре, Россия
Seregina-komsHome@yandex.ru

Аннотация. Актуальность исследования проблем деформирования и прочности связана с применением тонких круговых цилиндрических оболочек в конструкциях, работающих в интенсивных динамических режимах. Основное внимание при изучении сложных проблем динамики уделяется решению задач свободных колебаний конструктивных элементов. Реальные оболочечные конструкции имеют неизбежные отклонения от идеальной круговой формы (начальные несовершенства, возникающие при изготовлении на производстве или образовавшиеся в условиях эксплуатации). Известно, что они приводят к специфическим явлениям при колебаниях оболочек. В настоящей статье исследуется влияние начальных отклонений от идеальной круговой формы на собственные динамические характеристики тонкой круговой цилиндрической оболочки. Обнаружено возникновение новых зон расщепления изгибного частотного спектра несовершенных оболочек. Полученные ранее автором результаты для изолированного кольца обобщаются на случай колебаний оболочки уже конечной длины.

Ключевые слова: колебания, оболочка, несовершенства.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования проблем деформирования и прочности связана с применением тонких круговых цилиндрических оболочек в конструкциях, работающих в интенсивных динамических режимах [1-3]. Основное внимание при изучении сложных проблем динамики уделяется решению задач свободных колебаний конструктивных элементов [4-6]. Реальные оболочечные конструкции имеют неизбежные отклонения от идеальной круговой формы (начальные несовершенства – $w_0(x, y)$), возникающие при изготовлении на производстве или образовавшиеся в условиях эксплуатации. Известно, что $w_0(x, y)$ приводят к специфическим явлениям при колебаниях оболочек [7].

Во многих исследованиях использовались различные теории и подходы к решению данной проблемы [8, 9]. В одних работах начальные несовершенства формы увеличивают расщепленные собственные частоты колебаний оболочки [10] по сравнению с частотами колебаний оболочки с идеальной геометрической формой, в других – уменьшают ее [11]. Однако все исследования приводят к одному и тому же результату: расщепление изгибного частотного спектра геометрически несовершенной оболочки возни-

кает в том случае, когда начальные несовершенства находятся как бы в резонансе с формой ожидаемого прогиба или повторяют ее [8–11].

В работах [12–16] на примере более простой (предельной) задачи колебаний бесконечно длинной круговой цилиндрической оболочки – кольца, находящегося в условиях плоской деформации показано, что расщепление спектра частот имеет место не только в случае, когда число формирующих волн равно числу волн несовершенств формы оболочки $n_0 = n$, как это принято считать в настоящее время [8–11], но и в том случае, когда число формирующих волн в два раза меньше волн несовершенств формы $n_0 = n / 2$.

Настоящая работа является продолжением исследований [12–16], в том плане, что полученные результаты для изолированного кольца обобщаются на случай колебаний оболочки уже конечной длины.

ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ НЕСОВЕРШЕННОЙ ОБОЛОЧКИ

Методом конечных элементов в MSC Nastran смоделирована и решена задача свободных колебаний шарнирно закрепленной по торцам оболочки со следующими геометрическими и физическими характеристиками: радиус оболочки $R = 1$ м, $R / h = 200$, где h – толщина стенки; относительная длина оболочки $l / R = 10$; модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м²; массовая плотность $\rho = 7800$ кг/м³; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Число конечных элементов – 157000. Наименьшей частоте спектра 12,5 Гц для идеальной оболочки с такими параметрами соответствует число окружных динамических волн $n_{\min} = 3$.

Пусть оболочка имеет отклонения от идеальной круговой формы w_0 , повторяющие форму ожидаемого динамического прогиба при ее колебаниях:

$$w_0(x, y) = f_0 \sin(\beta_1 y + \varphi_0) \sin \alpha x = (f_{10} \sin \beta y + f_{20} \cos \beta y) \sin \alpha x,$$

где $f_{10} = f_0 \cos \varphi_0$; $f_{20} = f_0 \sin \varphi_0$; $\beta = n_0 / R$; $\alpha = \pi / l$; x, y – координаты по длине и окружности оболочки; f_0 – амплитуда начальных отклонений $f_0 = h$; φ_0 – начальный угол отсчета. Изучаются колебания вблизи зоны основного резонанса.

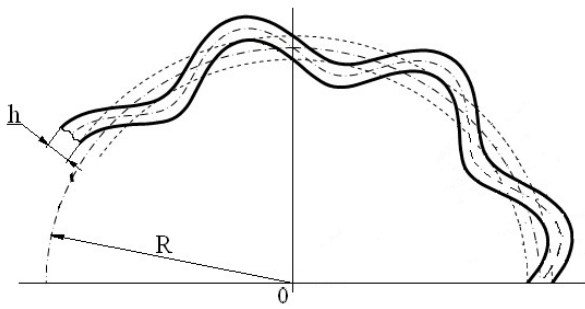


Рис. 1. Схематическое изображение рассматриваемых несовершенств оболочки

Результаты расчета при $n_0 = 8$ приведены на рисунке, где сплошной линией обозначена большая из расщепленных безразмерных собственных частот колебаний несовершенной оболочки $\Omega_{n2} = \lambda_{n2}/\lambda_n$ (λ_{n2} – абсолютное значение большей из расщепленных собственных частот; λ_n – абсолютное значение частоты колебаний идеальной оболочки), штриховой – меньшая из расщепленных безразмерных собственных частот $\Omega_{n1} = \lambda_{n1}/\lambda_n$ (λ_{n1} – абсолютное значение меньшей из расщепленных частот), пунктирной – безразмерная частота колебаний идеальной оболочки $\Omega_n = \lambda_n/\lambda_n = 1$.

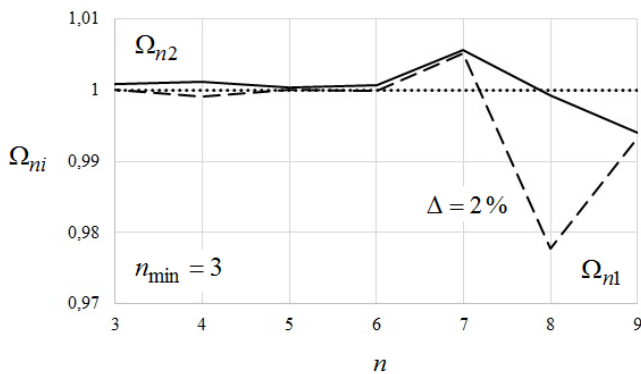


Рис. 2. Расщепленные частоты несовершенной оболочки $l/R = 10$

Как видим (см. фиг.2), расщепление изгибного частотного спектра $\Delta = \Omega_{n2} - \Omega_{n1}$ имеет место не только в случае, когда число формообразующих волн равно числу волн несовершенств формы оболочки $n_0 = n$ (в данном случае $n_0 = n = 8$), как это принято считать в настоящее время [8–11], но и в случае, когда число формообразующих волн в два раза меньше волн несовершенств формы $n_0 = n/2$ (в данном случае $n_0 = n/2 = 4$). В первом случае $n_0 = n$ большая из расщепленных собственных частот Ω_{n2} равна частоте колебаний оболочки с идеальной геометрической формой, меньшая – ниже ее. Данное обстоятельство подтверждает выводы работ [17–18], в которых использовался уточненный подход к построению математической модели колебаний оболочек с динамической асимметрией [7,19].

Расстройка частотного спектра незначительна $\Delta = \Omega_{n2} - \Omega_{n1} = 2\%$. Однако данные выводы противоречат результатам, основанным на традиционном подходе к построению математической модели [10], в которых обе расщепленные частоты выше, по отношению к частоте колебаний оболочки с идеальной геометрической формой. При этом отмечается [10], что расстройка спектра частот даже при незначительной амплитуде несовершенств весьма значительна.

Расщепление спектра при $n_0 = n/2 = 4$ настолько мало, что при неизбежных допущениях современной теории и методик их анализа, а также допускаемой величине погрешностей в различных отраслях промышленности им можно пренебречь. В этом случае допустимо считать, что теория дает адекватные качественные результаты, однако нельзя делать окончательных выводов.

Рассмотрим случай, когда $l/R = 3$. Минимальной частоте спектра такой оболочки соответствует $n_{\min} = 5$. Расщепление спектра частот наблюдается в случаях $n = n_0$ и $n = n_0/2$ (в данном случае $n = 8$ и $n = 4$), см. фиг.3. В первой зоне расстройка частотного спектра составляет 25%, во втором – по-прежнему $\Delta = 2\%$. Если относительная длина оболочки $l/R = 1$, то $n_{\min} = 8$. Расстройка спектра частот при $n = n_0/2 = 4$ составляет 25%. При $n = n_0 = 8$ расщепление несколько выше, чем в предыдущих расчетах и составляет $\Delta = 5\%$.

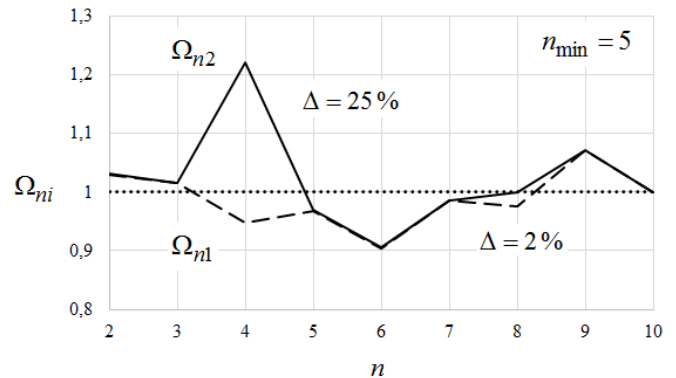


Рис. 3. Расщепленные частоты несовершенной оболочки $l/R = 3$

Рассмотрим случай, когда $l/R = 0,7$. Для такой оболочки минимальной частоте спектра соответствует $n_{\min} = 10$ формообразующих волн. В этом случае расщепление изгибного частотного спектра имеет место в случаях $n = n_0/2$ и $n = n_0$ ($n = 4$ и $n = 8$). В первой зоне расстройка спектра частот составит 30%, во втором – $\Delta = 6\%$.

Рассмотрим оболочку со следующими геометрическими и физическими характеристиками: $l/R = 1$; $R/h = 200$; $R = 1$; $E = 2 \cdot 10^{11}$ МПа; $\rho = 7800$ кг/м³; $\mu = 0,3$. Минимальной частоте спектра оболочки с такими параметрами соответствует $n_{\min} = 8$. Пусть оболочка имеет

начальные неправильности формы $f_0 = h$, изменяющиеся по закону (5) и число волн несовершенств $n = n_0 = 8$.

И в этом случае расщепление изгибного частотного спектра возникает не только в традиционно известном случае $n = n_0$, но и при $n = 2n_0$. В случае, когда $n = n_0$ обе расщепленные частоты меньше частоты колебаний геометрически совершенной оболочки, что противоречит традиционному решению [10], где частоты больше, и согласуется с новым аналитическим решением и решением, представленном в [7]. Снижение частоты $\Omega_{n2} - \Omega_{n1}$ составляет 5%. В аналитическом решении расстройка частотного спектра (в рассматриваемом примере $\varepsilon = 0,102$, $\theta = 0,393$) $\Omega_{n2} - \Omega_{n1} = 9\%$. В случае, когда $n = 2n_0$ одна из расщепленных частот Ω_{n2} больше частоты колебаний соответствующей идеальной оболочки, другая Ω_{n1} – меньше. Расстройка спектра может быть довольно существенной. В рассматриваемом примере превосходит известный случай ($n = n_0$) в пять раз.

Формы колебаний и соответствующие им расщепленные собственные частоты для случая $n = n_0$ и $n = 2n_0$ представлены на рис. 4.

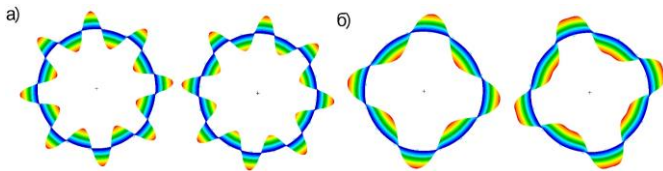


Рис. 4. Формы колебаний и соответствующие им расщепленные частоты

а) при $n = n_0 = 8$: $\lambda_{81} = 132$ Гц, $\lambda_{82} = 139,2$ Гц;

б) при $n_0 = n/2 = 4$: $\lambda_{41} = 265,27$ Гц, $\lambda_{42} = 348,7$ Гц

Если оболочка имеет идеальную геометрическую поверхность, то обем сопряженным изгибным формам для каждого n соответствуют равные частоты: $\lambda_4 = 301,5$ Гц, $\lambda_8 = 139,25$ Гц. Видим, что при $n = n_0 = 8$ большая из расщепленных собственных частот несовершенной оболочки λ_{82} , практически, равна частоте колебаний оболочки без $w_0(x, y) - \lambda_8$. Меньшая из расщепленных собственных частот несовершенной оболочки λ_{81} – ниже соответствующей частоты колебаний оболочки без $w_0(x, y) - \lambda_8$ более 5%. Расстройка частотного спектра $\lambda_{82} - \lambda_{81} \approx 5\%$. В зоне $n_0 = n/2 = 4$ большая из расщепленных собственных частот колебаний оболочки с $w_0(x, y) - \lambda_{42}$ превышает соответствующую частоту идеальной оболочки λ_4 на 15%. Меньшая частота λ_{41} – ниже порядка 12% по сравнению с λ_4 . Расстройка частотного спектра $\lambda_{42} - \lambda_{41} \approx 27\%$.

Стоит отметить, что при анализе динамического поведения оболочек с несовершенствами формы наблюдались и более сложные (неоднозначные) формы колебаний.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод о том, что начальные несовершенства формы приводят к расщеплению изгибного частотного спектра оболочки, причем расстройка спектра частот имеет место не только в случаях, когда число формообразующих волн равно числу волн несовершенств формы оболочки $n = n_0$, как это принято считать в настоящее время. В случае, когда число формообразующих волн в два раза меньше волн несовершенств формы $n = 2n_0$, расстройка частотного спектра может быть, весьма значительной и численно превосходить известный случай. Аналогичный эффект расщепления изгибного частотного спектра несовершенных оболочек наблюдается и на частотах высших осцилляций.

Дополнительное исследование показало, что расщепленные частоты разнесены друг от друга настолько мало, что следует ожидать изменения числа волн динамических деформаций, соответствующих минимальной частоте спектра несовершенной оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серёгин С.В. Свободные изгибно-радиальные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, несущей присоединенную массу // Вестник МГСУ. – 2014. – № 11. – С. 74–81.
2. Серёгин С.В. Численное и аналитическое исследование свободных колебаний круговых цилиндрических оболочек, несущих присоединенную массу, линейно распределенную вдоль образующей // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7. – № 4. – С. 378–384.
3. Серёгин С.В. Об эффекте расщепления изгибного частотного спектра тонких круговых цилиндрических оболочек, несущих присоединенную массу // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 6 (257). – С. 59–61.
4. Серегин С.В. Свободные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, ослабленной отверстием // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2015. – № 3. – С. 9–13.
5. Серёгин Г.С. Влияние присоединенной массы на динамические характеристики тонкой оболочки / С.В. Серёгин, С.В. Лейзерович // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – № 4. – С. 83–89.
6. Лейзерович Г.С. Свободные колебания круговых цилиндрических оболочек с присоединенной малой сосредоточенной массой / Г.С. Лейзерович, С.В. Серёгин // Прикладная механика и техническая физика. – 2016. – Т. 57. – № 5 – С. 90–96.
7. Серёгин С.В. Динамика тонких цилиндрических оболочек с присоединенной массой: моногр. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – 175 с. ISBN 978-5-7765-1250-6
8. Аврамов К.В. Нелинейная динамика упругих систем. Т. 1. Модели, методы, явления // К.В. Аврамов, Ю.В. Михлин. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2010. – 704 с.
9. Amabili M. Review of Studies on Geometrically Non-linear Vibrations and Dynamics of Circular Cylindrical Shells

and Panels, with and without Fluid-Structure Interaction / M. Amabili, M.P. Paidoussis // Applied Mechanics Reviews. 2003. – Vol. 56. Iss. 4. P. 349–381.

10. Кубенко В.Д.. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек / В.Д. Кубенко, П.С. Ковальчук, Т.С. Краснопольская. – Киев: Наук. думка, 1984. – 220 с.

11. Тарануха Н.А. Динамика "неправильных" оболочек / Н.А. Тарануха, Г.С. Лейзерович. – Владивосток: Дальнаука. 2005. – 423 с.

12. Лейзерович Г.С. О влиянии малой присоединенной массы на колебания разнотолщинного кругового кольца / Г.С. Лейзерович, Н.Б. Приходько, С.В. Серегин // Строительство и реконструкция. 2013. – № 4. – С. 38–41.

13. Лейзерович Г.С. О влиянии малой присоединенной массы на расщепление частотного спектра кругового кольца с начальными неправильностями / Г.С. Лейзерович, Н.Б. Приходько, С.В. Серегин // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. – № 6. – С. 49–51.

14. Серёгин С.В. Свободные колебания бесконечно длинной круговой цилиндрической оболочки с начальными неправильностями и малой присоединенной массой / С.В. Серёгин, Г.С. Лейзерович // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2014. – Т. 1. № 4 (20). – С. 36-43.

15. Серёгин С.В. Влияние несовершенств формы на колебания кольцевого резонатора волнового твердотельного

гироскопа // Нелинейная динамика. 2017. –Т. 13. № 3. – С. 423–431.

16. Серёгин С.В. Особенности расщепления частотного спектра волнового твердотельного гироскопа на примере изолированного несовершенного кольца // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2017. – Т. 10. № 3. – С. 116–122.

17. Серёгин С.В. Влияние асимметричных начальных несовершенств формы на свободные колебания тонких оболочек // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – Т. 15. № 3. – С. 209-222.

18. Серёгин С.В. О возможных зонах расщепления изгибного частотного спектра оболочек с асимметричными несовершенствами формы // Известия высших учебных заведений. авиационная техника. 2018. – № 2. – С. 149-152.

19. Серёгин С.В. Качественные эффекты при колебаниях кольцевых подкрепляющих элементов с присоединенной массой, как частный случай тонкой бесконечно длинной круговой цилиндрической оболочки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. – № 1 (682). – С. 31-43.

20. Мильцын А.М. О формах закритического волнообразования неоднородно нагруженных цилиндрических оболочек с технологическими несовершенствами / А.М. Мильцын, В.И. Олевский, В.В. Плетин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. –Т. 5. № 7 (53). – С. 44-48.

On the Splitting of the Bending Frequency Spectrum of Geometrically Imperfect Shells

Seregin S.V.

Federal State-Financed Educational Institution of Higher Learning "Komsomolsk-na-Amure State University",
Komsomolsk-na-Amure, Russia
Seregin-komsHome@yandex.ru

Abstract The paper presents studies of how the initial deviations from a perfect circular shape affects the dynamic eigenparameters of a thin circular cylindrical shell. It discovers the emergence of new splitting zones of the imperfect-shell bending frequency spectrum.

Keywords: oscillations, shells, imperfections.

Рабочий цикл дизеля при пуске

Шишков В.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
Челябинск, Россия
shishkovvv@susu.ac.ru

Аннотация. Несмотря на существенные достижения в улучшении пусковых характеристик дизелей остаются проблемы, связанные с неустойчивым воспламенением, плохим сгоранием топлива в период пуска и последующего прогрева. Для условий холодного пуска дизеля определены закономерности выгорания топлива, тепловыделения и теплоиспользования. Рассчитана погрешность при измерении давления в цилиндре. Закономерности выгорания топлива, полученные на основе анализа опытных диаграмм давления, позволяют получить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Установлено влияние условий пуска, в том числе повышения температуры впускного воздуха, на величину кинетических показателей характеристики выгорания и полноту сгорания топлива.

Ключевые слова: дизель, холодный пуск, процесс сгорания, кинетические показатели, полнота сгорания.

ВВЕДЕНИЕ

Современные дизельные двигатели благодаря технико-экономическим показателям, высокому крутящему моменту и низкому расходу топлива занимают значительную долю рынка в большинстве стран мира [1]. Несмотря на существенные достижения в организации внутрицилиндровых процессов, в том числе и при пуске холодного дизеля, некоторые аспекты, связанные с неустойчивым воспламенением, неравномерным сгоранием, высокими максимальными давлениями сгорания и высокими скоростями нарастания давления в период пуска и прогрева дизеля остаются проблемами, требующими решений [2-4]. Характер изменения параметров состояния рабочего тела в цилиндре при пуске указывает на необходимость использования новых подходов к планированию и проведению эксперимента, новых методов анализа результатов эксперимента [5].

Традиционные средства измерения в поршневых двигателях и режимы работы двигателей в ходе испытаний позволяют регистрировать параметры, поддерживаемые постоянными в течение длительного периода времени или представляющие собой усредненную величину за некоторое число циклов [6]. Режим пуска отличается не только изменением межциклового частоты вращения коленчатого вала, но и изменением угловой скорости коленчатого вала в течение цикла [7]. Для пуска характерна повышенная неравномерность цикловой подачи топлива. Непосредственное измерение единичной цикловой подачи делает эксперимент неоправданно сложным и трудоемким. По этой причине действительную цикловую подачу топлива полагают равной средней цикловой за несколько циклов. Чрезмерно высокие в отдельных циклах максимальное давление сгорания и индикаторная работа цикла свидетельствуют, что часть топлива может оставаться на стенках и в

объеме камеры сгорания от предыдущих циклов. [7-9]. Малые частоты прокручивания коленчатого вала служат причиной повышенных утечек через неплотности цилиндропоршневой группы [10]. Холодные стенки камеры сгорания увеличивают теплообмен, в результате снижаются температура и давление рабочего тела. Установить соответствие опытных и расчетных массовых потерь заряда и потерь теплоты в процессе сжатия при прокручивании коленчатого вала дизеля позволяет сопоставление результатов расчета давления и температуры в процессе сжатия с экспериментальными данными [11]. Моделирование процесса сгорания при пуске дизеля может быть реализовано заданием простых линейных характеристик выгорания топлива [12], однако такой подход искажает закономерности изменения скорости выгорания топлива и других параметров, в связи с чем, утрачивается инструмент для более детального изучения внутрицилиндровых процессов. В известных методах моделирования характеристик выгорания, например по уравнению профессора Вибе, используются константы, получаемые опытным путем по результатам обработки индикаторных диаграмм. Применяемые в таких случаях методы анализа индикаторных диаграмм ориентированы на соответствующие методики синтеза рабочего процесса двигателя [13-16], которые не учитывают процессы, характерные для режима пуска. Модель расчетного определения текущих значений внутрицилиндровых параметров с учетом тепломассообмена в цилиндре [17] применима для формирования на ее основе методики анализа рабочего цикла дизеля по индикаторной диаграмме для условий пуска дизеля.

В условиях применения средств облегчения пуска, например подогрева впускного воздуха, при пуске и прогреве дизеля происходит изменение температуры и состава впускного заряда. Подогрев впускного воздуха сокращает время пуска и допускает выработку стратегии пуска [18, 19], предусматривающую управление законом впрыскивания топлива с учетом параметров состояния впускного заряда и динамики пуска с целью снижения вредных выбросов с отработавшими газами.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАБОЧЕГО ЦИКЛА ПРИ ПУСКЕ ПО ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЕ

Достоверность результатов индицирования определяется рядом условий. Так, датчик для индицирования, как правило, устанавливают в камере сгорания без промежуточных каналов, чтобы исключить смещение регистрируемого давления по углу поворота коленчатого вала и исключить влияние свободных колебаний газа в индикаторном канале на действительное значение давления. Использование индикаторного канала практически, так как позволяет

установить датчик давления без существенной доработки деталей двигателя (рис. 1.). Предлагаемый вариант размещения датчика обеспечивает необходимую точность измерений для пусковых частот вращения коленчатого вала до 250 мин^{-1} . В этом случае собственная частота колебаний газа в индикаторном канале превышает требуемую наивысшую частоту полосы пропускания системы индикатора не менее чем в 4,7 раза. Перепад давления, который может возникнуть в индикаторном канале, не превышает 0,024 МПа, фазовая ошибка регистрации давления не превышает 0,34 град ПКВ.

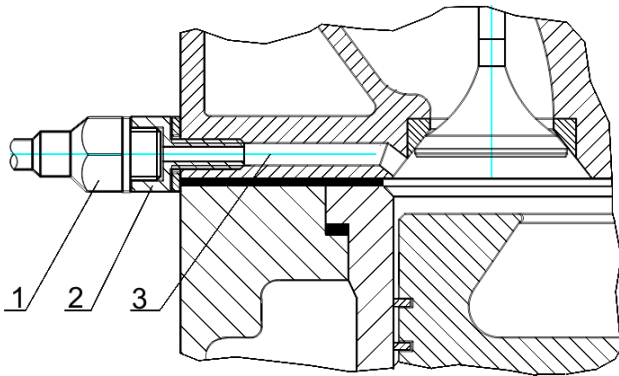


Рис. 1. Схема установки датчика давления: 1 – датчик давления; 2 – переходник; 3 – индикаторный канал

Методика анализа рабочего цикла сформирована на основе математической модели синтеза рабочего цикла и позволяет выявить опытные данные, уточняющие математическую модель и необходимые, в частности, для моделирования характеристики выгорания топлива. Индикаторная диаграмма, снятая с двигателя при его запуске, позволяет рассчитать элементарное количество использованной теплоты

$$dx_i = \frac{(dp \cdot V)/(k \cdot p) - \partial_{yt} V + dV}{(R \cdot H_u \cdot G_u)/(p \cdot C_p) + \partial_m V},$$

где dp – элементарное приращение давления рабочего тела, МПа; V – текущий объем цилиндра, м^3 ; k – показатель адиабаты; p – давление рабочего тела, МПа; $\partial_{yt} V$ – частное изменение объема рабочего тела вследствие утечек через неплотности цилиндра-поршневой группы, м^3 ; dV – элементарное изменение объема рабочего тела вследствие перемещения поршня, м^3 ; R – универсальная газовая постоянная, $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$; H_u – низшая теплота сгорания топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$; G_u – цикловая подача топлива, $\text{кг}/\text{цикл}$; C_p – молярная теплоемкость при постоянном давлении, $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$; $\partial_m V$ – частное изменение объема рабочего тела вследствие изменения числа молей газа в процессе сгорания, м^3 .

Достоверность интегральной характеристики теплоиспользования зависит от точности расчета утечек рабочего тела и отклонения действительной величины впрыскиваемого за цикл топлива от среднего значения цикловой подачи, определяемой при тарировке.

Для расчета элементарного количества выделившейся теплоты

$$dx_\delta = \frac{(dp \cdot V)/(k \cdot p) - (R \cdot dQ_\alpha)/(p \cdot C_p) - \partial_{yt} V + dV}{(R \cdot H_u \cdot G_u)/(p \cdot C_p) + \partial_m V}$$

необходимо дополнительно знать теплоту dQ_α , сообщенную рабочему телу в результате теплообмена со стенками внутрицилиндрового пространства. Максимальное значение x_δ соответствует доле сгоревшего за цикл топлива.

Продолжительность сгорания, условная продолжительность сгорания, интенсивность процесса сгорания определяются на основе логарифмической анаморфозы. Для рабочего цикла в режиме пуска характерна S-образная форма логарифмической анаморфозы, рис. 2.

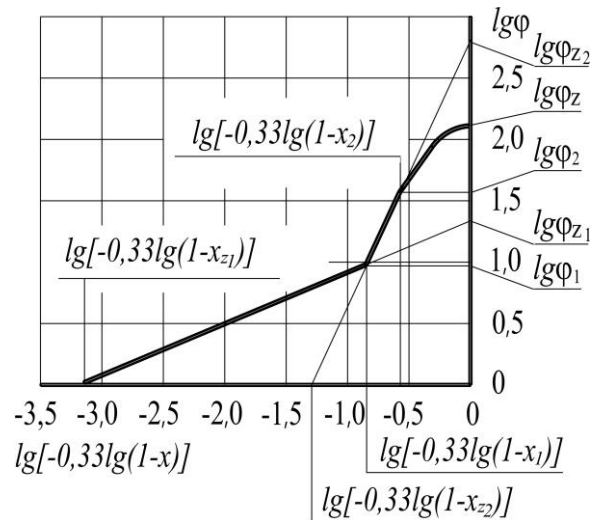


Рис. 2. Логарифмическая анаморфоза

Характер изменения логарифмической анаморфозы не соответствует одностадийному сгоранию. Выделение двух участков сгорания [20] позволяет моделировать более сложные закономерности выгорания топлива. Для S-образной формы логарифмической анаморфозы целесообразно процесс сгорания разбить на три характерных участка: период кинетического сгорания; период диффузионного сгорания и период догорания. Показатели уравнения выгорания для первых двух участков достаточно точно могут быть определены по логарифмической анаморфозе: для первого участка ($0 \leq \varphi \leq \varphi_1$) условная продолжительность сгорания $\varphi_{z1} = 10^{\lg \varphi_{z1}}$, показатель характера сгорания $m_1 = \lg[-0,33 \cdot \lg(1-x_{z1})]/\lg \varphi_{z1} - 1$, уравнение выгорания топлива $x = 1 - \exp\left[c\left(\frac{\varphi}{\varphi_{z1}}\right)^{m_1+1}\right]$; для второго участка ($\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2$) соответственно $\varphi_{z2} = 10^{\lg \varphi_{z2}}$, $m_2 = \lg[-0,33 \cdot \lg(1-x_{z2})]/\lg \varphi_{z2} - 1$, $x = 1 - \exp\left[c\left(\frac{\varphi}{\varphi_{z2}}\right)^{m_2+1}\right]$.

Для третьего участка увеличивается погрешность при определении давления по индикаторной диаграмме, а, следовательно, и скорости сгорания. Незначительное по величине изменение доли выгоревшего топлива происходит по

закону, близкому к линейному. В связи с этим для моделирования сгорания на участке догорания целесообразно задать линейное изменение скорости выгорания от её значения в конце второго участка при $\varphi = \varphi_2$ до нуля при $\varphi = \varphi_z$.

Логарифмическая анаморфоза соответствует характеристике тепловыделения x_δ , приведенной на рис. 3, которая получена в результате анализа индикаторной диаграммы первого цикла со сгоранием при пуске дизеля 4ЧН14,5/20,5. Эксперимент показывает, что угловая скорость коленчатого вала в течение цикла изменяется от $14,2 \text{ с}^{-1}$ до $17,2 \text{ с}^{-1}$, к приходу поршня в ВМТ в процессе сжатия через неплотности цилиндро-поршневой группы теряется 13% от массы заряда, поступившей в цилиндр за период наполнения, а к концу расширения количество заряда, потерянного из-за утечек, достигает 27%.

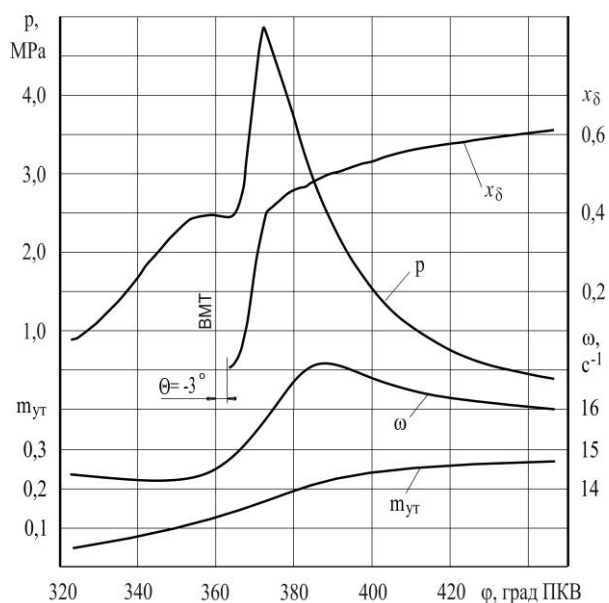


Рис. 3. Результаты анализа индикаторной диаграммы

Для рассматриваемого цикла определены: общая продолжительность сгорания $\varphi_z=125$ град ПКВ, продолжительность периода кинетического сгорания $\varphi_1=9,6$ град ПКВ, продолжительность периода диффузионного сгорания $\varphi_2=36$ град ПКВ, условная продолжительность периода кинетического сгорания $\varphi_{z1}=22,4$ град ПКВ, условная продолжительность периода диффузионного сгорания $\varphi_{z2}=676$ град ПКВ, показатель характера сгорания для периода кинетического сгорания $m_1=1,32$, показатель характера сгорания для периода диффузионного сгорания $m_2=-0,54$.

Использование данных, полученных в результате анализа индикаторной диаграммы, для сопоставления экспериментального и расчетного цикла показало качественное и количественное соответствие изменения давления p и температуры T рабочего тела, характеристики тепловыделения x_δ , и доли чистого воздуха в рабочем теле r_a при выбранном способе моделирования закона выгорания топлива (рис. 4). В частности, индикаторная работа цикла при расчетном моделировании составила $1,40 \text{ кДж}$, и $1,39 \text{ кДж}$ при определении по индикаторной диаграмме, полученной в эксперименте. Цикл соответствует температуре окружа-

ющей среды $T_0 = 272 \text{ К}$, частоте прокручивания коленчатого вала $n_s = 143 \text{ мин}^{-1}$, цикловой подачи топлива $G_u = 0,186 \text{ г}$, подогрев впускного заряда $\Delta T_s = 49 \text{ К}$, (сплошные линии – синтез рабочего цикла, пунктирные – анализ).

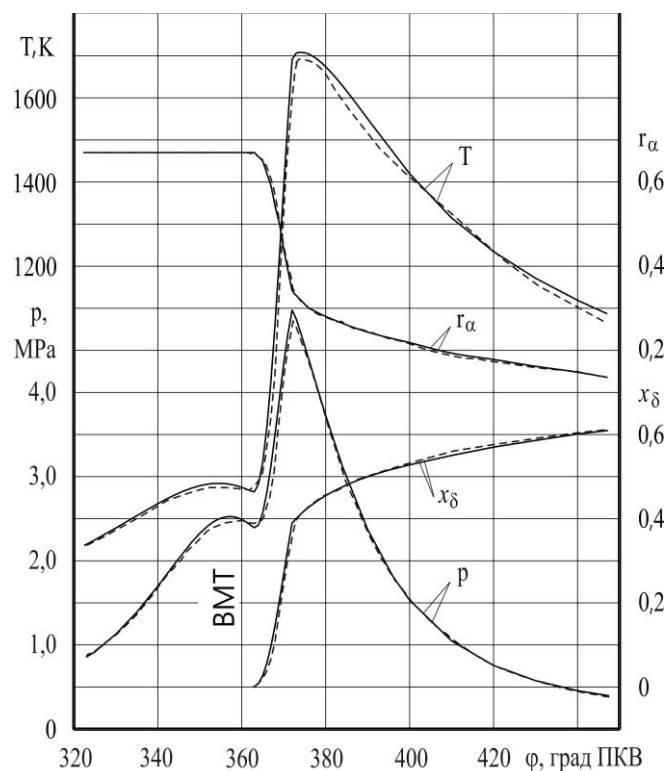


Рис. 4. Синтез и анализ рабочего цикла

Кинетические показатели, определяющие характеристику выгорания топлива, а также коэффициент выделения теплоты и ряд других показателей цикла зависят от температуры окружающей среды и температуры двигателя, частоты прокручивания коленчатого вала, степени подогрева впускного заряда, доли продуктов сгорания во впускном заряде, цикловой подачи топлива и других параметров. В значительной мере на величину кинетических показателей процесса сгорания влияет продолжительность периода задержки воспламенения. Увеличение периода задержки воспламенения, при прочих равных условиях, повышает долю топлива, испарившегося до начала сгорания, и, соответственно увеличивает продолжительность периода кинетического сгорания φ_1 , и долю топлива, сгоревшего за данный период.

Влияние температура окружающей среды разнонаправленно. С одной стороны понижение температуры увеличивает период задержки воспламенения, а соответственно и количество испарившегося топлива, с другой – уменьшается скорость испарения топлива.

В рассматриваемых условиях равного по величине повышения температуры подогреваемого впускного воздуха (70 °C), до уровня, обеспечивающего воспламенение топлива, понижение температуры окружающей среды с минус 6 до минус 19 °C (при прочих равных условиях) показатели процесса сгорания изменились незначительно, см. таблицу. В частности, период задержки воспламенения увеличился на два градуса, а продолжительность периода кинетического сгорания уменьшилась на один градус. В несколько

большей степени понижение температуры повлияло на коэффициент тепловыделения, который уменьшился с 0,5 до 0,46.

Таблица

Параметры процесса сгорания

| Параметр, характеризующий сгорание | Температура | |
|--|-------------|------------|
| | минус 6°С | минус 19°С |
| Период задержки воспламенения, φ_i , град ПКВ | 11 | 13 |
| Продолжительность периода кинетического сгорания, φ_1 , град ПКВ | 7 | 6 |
| Условная продолжительность периода кинетического сгорания, φ_{z1} , град ПКВ | 18 | 15 |
| Продолжительность периода диффузионного сгорания, φ_2 , град ПКВ, | 48 | 42 |
| Условная продолжительность периода диффузионного сгорания, φ_{z2} , град ПКВ | 1100 | 756 |
| Показатель характера сгорания для периода кинетического сгорания, m_1 | 1,32 | 1,45 |
| Показатель характера сгорания для периода диффузионного сгорания, m_2 | -0,58 | -0,59 |
| Коэффициент тепловыделения, δ | 0,5 | 0,46 |

Уровень подогрева впускного заряда (рис. 5) влияет на количество кислорода во внутрицилиндровом объеме не только в результате изменения плотности подогреваемого воздуха, но и в результате изменения доли чистого воздуха при подогреве впускного заряда продуктами сгорания.

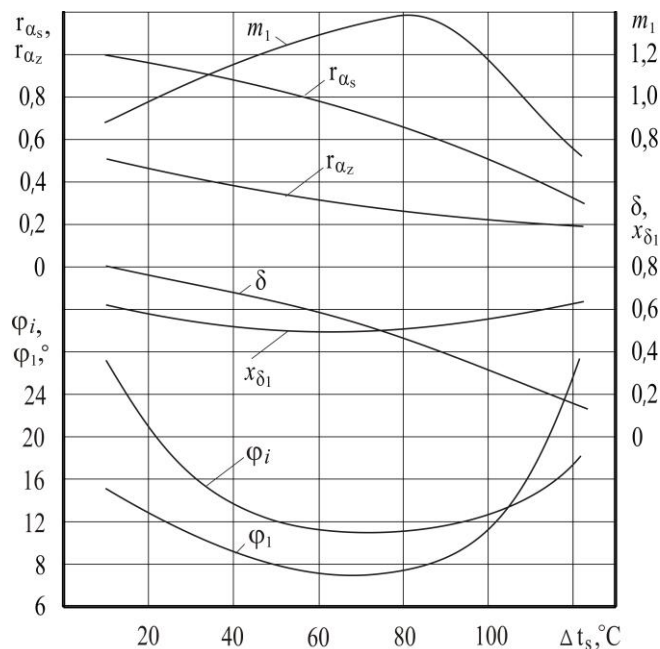


Рис. 5. Влияние подогрева впускного воздуха на показатели процесса сгорания

Повышение температуры впускного заряда сокращает период задержки воспламенения φ_i до момента, когда уменьшение содержания чистого воздуха во внутрицилиндровом заряде r_{α_s} препятствует развитию предпламенных химических реакций и период задержки воспламенения начинает увеличиваться. Изменение продолжительности периода кинетического сгорания φ_1 соответствует характеру кривой φ_i , но в области низких r_{α_s} продолжительность сгорания интенсивно увеличивается. Доля выделившейся

теплоты за период кинетического сгорания x_{δ_1} уменьшается от 0,62 до 0,5 по мере повышения температуры и вновь увеличивается до 0,62, следовательно, за первый период выделяется более половины от всей выделившейся за цикл теплоты. И характер изменения x_{δ_1} определяется, в том числе и величиной периода задержки воспламенения. Коэффициент тепловыделения δ изменяется пропорционально r_{α_s} и эта закономерность соответствует уравнению $\delta = 0,931 \cdot r_{\alpha_s} - 0,161$. Уменьшение δ по мере повышения Δt_s указывает на рост доли топлива, которое не участвует в процессе сгорания и увеличивает, тем самым, количество вредных выбросов с отработавшими газами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характерные для условий холодного пуска дизеля особенности протекания внутрицилиндровых процессов (изменение количества рабочего тела и его состава, теплообмен с холодными стенками камеры сгорания), а также изменение угловой скорости вращения коленчатого вала предполагают учет закономерностей отражающих названные процессы при анализе рабочего цикла по индикаторной диаграмме.

По результатам обработки индикаторных диаграмм установлена закономерность протекания характеристики тепловыделения, позволяющая выделить три характерных периода процесса сгорания, для которых получены соответствующие кинетические параметры для различных условий пуска, в том числе при изменении температуры окружающей среды и степени подогрева впускного воздуха.

Использование данных, полученных в результате анализа индикаторных диаграмм, для моделирования рабочего цикла дизеля при пуске показало качественное и количественное соответствие изменения давления и температуры рабочего тела, характеристики тепловыделения и других параметров при предлагаемом способе моделирования закона выгорания топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Global Diesel Engine Market by Product, Market and Region, 5th Edition. Industry Study 3488. Published Date from Jan-2017.
2. Rau Bernd. Versuche zur Thermodynamik und Gemischbildung beim Kaltstart eines direktinspritzenden Viertakt-dieselmotors. Diss. Dokt. - Ing. Fak. Maschininw. Techn. Univ. Hannover, 1975. - 178 p.
3. Ullrich K. Der Einfluss der Olviskositat auf das Drehmoment beim Kaltstart eines Dieselmotors // Kraftfahrzeugtechnik, 1973. — 5. mai. — p. 145 – 148.
4. Купершмидт В.Л. Пусковые качества и системы пуска семейства тракторных дизелей воздушного охлаждения Владимирского тракторного завода. Обзор. - М.: ЦНИИТЭ Итракторсельхозмаш, 1974. - 55 с
5. Исследование процесса тепловыделения при выгорании топлива в период пуска дизеля сжатым воздухом / Е.Х.Кадышевич, М.А.Миселев, А.К.Костин и др. // Двигателестроение, 1980. - № 8. - С. 9-13.
6. Райков И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания. - М.: Высш. школа, 1975. - 320 с.

7. Liu H. Simulation of Diesel Engines Cold-Start / H. Liu, N. Henein, W. Bryzik // SAE Technical Paper. – 2003.
8. Han Z. Diesel Engine Cold Start Combustion Instability and Control Strategy / Z. Han, N. Henein, B. Nitu, W. Bryzik // SAE Technical Paper. – 2001.
9. Henein N.A. Diesel Engine Cold Starting: Combustion Instability / N.A. Henein, A.R. Zahdeh, M.A. Yassine, W. Bryzik // SAE Technical Paper. – 1992.
10. Malozemov A.A. Improvement of the Forced Diesel Engines Cold Starting Characteristics by Oil Injection into the Cylinder / A.A. Malozemov, V.N. Bondar, V.S. Kukis // Procedia Engineering 150, – 2016, pp.1149 – 1155.
11. Шароглазов Б.А. Анализ рабочего цикла дизеля по индикаторной диаграмме / Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков // Двигателестроение. – 1993. №3–12. – С. 25–27.
12. Болдырев И.В. Математическая модель пуска двигателя / И.В. Болдырев, Т.Н. Смирнова, С.Б. Пушкин // Двигателестроение, 1984. – № 6. – С. 14-16.
13. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. – М. – Свердловск: Машгиз, 1962. – 272 с.
14. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя / Б.С. Стечкин, К.И. Генкин, В.С. Золотаревский, И.В. Скородинский. – М.: Из-во Акад. Наук СССР, 1960. – 199 с.
15. Фарафонов М.Ф. Испытания ДВС. Виды и методы: учеб. пособие – Челябинск: Издательство ЧГТУ, 1994. – 77 с.
16. Bąkowska A. Determining the polytropic exponent of the process occurring during the working cycle of a diesel / A. Bąkowska, L. Radziszewska, Ż. Milanb // Procedia Engineering 136, – 2016. pp. 220 – 226.
17. Шишков В.В. Пуск холодного дизеля. Моделирование процессов в цилиндре // Пром-Инжиниринг: Труды международной научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – С. 107–110.
18. Ramadhas A.S. Reducing Cold Start Emissions from Automotive Diesel Engine at Cold Ambient Temperatures / A.S. Ramadhas, H. Xu, D. Liu, J. Tian // Aerosol and Air Quality Research, 16: 3330–3337, 2016.
19. Liu D. Investigation on the Performance of Diesel Oxidation Catalyst during Cold Start at Low Temperature Conditions / D. Liu, H. Xu, A.S. Ramadhas, J. Tian // SAE Technical Papers. – 2014.
20. Radivoje B. PEŠIĆ, Aleksandar Lj. DAVINIĆ, Dragan S. TARANOVIĆ, Danijela M. MILORADOVIĆ, Snežana D. PETKOVIĆ, Experimental determination of double vibe function parameters in diesel engines with biodiesel, Thermal Science, ISSN 0354-9836, vol. 14 (2010), No. Suppl., pp. 207-218.

The Working Cycle of the Diesel Engine at Start-up

Shishkov V.V.

South Ural State University (national research university)
Chelyabinsk, Russia
shishkovvv@susu.ac.ru

Abstract. Despite significant achievements in improving the starting characteristics of diesel engines, problems remain due to unstable ignition, poor fuel combustion during the start-up period and subsequent warm-up. For the conditions of a cold start of a diesel engine, the laws of fuel burnout, heat generation and heat use are determined. Calculated the error in measuring the pressure in the cylinder. Regularities of fuel burnup, obtained on the basis of the analysis of experimental pressure diagrams, allow us to obtain a good agreement between the calculated and experimental results. The influence of the start-up conditions, including

the increase in the intake air temperature, on the magnitude of the kinetic parameters of the burnout characteristics and the completeness of fuel combustion was established.

Keywords: diesel; cold start; combustion process; kinetic indicators; full combustion.

Виброзащитные свойства подвески автомобиля при оптимальном мгновенном регулировании демпфирования в цикле колебаний

Чернышов К.В., Поздеев А.В., Рябов И.М.

Волгоградский государственный технический университет

Волгоград, Россия

chernykv@rambler.ru, pozdeev.vstu@gmail.com, rjabov1603@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию виброзащитных свойств подвески автомобиля при оптимальном мгновенном регулировании демпфирования в цикле колебаний. В зарубежной литературе подвески с таким принципом регулирования получили название “semi-active control suspensions”. Однако их виброзащитные свойства не были подробно исследованы. В данной статье представлены результаты теоретического и экспериментального исследования виброзащитных свойств одномассовой и двухмассовой колебательных систем, моделирующих подвеску автомобиля, при оптимальном мгновенном регулировании демпфирования в цикле колебаний. По результатам исследований сделан вывод, что оптимальное мгновенное регулирование демпфирования в подвеске автомобиля не обеспечивает повышения виброзащитных свойств вследствие наличия ударов и шума в подвеске, что ставит задачу изыскания и исследования способов плавного изменения демпфирования в цикле колебаний.

Ключевые слова: подвеска автомобиля, виброзащитные свойства, демпфирование, оптимальное регулирование.

ВВЕДЕНИЕ

В ряде работ авторов данной статьи [1-6] проведен анализ работы подвески без регулирования демпфирования в одномассовой колебательной системе (рис. 1).

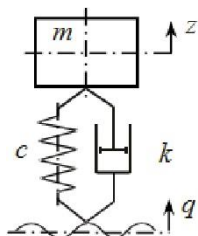


Рис. 1. Схема одномассовой одноопорной виброзащитной колебательной системы с нерегулируемым демпфированием: m – подрессоренная масса; c – жесткость упругого элемента (рессоры); k – коэффициент демпфирования амортизатора

В результате анализа, в частности, выявлено, что в цикле колебаний существует два интервала (А и Б на рис. 2), в которых усилие амортизатора направлено в сторону движения подрессоренной массы, что способствует увеличению ее кинетической энергии и повышению амплитуд колебаний. Такие интервалы были названы зонами неэффективной работы амортизатора. Показано, что причиной возникновения зон неэффективной работы амортизатора

является сдвиг фаз α между колебаниями массы и относительными колебаниями штока амортизатора, зависящий от величины относительного коэффициента затухания ψ и относительной частотой возмущения ν :

$$\alpha = -\arctg(2\nu\psi). \quad (1)$$

Проведенный энергетический анализ амортизатора в цикле колебаний показал, что для повышения его энергетической эффективности и уменьшения амплитуд колебаний подрессоренной массы необходимо снижать или отключать демпфирование в зонах неэффективной работы амортизатора. В последнем случае регулирование демпфирования соответствует принципу “semi-active control suspension” (полуактивной подвески), предложенному Р. И. Фурунжиевым [7], Д. Карнопом и М. Кросби [8, 9].

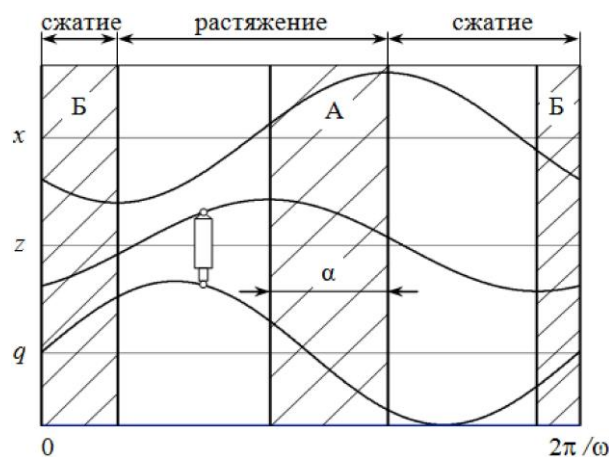


Рис. 2. Оциллограмма цикла колебаний одномассовой одноопорной виброзащитной колебательной системы с нерегулируемым демпфированием: q – кинематическое возмущение; z – перемещение подрессоренной массы; x – деформация подвески; А и Б – зоны неэффективной работы амортизатора; α – ширина зоны неэффективной работы амортизатора

Р. И. Фурунжиев, используя разработанный Л. С. Понтрягиным для математической теории оптимальных процессов принцип максимума, показал на примере двухмассовой модели автомобиля, что для уменьшения амплитуд колебаний подрессоренной массы необходимо регулирование демпфирования, заключающееся в мгновенном отключении его в интервалах цикла колебаний, когда направления

движения поддресоренной и неподдресоренной масс совпадают, и при этом абсолютная скорость неподдресоренной массы больше абсолютной скорости поддресоренной массы в вертикальном направлении, с последующим мгновенным включением при изменении этих условий на противоположные.

Исследованию виброзащитных свойств одномассовой колебательной системы при оптимальном мгновенном регулировании демпфирования в цикле колебаний и разработке конструкций регулируемых амортизаторов посвящен ряд работ с участием авторов данной статьи [10-23]. Однако полученные результаты не были обобщены и проанализированы. Кроме того, не были исследованы виброзащитные свойства двухмассовой колебательной системы при оптимальном мгновенном регулировании демпфирования.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ОДНОМАССОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ МГНОВЕННОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ДЕМПФИРОВАНИЯ В ЦИКЛЕ КОЛЕБАНИЙ

Расчетная схема одномассовой одноопорной виброзащитной системы с регулируемым демпфером приведена на рис. 3. Динамика такой системы при оптимальном мгновенном регулировании демпфирования описывается следующей математической моделью:

$$m\ddot{z} + uk(\dot{z} - \dot{q}) + c(z - q) = 0 \quad (2)$$

где u – управляющий параметр:

$$u = \begin{cases} u_{\max} = 1 & \text{при } (\dot{z} - \dot{q}) \dot{z} > 0; \\ u_{\min} & \text{при } (\dot{z} - \dot{q}) \dot{z} < 0, \end{cases} \quad (3)$$

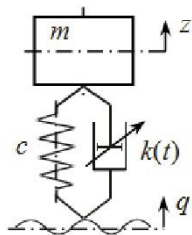


Рис. 3. Схема одномассовой одноопорной виброзащитной системы с регулируемым демпфированием: m – поддресоренная масса; c – жесткость упругого элемента (рессоры); k – переменный коэффициент демпфирования амортизатора

Некоторые результаты исследования данной модели приведены в виде графиков на рис. 4-8.

В результате анализа модели доказано, что:

– переключение демпфирования с уровня относительного коэффициента затухания колебаний $\Psi_{\max} = \frac{u_{\max}k}{2\sqrt{mc}}$ на уровень $\Psi_{\min} = \frac{u_{\min}k}{2\sqrt{mc}}$ в зонах

неэффективной работы приводит к уменьшению амплитуд вертикальных перемещений поддресоренной массы, причем наибольший эффект достигается при условии $\Psi_{\min} = 0$ ($u_{\min} = 0$), то есть при полном отключении демпфирования;

– начало зоны неэффективной работы, а, следовательно, момент отключения демпфирования при оптимальном регулировании совпадает с моментом достижения

поддресоренной массы крайнего верхнего или крайнего нижнего положения ($\dot{z}(t) = 0$), а конец зоны неэффективной работы и момент включения демпфирования – с моментом обнуления скорости деформации подвески ($\dot{z}(t) - \dot{q}(t) = 0$);

– при мгновенном отключении демпфирования в момент достижения зоны неэффективной работы амортизатора функция вертикальных ускорений поддресоренной массы $\ddot{z}(t)$ терпит разрывы первого рода, а при включении демпфирования в момент выхода из этой зоны функция имеет излом;

– minimum амплитуд перемещений поддресоренной массы (рис. 4) достигается при мгновенном отключении демпфирования в зонах неэффективной работы амортизатора, причем minimum minimum достигается при условии достижения нулевого ускорения $\ddot{z}(t) = 0$ в результате отключения демпфирования (именно это условие определяет оптимальное регулирование демпфирования при мгновенном переключении);

– нулевое вертикальное ускорение поддресоренной массы $\ddot{z}(t) = 0$ в результате отключения демпфирования достигается при определенном (оптимальном) значении максимального уровня демпфирования при заданной частоте возмущения $\Psi_{\max}^*(1) = \frac{u_{\max}^*k}{2\sqrt{mc}}$ (например, при

резонансной частоте возмущения (рис. 4) $\Psi_{\max}^* \approx 0,92$);

– при превышении максимального уровня демпфирования $\Psi_{\max} > \Psi_{\max}^*(1)$ возникает перерегулирование (рис. 5), приводящее к резким изменениям вертикальных ускорений поддресоренной массы (затемненные участки на рис. 5);

– внедрение оптимального управления демпфированием существенно уменьшает тепловыделение, определяемое площадью рабочей диаграммы (рис. 6), что связано как с уменьшением амплитуд деформаций подвески, так и с отсутствием неэффективной работы амортизатора.

Также методом сшивания кусочно-линейных функций была получена амплитудно-частотная характеристика поддресоренной массы в одномассовой колебательной системе при оптимальном мгновенном регулировании, представленная на рис. 7 (кривая 3), полученная при оптимальной зависимости $\Psi_{\max}^*(1)$ (кривая 4). Данная характеристика определяет потенциальные возможности такого способа регулирования в одномассовой колебательной системе. На рис. 7 представлены также амплитудно-частотные характеристики без демпфирования (кривая 1) и с постоянным демпфированием (кривая 2).

На рис. 8 представлены амплитудно-частотные характеристики ускорений систем без демпфирования (кривая 1), с постоянным демпфированием (кривая 2), с демпфированием, изменяемым по закону $\Psi_{\max}^*(1)$ (кривая 3) и при оптимальном изменении демпфированием (кривая 4).

Как показывают исследования, при оптимальном управлении демпфированием максимальные значения перемещений поддресоренной массы значительно снижаются

во всей области частот (рис. 7). Однако величина максимального ускорения подрессорной массы существенно ниже лишь в зоне резонанса (рис. 8).

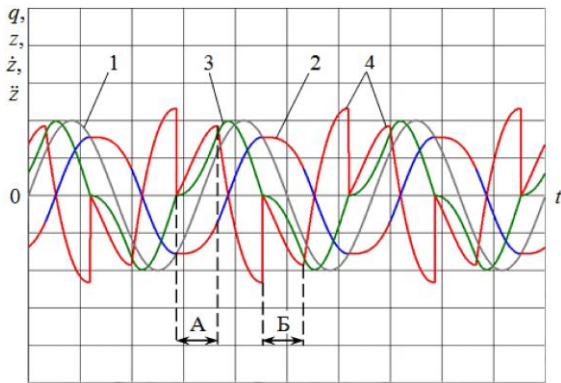


Рис. 4. Осциллограмма резонансных колебаний одномассовой колебательной системы с оптимальным регулированием демпфирования: 1 – перемещение возмущающего основания q ; 2, 3 и 4 – перемещение z , скорость \dot{z} и ускорение \ddot{z} подрессорной массы; А и Б – зоны отключения демпфирования

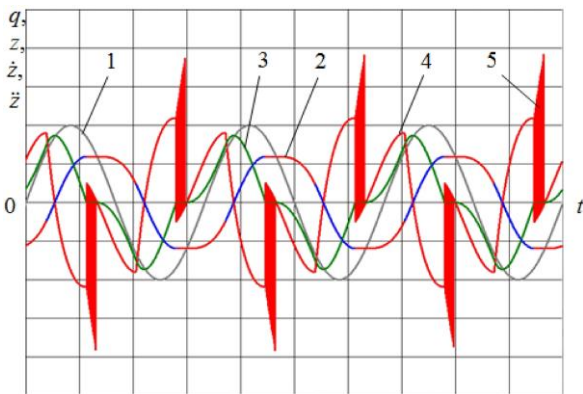


Рис. 5. Осциллограмма резонансных колебаний одномассовой колебательной системы с перерегулированием демпфирования: 1 – перемещение возмущающего основания q ; 2, 3 и 4 – перемещение z , скорость \dot{z} и ускорение \ddot{z} подрессорной массы; 5 – участки перерегулирования

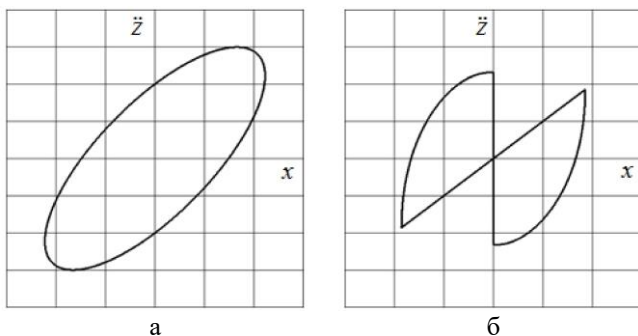


Рис. 6. Упругодемпфирующие характеристики (рабочие диаграммы) одномассовой колебательной системы в резонансе: а – без управления демпфированием при $\psi = 0,45$; б – с оптимальным управлением демпфированием при резонансной частоте ($t = 1$)

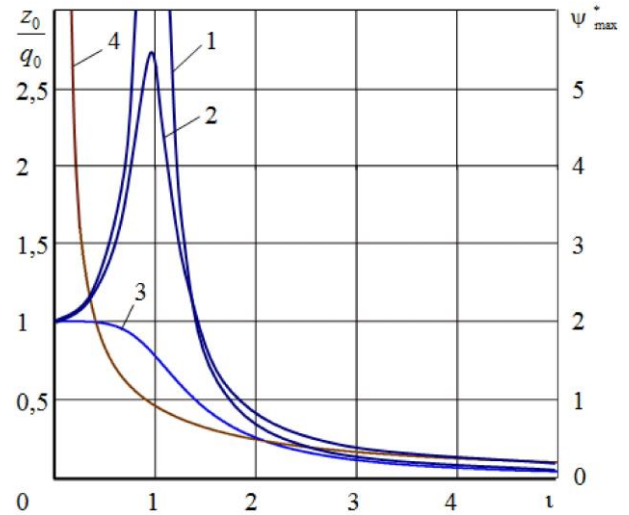


Рис. 7. Характеристики одномассовой колебательной системы при гармоническом кинематическом возмущении: 1, 2, 3 – амплитудно-частотные характеристики перемещений систем: без демпфирования, с постоянным демпфированием, с оптимальным управлением демпфированием соответственно; 4 – зависимость $\psi_{\max}^*(t)$ при оптимальном управлении демпфированием



Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики ускорений систем: 1 – без демпфирования; 2 – с постоянным демпфированием; 3 – с демпфированием, изменяемым по закону 4 (рис. 7) без оптимального регулирования; 4 – при оптимальном управлении демпфированием

Экспериментальная проверка оптимального мгновенного регулирования демпфирования была осуществлена авторами на экспериментальной пневмогидравлической рессоре, в которой демпфирование регулировалось быстродействующим электромагнитным клапаном (рис. 9, а).

Схема экспериментальной установки на основе стенда для испытания пневматических шин и упругих элементов транспортных средств [29, 30] с электрической схемой управления электромагнитным клапаном приведена на рис. 9, б.

Экспериментальная проверка оптимального мгновенного регулирования демпфирования в области резонанса показала, что такое регулирование обеспечивает значительное уменьшение амплитуды колебаний подрессорной массы (меньше амплитуды кинематического возмущения), соответствующее результатам исследования математической модели.

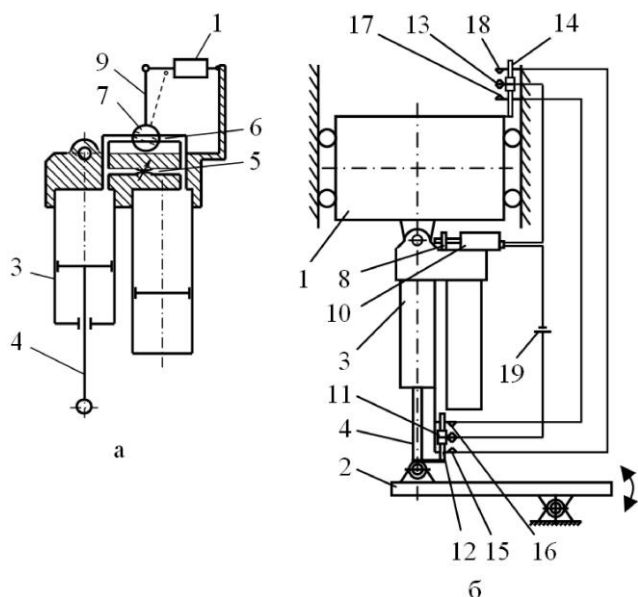


Рис. 9. Схема экспериментальной пневмогидравлической рессоры с электромагнитным клапаном для управления демпфированием в цикле колебаний (а) и схема установки для ее испытаний (б): 1 – поддрессоренная масса; 2 – возмущающее основание; 3 – пневмогидравлическая рессора; 4 – шток рессоры; 5 – основной дроссельный канал; 6 – дополнительный дроссельный канал; 7 – золотник; 8 – ось; 9 – рычаг; 10 – электромагнит; 11 – контакт, подвижный относительно стержня 12; 13 – контакт, подвижный относительно стержня 14; 15, 16, 17, 18 – контакты; 19 – источник питания

Однако участниками эксперимента было отмечено наличие ударов и шума в подвеске в процессе переключения демпфирования.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ДВУХМАССОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ МГНОВЕННОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ДЕМПФИРОВАНИЯ В ЦИКЛЕ КОЛЕБАНИЙ

Рассмотрим принцип оптимального регулирования демпфирования при мгновенном переключении в двухмассовой колебательной системе (рис. 10).

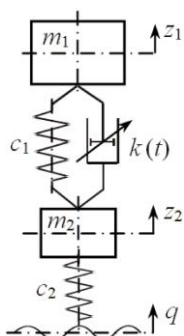


Рис. 10. Схема двухмассовой одноопорной виброзащитной системы с регулируемым демпфированием: m_1 – поддрессоренная масса; m_2 – неподдрессоренная масса; c_1 – жесткость упругого элемента (рессоры); $k(t)$ – коэффициент демпфирования амортизатора; c_2 – жесткость шины; q

– кинематическое возмущение; z_1 – перемещение поддрессоренной массы; z_2 – перемещение неподдрессоренной массы

Математическую модель двухмассовой колебательной системы при оптимальном мгновенном отключении демпфирования можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + uk(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_1(z_1 - z_2) = 0; \\ m_2 \ddot{z}_2 + c_2(z_2 - q) - uk(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - c_1(z_1 - z_2) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где u – управляющий параметр:

$$u = \begin{cases} 1 & \text{при } (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \dot{z}_1 > 0; \\ 0 & \text{при } (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \dot{z}_1 < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Графики, полученные в процессе исследования данной модели, приведены на рис. 11-14.

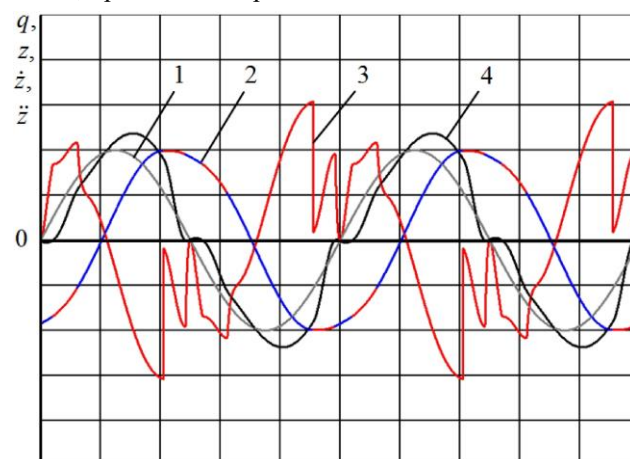


Рис. 11. Осциллограмма резонансных колебаний двухмассовой колебательной системы с оптимальным регулированием демпфирования: 1 – перемещение возмущающего основания q ; 2 и 3 – перемещение z_1 и ускорение \dot{z}_1 поддрессоренной массы; 4 – перемещение z_2 неподдрессоренной массы

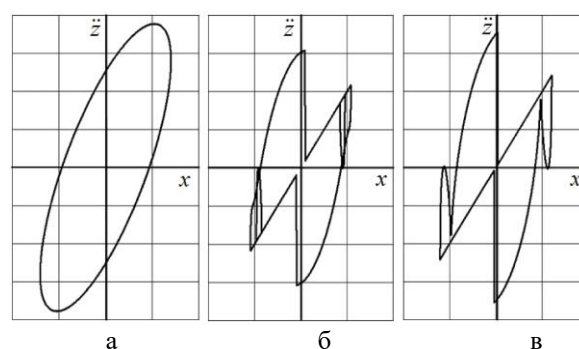


Рис. 12. Упругодемпфирующие характеристики (рабочие диаграммы) двухмассовой колебательной системы в резонансе: а – без управления демпфированием при $\psi = 0,45$ в резонансе; б – с оптимальным управлением демпфированием при резонансной частоте ($\iota = 1$); в – с оптимальным управлением демпфированием при относительной частоте возмущения $\iota = 1,5$

В результате анализа данной модели выявлено, что использование оптимального мгновенного переключения демпфирования в двухмассовой колебательной системе

приводит к существенному снижению амплитуд перемещений подрессоренной массы (рис. 13, кривая 1), однако вызывает значительный рост колебаний колес (рис. 13, кривая 2) и существенное увеличение ускорений подрессоренной массы в области второго резонанса (рис. 14, кривая 3), а также задает сложный характер изменения ускорений (рис. 11), обусловленный реакцией как подрессоренной, так и неподдресоренной массы на мгновенные изменения уровня демпфирования, в результате чего упругодемпфирующие характеристики такой системы имеют форму бабочки с подрезанными крыльями (рис. 12).

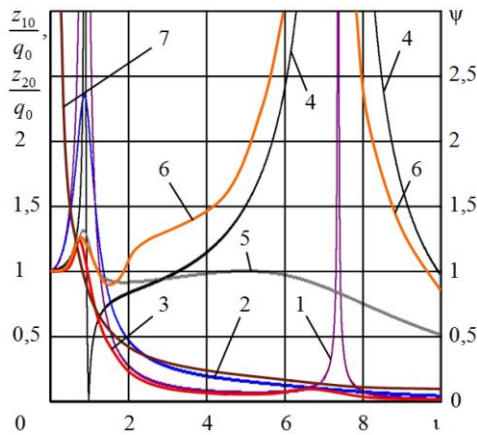


Рис. 13. Характеристики двухмассовой колебательной системы при гармоническом кинематическом возмущении: 1, 2, 3 – амплитудно-частотные характеристики перемещений подрессоренной массы систем: без демпфирования, с постоянным демпфированием, с оптимальным управлением демпфированием соответственно; 4, 5, 6 – амплитудно-частотные характеристики перемещений подрессоренной массы систем: без демпфирования, с постоянным демпфированием, с оптимальным управлением демпфированием соответственно; 7 – зависимость $\psi_{\max}^*(\omega)$ при оптимальном управлении демпфированием

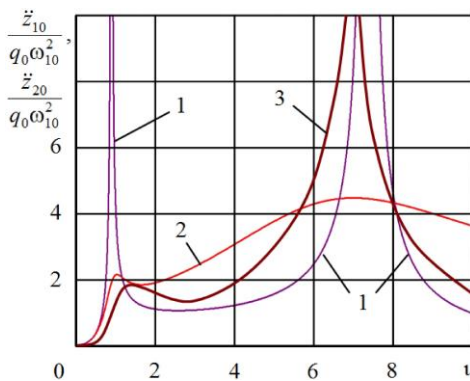


Рис. 14. Амплитудно-частотные характеристики ускорений подрессоренной массы в двухмассовой колебательной системе: 1 – без демпфирования; 2 – с постоянным демпфированием; 3 – при оптимальном управлении демпфированием

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1. Оптимальное мгновенное регулирование демпфирования обеспечивает существенное снижение амплитуд вертикальных перемещений подрессоренной

массы, а, следовательно, и тепловыделения в амортизаторах, однако при этом существенное снижение амплитуд вертикальных ускорений происходит в узком диапазоне резонансных частот подрессоренной массы.

2. Для достижения наибольшего эффекта необходимо изменять максимальное значение неупругого сопротивления в зависимости от частоты колебаний, не допуская перерегулирования. Последнее требование на практике выполнить невозможно, поскольку дорога задает спектр возмущений, содержащий множество гармоник с различными амплитудами и частотами. Поэтому при движении автомобиля с мгновенным переключением демпфирования неизбежно будет присутствовать перерегулирование демпфирования, что приведет к дополнительным толчкам и ударам в подвеске.

3. Использование оптимального мгновенного регулирования демпфирования в двухмассовой колебательной системе задает сложный характер изменения вертикальных ускорений подрессоренной массы, что не способствует повышению плавности хода.

4. Существенное снижение плавности колебаний подрессоренной массы отмечено при проведении экспериментальных исследований принципа оптимального мгновенного регулирования демпфирования.

Таким образом, оптимальное мгновенное регулирование демпфирования в подвеске автомобиля обеспечивает повышение виброзащитных свойств только в узкой области резонанса подрессоренной массы. Это обстоятельство, а также наличие ударов и шума в подвеске, связанное с мгновенным переключением демпфирования, ставит задачу изыскания и исследования способов плавного изменения демпфирования в цикле колебаний, обеспечивающего высокие виброзащитные свойства подвески во всем диапазоне ее рабочих частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябов И. М. КПД амортизатора транспортного средства при резонансе / И. М. Рябов, В. В. Новиков, К. В. Чернышов, А. В. Васильев // Эффективность эксплуатации транспорта: Межвузовский научный сборник. Саратовский государственный технический университет. – Саратов, 1995. – С. 81-86.
2. Исследование циклового способа регулирования неупругого сопротивления подвески АТС / И. М. Рябов, В. В. Новиков, К. В. Чернышов, А. В. Васильев // Эксплуатация современного транспорта: Межвуз. науч. сб. / Саратов. гос. техн. ун-т и др. – Саратов, 1997. – С. 96-102.
3. Рябов И. М. Распределение энергии в цикле колебаний подвески АТС / И. М. Рябов, В. В. Новиков, К. В. Чернышов, А. В. Васильев, О. В. Осинцев // Справочник. Инженерный журнал. – 1998. – №4. – С. 31-33.
4. Рябов И. М. Новый способ гашения колебаний / И. М. Рябов, В. В. Новиков, К. В. Чернышов, А. В. Васильев, О. В. Осинцев // Motauto'98: Proceeding = Труды / Union of mechanical engineering and etc. = Союз инженеров-механиков и др. – Sofia = София, 1998. – Vol. 3 = Ч. 3. – С. 153-156.
5. Ryabov I. M. Energy Analysis of Vehicle Suspension Oscillation Cycle / I. M. Ryabov, K. V. Chernyshov, A. V. Pozdeev // Procedia Engineering. Vol. 150 : 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A. A. Radionov, 2016. – P. 384-392.

6. Ryabov I. M. Efficiency of Shock Absorber in Vehicle Suspension / I. M. Ryabov, V. V. Novikov, A. V. Pozdeev // *Procedia Engineering*. Vol. 150 : 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov, 2016. – P. 354-362.

7. Фурунжиев Р.И. Исследование некоторых вопросов демпфирования колебаний автомобиля: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 1965. – 17 с.

8. Crosby M.J. The Active Damper – a New Concept for Shock and Vibration Control / M.J.Crosby, D.C. Karnopp // 43rd Shock and Vibration Bulletin, Part H, June, 1973. – P. 46-73.

9. Karnopp D. C. Vibration control using semi-active force generators / D. C. Karnopp, M. J. Crosby, R. A. Harwood // *Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry*. – 1974. – Vol. 96. – P. 619-626.

10. Рябов И.М., Новиков В.В. Амортизатор // Пат. 2142585 РФ, МПК 6 F 16 F 7/10, В 60 G 13/18. – 1999.

11. Рябов И.М., Новиков В.В. Амортизатор // Пат. 2142586 РФ, МПК 6 F 16 F 7/10, В 60 G 13/18. – 1999.

12. Новиков, В.В. Пневмогидравлические рессоры подвесок автотранспортных средств: монография / В. В. Новиков, И. М. Рябов. – Волгоград: РПК "Политехник", 2004. – 311 с.

13. Чернышов К. В. Оптимальное управление демпфированием подвески на основе принципа максимума / К.В. Чернышов, В.В. Новиков, И.М. Рябов // *Тракторы и с.-х. машины*. – 2006. – № 2. – С. 13-15.

14. Новиков В. В. Виброзащитные свойства подвесок автотранспортных средств: монография / В.В. Новиков, И.М. Рябов, К.В. Чернышов. – Волгоград, 2009. – 338 с.

15. Дьяков А.С. Оптимальное управление жёсткостью и демпфированием подвески АТС на основе принципа максимума Л.С. Понтрягина / А.С. Дьяков, А.В. Поздеев, А.В. Похлебин // *Вестник Академии военных наук*. – 2011. – № 2 (спецвыпуск). – С. 132-139.

16. Синтез алгоритмов оптимального управления демпфированием и жёсткостью подвески АТС / А. В. Поздеев,

В. В. Новиков, К. В. Чернышов, И. М. Рябов // *Грузовик*. – 2011. – № 6. – С. 2-6.

17. Пневмогидравлическая рессора быстроходной гусеничной машины / А.С. Дьяков, М.О. Котляренко, А.В. Поздеев, А.В. Похлебин, Ю.О. Шахмарданов // *Вестник Академии военных наук*. – 2011. – № 2 (спецвыпуск). – С. 125-132.

18. Регулируемые пневматические и пневмогидравлические рессоры подвесок автотранспортных средств : монография / А. В. Поздеев, В. В. Новиков, А. С. Дьяков, А. В. Похлебин, И. М. Рябов, К. В. Чернышов. – Волгоград, 2013. – 244 с.

19. Чернышов К. В. Обзор основных алгоритмов регулирования демпфирования в подвеске автомобиля / К. В. Чернышов, М. Ю. Хрипков // *Символ науки*. – 2016. №4, ч.3. – С. 140-144.

20. Стенды для испытания подвесок наземных транспортных средств : учеб. пособ.(гриф) . доп. УМО вузов по университетскому политехническому образованию / В.В. Новиков, И.М. Рябов, А.С. Дьяков, А.В. Поздеев, А.В. Похлебин. - Волгоград, 2013. – 114 с.

21. Чернышов К.В. Теоретические основы оптимального двухступенчатого регулирования жесткости подвески транспортного средства в цикле колебаний / К.В. Чернышов, И.М. Рябов, А.В. Поздеев // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2018. – Т.6, №2. – С. 10-17.

22. Novikov V. V. Research and testing complex for analysis of vehicle suspension units / V. V. Novikov, A. V. Pozdeev, A. S. Diyakov // *Procedia Engineering*. Vol. 129 : International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015) / ed. by A.A. Radionov. 2015. – P. 465-470.

23. Чернышов К.В. Потенциальные виброзащитные свойства подвесок с двухступенчатым регулированием жесткости в цикле колебаний / К.В. Чернышов, И.М. Рябов, А.В. Поздеев // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2018. – Т.6, №2. – С. 18-25.

Vibration Isolation Properties of Vehicle Suspension at Optimal Instantaneous Damping Control in Oscillation Cycle

Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Ryabov I.M.

Volgograd State Technical University
Volgograd, Russia

chernykv@rambler.ru, pozdeev.vstu@gmail.com, rjabov1603@mail.ru

Abstract. The article is dedicated to the study of anti-vibration properties of vehicle suspension at optimal instantaneous damping control in oscillation cycle. These suspensions in foreign literature are called "semi-active control suspensions". However, its vibration isolation properties have not been thoroughly analyzed. This article presents the results of theoretical and experimental study of vibration isolation properties of one- and two-mass oscillatory systems simulating a suspension at optimal instantaneous damping

control in oscillation cycle. The results proved that optimal instantaneous damping control does not improve vibration isolation properties in response to shocks and noise in the suspension, thus setting a problem of searching and studying the ways of a smooth damping change in oscillation cycle.

Keywords: vehicle suspension, vibroprotective properties, damping, optimal control.

Результаты стендовых испытаний пневмоподвески с воздушным и гидравлическим демпфированием

Новиков В.В., Поздеев В.В., Чумаков Д.А.

Волгоградский государственный технический университет

Волгоград, Россия

nvv_60@mail.ru, pozdeev.vstu@gmail.com, chda1991@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты стендовых испытаний одноопорной пневматической подвески, включающей подрессоренную и неподрессоренную массы, пневматическую рессору с резинокордной оболочкой рукавного типа, воздушный демпфер, установленный в поршне пневматической рессоры, ресивер и гидравлический амортизатор. Приведены упругие характеристики пневматической рессоры с разными рабочими объемами, демпфирующая характеристика гидравлического амортизатора, осциллограммы свободных затухающих колебаний подрессоренной массы 0,5 т после толчка подвески снизу вверх и вниз на 100 мм, амплитудно-частотные характеристики размахов колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс при гармоническом кинематическом возмущении с амплитудой 12 мм. С помощью стационарно установленной профессиональной тепловизионной камеры определены максимальная температура и время выхода на установившийся температурный режим различных поверхностей пневматической рессоры.

Ключевые слова: пневматическая рессора, воздушный демпфер, гидроамортизатор, стендовые испытания, нагрев.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей повышения виброзащитных свойств подвесок автотранспортных средств (АТС) является применение пневматических рессор (ПР) с резинокордными оболочками рукавного типа [1], которые работают совместно с воздушными демпферами (ВД) и гидроамортизаторами (ГА) [2-31]. Однако недостаток исследований в данной области сдерживает внедрение подобных систем подрессоривания.

Ниже приведено краткое описание экспериментальной установки [30-32] и результаты стендовых испытаний пневмоподвески, которые представлены в виде графиков упругих характеристик ПР с разными рабочими объемами, демпфирующей характеристики ГА, осциллограмм свободных затухающих колебаний подрессоренной массы, амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) размахов колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс, а также в виде графиков зависимости температуры от времени выхода на установившийся температурный режим для различных поверхностей ПР.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из подрессоренной (ПМ) 1 и неподрессоренной (НПМ) 2 масс, пружины 3, имитирующей шину колеса, ПР 4 и ГА 5 фирмы КУВ, который с помощью направляющих рычагов подвески можно устанавливать с разным передаточным отношением, что обеспечивает изменение его усилия, приведенного к оси подвески.

Основные элементы ПР: резинокордная оболочка (РКО) рукавного типа 4; удлиненный полый поршень 6; ВД 7, представляющий собой дроссель, диаметром 6 мм и обратный клапан, открытый на ходе сжатия. Рабочий объем РКО под статической нагрузкой составлял 11 л, а объем поршня – 7,6 л. Кроме того, полость РКО можно соединять посредством шланга с ресивером, объемом 20 л. Диаметр сечения шланга – 20 мм.

Испытания проводились на динамическом стенде кафедры «Автоматические установки» ВолгГТУ, разработанном совместно с компаниями BISS-ITW (Индия) и ООО «Испытательные стенды» (Россия). Основными силовыми элементами стенда являются горизонтальное опорное основание, гидропульсатор, вертикальная направляющая стойка с подвижной рамой и грузами, имитирующими подрессоренную массу, лебедка. Кроме того, в состав стенда входят: насосная станция с радиатором и сервогидроклапанами, стойка блока электронного управления режимами работы стенда и записи регистрируемых параметров. Данный стенд позволяет испытывать разные типы подвесок в широком диапазоне силового и кинематического нагружения.

При испытаниях задавались следующие параметры и режимы нагружения: ПМ – 500 кг; НПМ – 130 кг; давление в ПР – 0,12 МПа; высота ПР под статической нагрузкой – 450 мм; величина толчка гидропульсатора вверх и вниз – 100 мм; амплитуда гармонических колебаний гидропульсатора – 12 мм. Испытания проводились в лаборатории при температуре 22...23 °С без применения принудительного обдува ПР воздухом для охлаждения. Результаты испытаний показаны на рис. 2, 3 и 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Из рис. 2 (а) видно, что при увеличении рабочего объема ПР с 11 до 38,6 л жесткость подвески резко уменьшается. Из рис. 2 (б) следует, что усилие ГА на ходе отбоя значительно больше, чем на ходе сжатия.

На рис. 3 (а) зоны наибольшего нагрева поверхностей элементов ПР показаны более ярким цветом. Из рис. 3 (б) следует, что наиболее высокая максимальная температура нагрева ПР достигается при установке в поршне дросселя с обратным клапаном. При этом максимальная температура нагрева поршня (кривые 1) выше, чем РКО (кривые 2). При увеличении рабочего объема ПР с 18,6 до 38,6 л и установке в поршне дросселя с обратным клапаном температура нагрева поршня снижается с +90 до +30 °С, средней части РКО – с +80 до +30 °С, а пояса заворота РКО – с +110 до 37,2 °С, то есть в 2,5...3 раза (рис. 2, б).

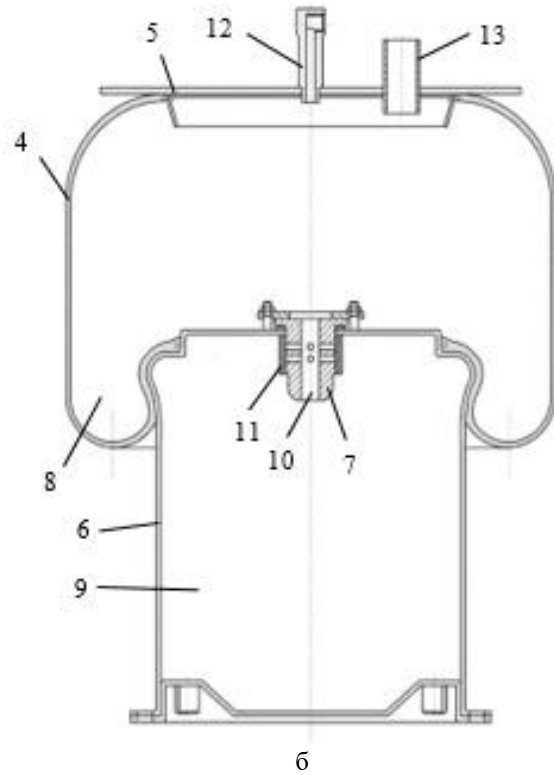
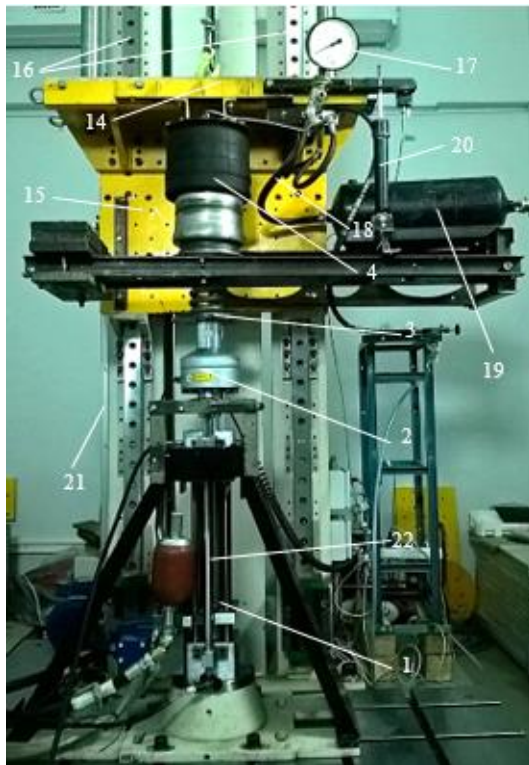


Рис. 1. Экспериментальная установка для стендовых испытаний пневморессоры с воздушным демпфером и гидроамортизатором: а – общий вид; б – конструкция пневморессоры; 1 – гидропульсатор; 2 – датчик силы; 3 – опорная тарелка гидропульсатора; 4 – РКО ПР; 5 – верхняя крышка; 6 – полый поршень ПР; 7 – демпфирующий узел; 8 – надпоршневая полость; 9 – поршневая полость; 10 – дроссель; 11 – обратный клапан; 12 – заправочный штуцер; 13 – патрубок; 14 – траверса; 15 – подрессоренная масса; 16 – вертикальные направляющие стенда; 17 – манометр; 18 – шланг; 19 – ресивер; 20 – ГА; 21 – датчик перемещения и скорости; 22 – датчик положения гидропульсатора

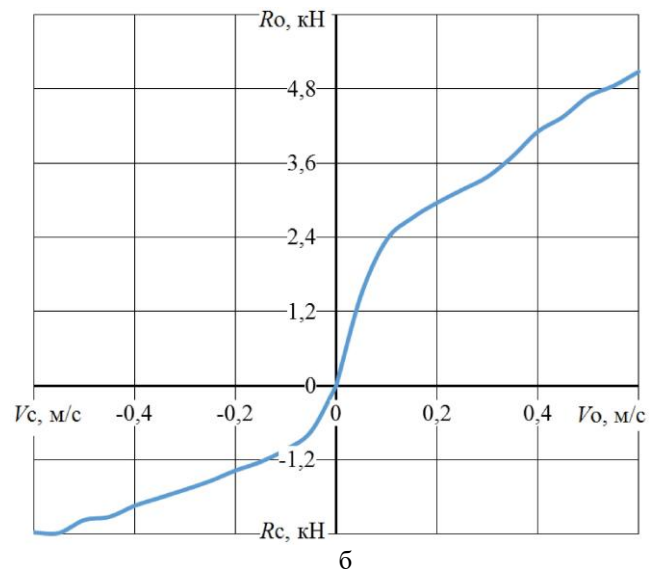
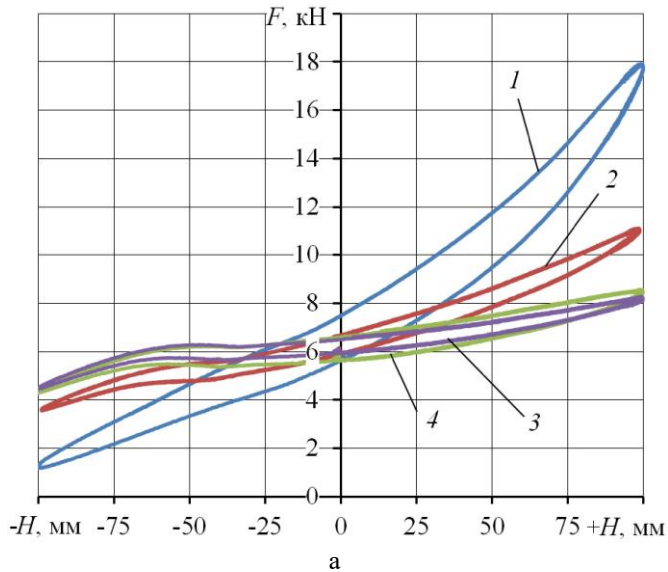


Рис. 2. Характеристики элементов испытываемой подвески: а – упругие характеристики ПР с разными рабочими объемами; б – демпфирующая характеристика ГА КУВ; 1 – 11 л; 2 – 18,6 л; 3 – 31 л; 4 – 38,6 л

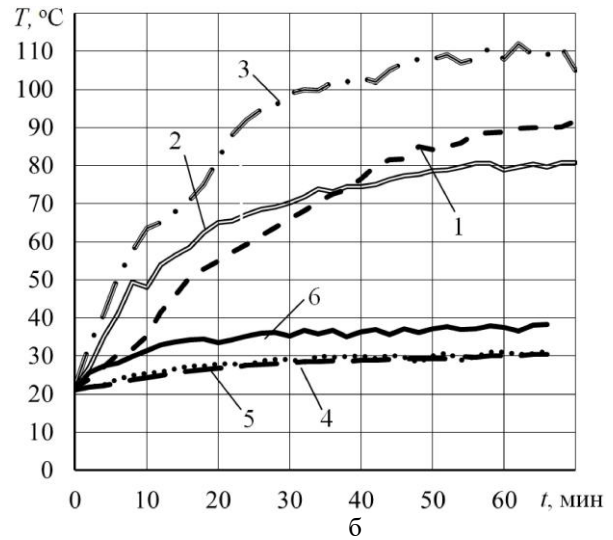
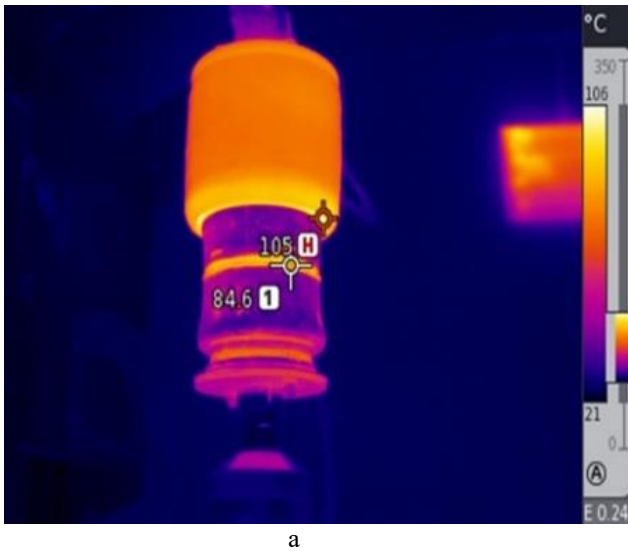


Рис. 3. Результаты термографических испытаний ПР: *а* – термограмма ПР с рабочим объемом 18,6 л, с дросселем 6 мм и обратным клапаном; *б* – кривые нагрева ПР при разных рабочих объемах с демпфирующим узлом в виде дросселя и обратного клапана; 1, 2, 3 – ПР рабочим объемом 18,6 л; 4, 5, 6 – ПР рабочим объемом – 38,6 л; 1, 4 – нагрев стенки поршня; 2, 5 – нагрев поверхности средней части РКО; 3, 6 – нагрев пояса заворота РКО

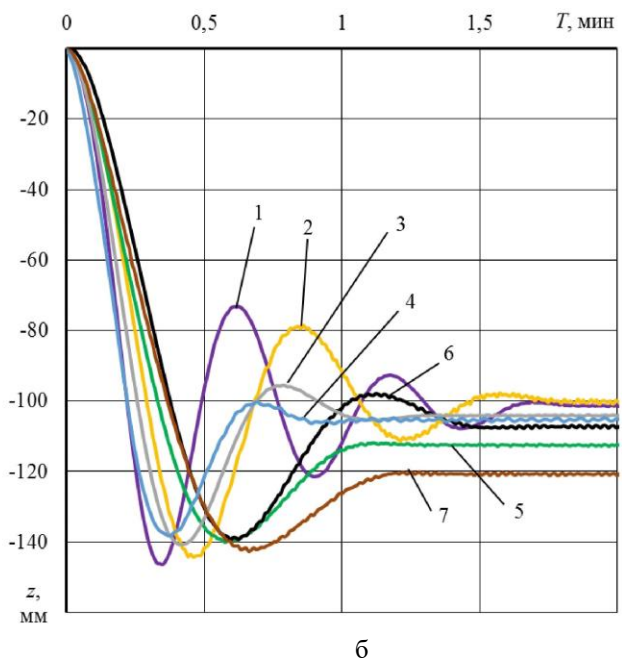
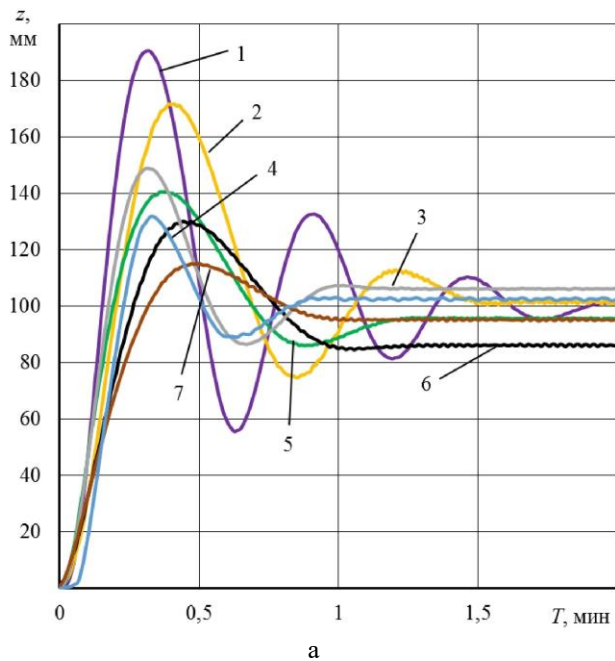
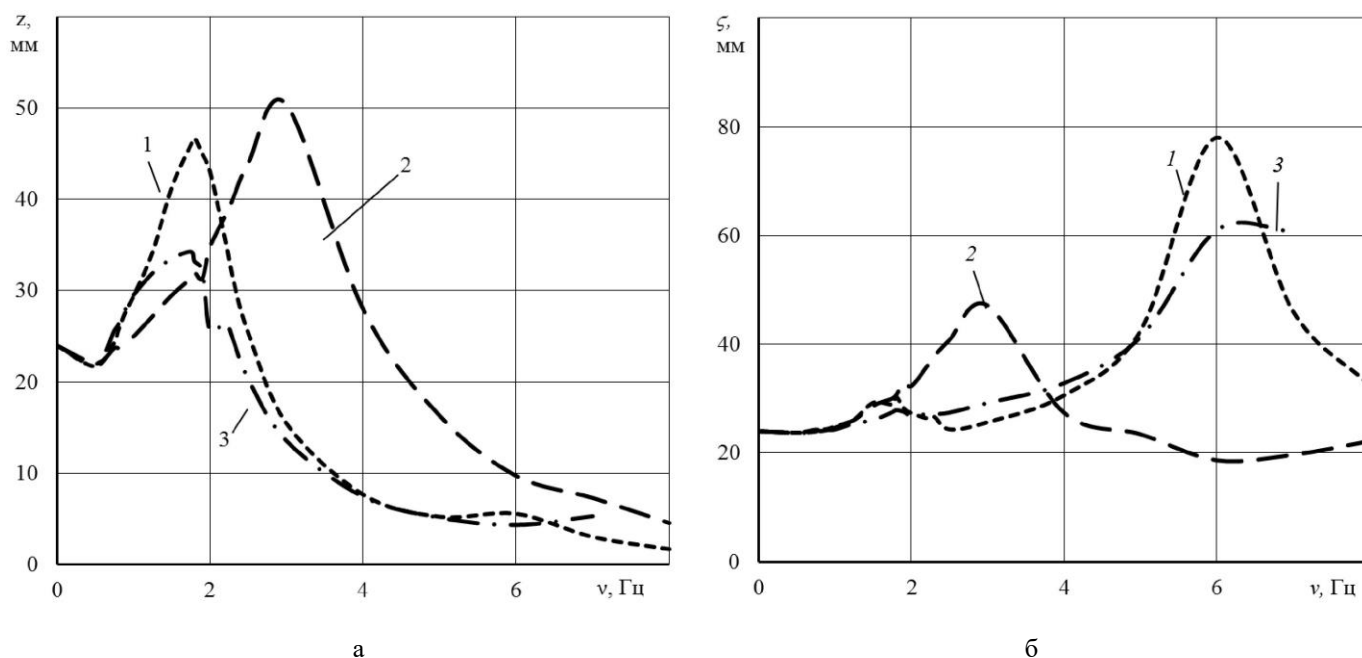


Рис. 4. Осциллограммы свободных затухающих колебаний ПМ на пневморессоре с разными рабочими объемами при отсутствии и наличии гидравлического амортизатора (ГА) и воздушного демпфера (ВД): *а* – после толчка на 100 мм вверх; *б* – после толчка на 100 мм вниз; 1 – ПР с рабочим объемом 11 л; 2 – ПР с рабочим объемом 18,6 л; 3 – ПР с рабочим объемом 18,6 л и ВД; 4 – ПР с рабочим объемом 18,6 л, ВД и ГА; 5 – ПР с рабочим объемом 31 л; 6 – ПР с рабочим объемом 38,6 л; 7 – ПР с рабочим объемом 38,6 л и ВД

Из рис. 4 (а) видно, что после толчка поршня ПР вверх на 100 мм увеличение рабочего объема с 11 л (кривая 1) до 18,6 л (кривая 2) уменьшает время затухания колебаний ПМ с 1,92 до 1,5 с, снижает собственную частоту колебаний ПР с 1,67 до 1,25 Гц. Это соответствует повышению относительного коэффициента затухания с 0,36 до 0,42. Увеличение рабочего объема ПР до 31 л (кривая 5) и 38,6 л (кривая 6) уменьшает время затухания ПМ до 1,23 и 1,0 с, соответственно. При этом характер свободных затухающих

колебаний приближается к аperiodическому закону. Кроме того, при увеличении объема ПР с 11 л (кривая 1) до 38,6 л (кривая 6) амплитуда первого полупериода колебания снижается с 88 до 29 мм. При этом установка в поршне ВД (кривые 3 и 7) практически не влияет на время затухания колебаний ПМ. При рабочем объеме 18,6 л установка в поршне ВД (кривая 3) снижает амплитуду первого полупериода колебания с 70,8 до 48 мм, то есть почти в 1,5 раза.



На рис. 5 показаны экспериментальные АЧХ размахов вертикальных колебаний ПМ и НПМ на пневмоподвеске с рабочим объемом 18,6 л при гармоническом кинематическом возмущении с амплитудой 12 мм.

Рис. 5. Экспериментальные АЧХ размахов перемещений ПМ (а) и НПМ (б) на пневмоподвеске с рабочим объемом 18,6 л и демпферами: 1 – слабый ГА; 2 – мощный ГА; 3 – ВД и слабый ГА

Применение ослабленного ГА совместно с ВД (кривая 4) практически в 2 раза снижает амплитуду колебаний ПМ, и характер свободных затухающих колебаний приближается к аperiodическому закону.

Из рис. 4 (б) видно, что после толчка поршня ПР вниз на 100 мм при увеличении рабочего объема с 11 л (кривая 1) до 18,6 л (кривая 2) время затухания и амплитуда колебаний ПМ уменьшаются незначительно, а собственная частота колебаний снижается с 1,81 до 1,28 Гц. Это соответствует повышению относительного коэффициента затухания с 0,18 до 0,25. Увеличение рабочего объема ПР до 31 л (кривая 5) и 38,6 л (кривая 6) уменьшает время затухания колебаний до 1,1 и 1,5 с, соответственно. При этом характер свободных затухающих колебаний приближается к аperiodическому закону. Увеличение рабочего объема ПР с 11 л (кривая 1) до 38,6 л (кривая 6) на амплитуду колебаний влияет незначительно. При этом установка в поршне ВД при рабочих объемах 18,6 (кривая 3) и 38,6 л (кривая 7) уменьшает время затухания колебаний ПМ до 1,36 и 1,17 с и практически не влияет на уменьшение амплитуды колебаний. Эффективность совместной работы ПД с ГА при спуске на 100 мм снижается по сравнению с подъемом на 100 мм. Из рис. 5 видно, что пневмоподвеска со слабым ГА (кривая 1) обеспечивает гашение колебаний ПМ в зоне низких частот с коэффициентом виброзащиты, равном 1,9. Это соответствует относительному коэффициенту затухания $\psi = 0,32$, который характерен для большинства подвесок современных автомобилей. При этом колебания НПМ в зоне высокочастотного резонанса колеса гасятся значительно хуже – с коэффициентом виброзащиты, равном 3,2. По сравнению со слабым демпфированием увеличение мощности ГА (кривая 2) приводит к смещению резонанса в сторону более высоких частот на 1 Гц и увеличению размахов резонансных колебаний ПМ более чем в 2,5 раза. Однако

при этом колебания НПМ в зоне высокочастотного резонанса колеса становятся меньше кинематического возмущения. Применение в пневмоподвеске со слабым ГА воздушного демпфирования (кривая 3) обеспечивает дополнительное снижение колебаний в низкочастотном резонансе ПМ на 28 %, а в высокочастотном резонансе НПМ на 23 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1. Разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить стендовые испытания пневмоподвески с комбинированным воздушно-гидравлическим демпфированием.
2. Применение воздушно-гидравлического демпфирования при увеличении рабочего объема пневморессоры приводит к существенному повышению виброзащитных свойств пневмоподвески АТС.
3. Нагрев элементов пневморессоры даже при отсутствии ее обдува воздухом не превышает допустимых пределов, максимальные значения которых при подключении ресивера резко уменьшаются, что позволяет рекомендовать применение воздушного демпфера для повышения виброзащитных свойств пневмоподвески АТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Певзнер Я.М. Пневматические и гидропневматические подвески / Я.М. Певзнер, А.М. Горелик. – М.: Машгиз, 1963. – 319 с.
2. Новиков В.В. Стендовые испытания пневмоподвески автобуса ВЗТМ-32731 с гидроамортизаторами разной мощности / В.В. Новиков // Грузовик. 2007. – № 6. – С. 41-44.
3. Новиков В.В. Стендовые испытания пневмоподвески с воздушным демпфером в виде дросселя и обратного клапана / В.В. Новиков // Грузовик. 2007. – № 7. – С. 43-46.
4. Новиков В.В. Совместная работа воздушного демпфера и гидроамортизатора / В.В. Новиков, С.О. Букаев, А.С. Дьяков //

Автомобильная промышленность. М.: Машиностроение, 2008. – №1. – С. 20-22.

5. Калашников Б. А. Системы амортизации объектов с дискретной коммутацией упругих элементов: монография. – Омск: ОмГТУ, 2008. – 344 с.

6. Новиков В.В. Виброзащитные свойства подвесок автотранспортных средств: монография / В.В. Новиков, И.М. Рябов, К.В. Чернышов. – Волгоград, 2009. – 338 с.

7. П. м. 85403 РФ, МПК В60G11/26. Задняя подвеска колес автомобиля / В.В. Новиков, Ю.Г. Лапынин, И.М. Рябов, А.С. Горобцов, К.В. Чернышов, А.С. Дьяков, С.О. Букаев, А.В. Поздеев, Д.А. Николаев; НОУ СПО «Волгогр. колледж газа и нефти ОАО «Газпром». – Бюл. № 22, 2009.

8. Новиков В.В. Определение оптимальных алгоритмов регулирования активно-управляемых пневмоподвесок / В.В. Новиков, А.В. Поздеев – Грузовик &. - 2010. - № 5. - С. 6-10.

9. Определение условий оптимального регулирования жёсткости пневматической подвески АТС / К.В. Чернышов, А.В. Поздеев, В.В. Новиков, И.М. Рябов – Грузовик. - 2010. - № 11. – С. 2-5.

10. Чернышов К.В. Теоретические основы оптимального двухступенчатого регулирования жесткости подвески транспортного средства в цикле колебаний / К.В. Чернышов, И.М. Рябов, А.В. Поздеев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2018. – Т.6, №2. – С. 10-17.

11. П. м. 109698 РФ, МПК В 60 G 11/27, F 16 F 9/04. Пневматическая подвеска / В.В. Новиков, А.В. Поздеев, А.С. Дьяков, В.И. Карлов, Е.А. Черкашина; ГОУ ВПО ВолгГТУ. - 2011.

12. П. м. 109697 РФ, МПК В 60 G 11/00. Подвеска колеса автомобиля / И.М. Рябов, А.В. Поздеев, В.В. Новиков, А.С. Дьяков, К.В. Чернышов; ГОУ ВПО ВолгГТУ. - 2011.

13. Регулируемые пневматические и пневмогидравлические рессоры подвесок автотранспортных средств / А.В. Поздеев, В.В. Новиков, А.С. Дьяков и др. – Волгоград: Изд-во Волгоградского государственного технического университета, 2013. – 244 с.

14. Исследования двухкамерной пневматической рессоры с коммутацией полостей / А.В. Поздеев, А.С. Дьяков, В.В. Новиков, И.М. Рябов // Грузовик. - 2013. - № 1. - 35-37.

15. Саморегулируемые двухкамерные пневматические рессоры с коммутацией полостей / А.В. Поздеев, А.С. Дьяков, В.В. Новиков, И.М. Рябов // Грузовик. - 2013. - № 9. - 2-5; 2-я стр. обл.

16. Поздеев А.В. Виброзащитные свойства двух полостных пневматических рессор на основе синтеза оптимальных алгоритмов коммутации полостей // Технология колёсных и гусеничных машин. - 2015. - № 1. - С. 27-31.

17. Чернышов К.В. Потенциальные виброзащитные свойства подвесок с двухступенчатым регулированием жесткости в цикле колебаний / К.В. Чернышов, И.М. Рябов, А.В. Поздеев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2018. – Т.6, №2. – С. 18-25.

18. Виброзащитные свойства пневматической подвески с динамическим гасителем колебаний колёс и сухим трением / В.В. Новиков, А.В. Поздеев, Д.А. Чумаков, И.А. Голяткин // Оборонная техника. - 2015. - № 9-10. - С. 102-106.

19. Климентьев Е.В. Математическое моделирование термодинамических процессов в пневматических элементах с воздушным демпфированием / Е.В. Климентьев, В.С. Корнеев,

С.А. Корнеев // Омский научный вестник. – 2015. – № 3 (143). – С. 130-138.

20. Климентьев Е.В. Численный анализ работы пневматического амортизатора при стандартном режиме нагружения и разных алгоритмах управления / Е.В. Климентьев, В.С. Корнеев, С.А. Корнеев // Омский научный вестник. 2015. – № 3 (143). – С. 138-145.

21. Korneev S.A. Gas-dynamic processes mathematical modeling in pneumatic components with air damping / S.A. Korneev, V.S. Korneev, E.V. Klimentiev // Procedia Engineering. Vol. 113 : International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015) / ed. by A.A. Radionov. – [Elsevier publishing], 2015. – P. 276-281.

22. Корнеев С. А. Основы технической теории пневматических амортизаторов: монография / С. А. Корнеев, В. С. Корнеев, А. В. Зубарев, Е. В. Климентьев. – ОмГТУ. – Омск, 2016. – 147 с.

23. Зубарев, А.В. Способ технического обеспечения температурного режима работы амортизатора воздушного демпфирования / А.В. Зубарев, Е.В. Климентьев, В.С. Корнеев, С.А. Корнеев // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. – № 1. – С. 43-45.

24. Совместная работа пневматической подвески АТС с динамическим гасителем колебаний колёс и гидроамортизатором / В.В. Новиков, А.В. Поздеев, Д.А. Чумаков, А.М. Ковалев // Вестник машиностроения. - 2017. - № 7. - С. 34-39.

25. Корнеев, С.А. Термодинамический метод построения рабочих характеристик пневматических элементов (воздушных пружин) с упруго деформируемой резинокордной оболочкой / С.А. Корнеев, В.С. Корнеев, В.А. Адонин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 4 (56). – С. 8-18.

26. Задняя пневмоподвеска колёс автомобиля с комбинированной демпфирующей системой / В.В. Новиков, И.М. Рябов, К.В. Чернышов, А.В. Поздеев, Д.А. Чумаков // Прогресс транспортных средств и систем – 2018 : материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.) / редкол.: И. А. Каляев, Ф. Л. Черноусько, В. М. Приходько [и др.] ; ВолгГТУ, РФФИ, «ФНПЦ «Титан–Баррикады». – Волгоград, 2018. - С. 65-67.

27. Математическая модель пневматической подвески с комбинированной демпфирующей системой / К.В. Чернышов, В.В. Новиков, И.М. Рябов, А.В. Поздеев, Д.А. Чумаков // Прогресс транспортных средств и систем – 2018 : материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.) / редкол.: И. А. Каляев, Ф. Л. Черноусько, В. М. Приходько [и др.] ; ВолгГТУ, РФФИ, «ФНПЦ «Титан–Баррикады». - Волгоград, 2018. - С. 57-59.

28. Пневматическая подвеска с упругой характеристикой в виде «бабочки» / В.В. Новиков, А.С. Дьяков, А.В. Поздеев, Д.А. Чумаков // Прогресс транспортных средств и систем – 2018 : материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.) / редкол.: И. А. Каляев, Ф. Л. Черноусько, В. М. Приходько [и др.] ; ВолгГТУ, РФФИ, «ФНПЦ «Титан–Баррикады». - Волгоград, 2018. - С. 75-77.

29. Новиков, В.В. Термографические исследования резинокордной пневматической рессоры на стенде-гидропульсаторе / В.В. Новиков, А.В. Поздеев, Д.А. Чумаков // Прогресс транспортных средств и систем – 2018 : материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.) / редкол.: И. А. Каляев, Ф. Л. Черноусько, В. М. Приходько [и др.] ; ВолгГТУ,

РФФИ, «ФНПЦ «Титан–Баррикады». - Волгоград, 2018. - С. 61-63.

30. Новиков В.В. Экспериментальное исследование влияния дополнительного объёма и демпфирующего устройства на свободные затухающие колебания диафрагменных пневматических рессор / В.В. Новиков, А.В. Поздеев, Д.А. Чумаков // Вестник Иркутского гос. технического ун-та. – 2018. – Т. 22, № 10. – С. 212-226.

31. Экспериментальное исследование пневматической подвески с комбинированным демпфированием / В. В. Новиков, И. М. Рябов, А. В. Поздеев, К. В. Чернышов, Д. А. Чумаков // Грузовик. – 2018. – № 9. – С. 3-7.

32. Novikov, V. V. Research and testing complex for analysis of vehicle suspension units / V. V. Novikov, A. V. Pozdeev, A. S. Diyakov // Procedia Engineering. Vol. 129 : International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015) / ed. by A.A. Radionov, 2015. – P. 465-470.

Results of Bench Tests of Air Suspension with Air-Hydraulic Damping

Novikov V.V., Pozdeev A.V., Chumakov D.A.

Volgograd State Technical University

Volgograd, Russia

nvv_60@mail.ru, pozdeev.vstu@gmail.com, chda1991@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of bench tests of a single-support suspension, including sprung and unsprung masses, pneumatic spring with a sleeve-type rubber-cord casing, air damper mounted in the piston of the air springs, receiver and hydraulic shock absorber. The article contains the following: elastic characteristics of air springs with different operating volumes, damping characteristics of the hydraulic shock absorber, oscillograms of free damped oscillations of the sprung mass of 0.5 t after the push of the suspension from the bottom up and down by 100

mm, amplitude-frequency characteristics of the swing of the sprung and unsprung masses at a harmonic kinematic disturbance with an amplitude of 12 mm. The maximum temperature and the time of reaching the steady-state temperature of the various surfaces of the air spring are determined with the help of a thermal imager.

Keywords: air spring, air damper, hydraulic shock absorber bench tests, heating.

Влияние асимметричных начальных несовершенств формы на свободные колебания тонких оболочек

Серёгин С.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Комсомольск-на-Амуре, Россия
Seregin-komsHome@yandex.ru

Аннотация. Тонкие круговые цилиндрические оболочки широко используются в качестве основных несущих элементов, применяемых в авиации космической технике. Такие конструкции имеют неизбежные начальные отклонения от идеальной круговой формы, обусловленные изготовлением их на производстве. В настоящей статье изучаются изгибные колебания тонких оболочек. В работе впервые показана возможность возникновения дополнительной зоной расщепления изгибного частотного спектра, обусловленная наличием у оболочки начальных несовершенств формы. Установлено, что расщепление частотного спектра имеет место не только в случаях, когда число волн окружных динамических деформаций равно числу волн несовершенств формы оболочки, как это принято считать в настоящее время, но и в случаях, когда число формообразующих волн в два раза меньше волн несовершенств формы.

Ключевые слова: колебания, оболочка, частотный спектр, расщепление

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время принято считать, что осесимметричная часть динамического прогиба оказывает существенное влияние только на нелинейное поведение оболочек, а при колебаниях с малыми амплитудами, при решении таких задач, в математической модели достаточно учитывать лишь сопряженные изгибные формы [1-2 и др.].

Однако, в работах [3-6] на примере более простой (предельной) задачи колебаний бесконечно длинной круговой цилиндрической оболочки – кольца, находящегося в условиях плоской деформации показано, что уже в линейной постановке учет радиальных колебаний [7] приводит как к качественно, так и количественно лучшим результатам, чем взаимодействие лишь сопряженных изгибных форм. Результаты этой работы качественно согласуются с численными исследованиями [8–12]. Предложенная математическая модель получила свое распространение в задачах динамики оболочек конечной длины, несущих присоединенную массу, ослабленных отверстием, в которых позволила устранить ряд качественных противоречий и установить новые эффекты и особенности взаимодействия сопряженных изгибных форм с радиальными [13]. Результаты этих работ хорошо согласуются с численными исследованиями, в которых также обозначены противоречия и погрешности аналитических решений.

Настоящая работа является продолжением исследования [14-15] в том плане, что полученные результаты для

предельной задачи – колебаний изолированного, геометрически несовершенного кольца, обобщаются на случай колебаний оболочки уже конечной длины, имеющей начальные отклонения от идеальной круговой формы.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Пусть шарнирно опертая по торцам круговая цилиндрическая оболочка массой M_0 , радиусом R , длиной l и толщиной h совершает малые изгибные колебания вблизи зоны основного резонанса.

Линеаризованные уравнения движения. Анализ основывается на известных уравнениях теории пологих оболочек, которые для изотропной несовершенной оболочки имеют вид [15]:

$$\begin{aligned} \frac{D}{h} \nabla^4 w &= \frac{\partial^2 w_0}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\beta^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\alpha^2} - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\ \frac{1}{E} \nabla^4 \Phi &= -\frac{\partial^2 w_0}{\alpha^2} \frac{\partial^2 w}{\beta^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\alpha^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) $D = Eh^3/(12(1 - \mu^2))$ цилиндрическая жесткость, где E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона; ∇^4 – бигармонический оператор Лапласа; $w(x, y, t)$ – динамический прогиб; $\Phi(x, y, t)$ функция напряжений; ρ – массовая плотность; t – время.

В настоящей работе математическая модель, предложенная для более простой (предельной) задачи колебаний бесконечно длинной круговой цилиндрической оболочки – кольца, находящегося в условиях плоской деформации [3], обобщается на случай колебаний геометрически несовершенной оболочки конечной длины.

Уточнение конечномерной модели предполагает, что динамическая асимметрия уже в линейной постановке приводит не только к связанности сопряженных изгибных форм, но и к взаимодействию низкочастотных изгибных колебаний оболочки с высокочастотными радиальными колебаниями. Динамический прогиб оболочки в новом подходе имеет вид [3,16]:

$$w(x, y, t) = \sum_{n,m}^N (f_1^{n,m} \sin \beta y + f_2^{n,m} \cos \beta y + f_3^m) \sin \alpha x \quad (2)$$

в котором $f_1^{n,m}(t)$ и $f_2^{n,m}(t)$ обобщенные координаты; дополнительно введенная к [1] обобщенная координата $f_3^m(t)$ отвечает радиальным колебаниям.

Известно, что наибольшее влияние на статические и динамические характеристики оболочек оказывают те начальные несовершенства, которые имеют такую же форму, как и прогибы, возникающие при колебаниях или потере устойчивости оболочек [1-2, 16]. Поэтому, с теоретической и практической сторон это случай наиболее интересен.

Пусть оболочка имеет начальные отклонения от идеальной круговой формы, изменяющиеся по закону:

$$w_0(x, y) = f_0 \sin(\beta_1 y + \varphi_0) \sin \alpha x = (f_{10} \sin \beta y + f_{20} \cos \beta y) \sin \alpha x \quad (3)$$

где $f_{10} = f_0 \cos \varphi_0$; $f_{20} = f_0 \sin \varphi_0$; f_0 – амплитуда начальных отклонений; φ_0 – начальный угол отсчета

СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ

Соответствующие подстановки и ортогонализация уравнения движения (1) в первом приближении приводит к системе трех связанных динамических уравнений относительно безразмерных координат $a_i = f_i / h$ ($i = 1, 2, 3$):

$$\begin{aligned} \ddot{a}_1 + c_{11}a_1 + c_{12}a_{10}a_{20}a_2 + c_{13}a_{10}a_3 &= 0, \\ \ddot{a}_2 + c_{21}a_{10}a_{20}a_1 + c_{22}a_2 + c_{23}a_{20}a_3 &= 0, \\ \ddot{a}_3 + c_{31}a_{10}a_1 + c_{32}a_{20}a_2 + c_{33}a_3 &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где точками обозначено дифференцирование по безразмерному времени $\tau = \lambda t$ (λ – собственная частота),

Квадраты безразмерных частот, соответствующие изгибным и радиальным формам колебаний круговой цилиндрической оболочки, определяются по формулам:

$$\omega_n^2 = \frac{\rho}{E} R^2 \lambda^2 = \frac{\varepsilon(1 + \theta^2)^2}{12(1 - \mu^2)} + \frac{\theta^4}{(1 + \theta^2)^2}; \quad p_1^2 = 1 + \frac{\varepsilon\theta^4}{12(1 - \mu^2)}$$

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Рассмотрим оболочку со следующими геометрическими и физическими характеристиками: $l/R = 1$; $R/h = 200$; $R = 1$; $E = 2 \cdot 10^{11}$ МПа; $\rho = 7800$ кг/м³; $\mu = 0,3$. Минимальной частоте спектра оболочки с такими параметрами соответствует $n_{\min} = 8$. Пусть оболочка имеет начальные неправильности формы $f_0 = h$, изменяющиеся по закону (3) и число волн несовершенств – $n_0 = 8$. Результаты расчета сведены на график, рис. 1. Сплошной линией обозначена большая из расщепленных безразмерных собственных частот Ω_{n2} , штриховой – меньшая Ω_{n1} , пунктирной – безразмерная частота колебаний идеальной оболочки Ω_n .

Из рис. 1 видим, что расщепление изгибного частотного спектра возникает не только при $n = n_0$, как это принято считать в настоящее время [1–2 и др.], но и при $n = 2n_0$. В случае, когда $n = n_0$ обе расщепленные частоты меньше частоты колебаний геометрически совершенной оболочки,

что противоречит традиционному решению [1], где частоты больше, и согласуется с новым аналитическим решением и решением, представленном в [17-18]. Снижение частоты (см. рис. 1) $\Omega_{n2} - \Omega_{n1}$ составляет 5%. В аналитическом решении расстройка частотного спектра (в рассматриваемом примере $\varepsilon = 0,102$, $\theta = 0,393$) $\Omega_{n2} - \Omega_{n1} = 9\%$. В случае, когда $n = 2n_0$ одна из расщепленных частот Ω_{n2} больше частоты колебаний соответствующей идеальной оболочки, другая Ω_{n1} – меньше. Расстройка спектра может быть довольно существенной. В рассматриваемом примере превосходит известный случай ($n = n_0$) в пять раз.

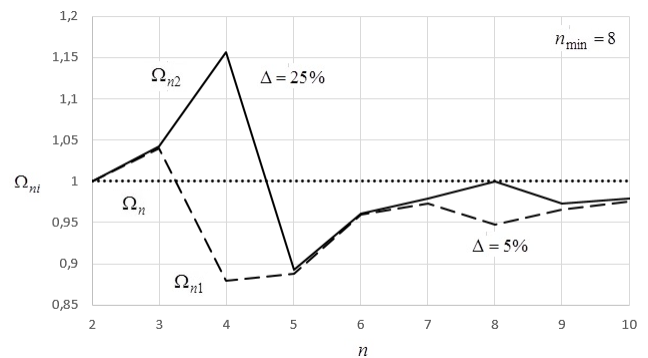


Рис. 1. Зависимость расщепленных частот преимущественно изгибных колебаний от количества формообразующих волн n .

Следует отметить, что аналогичный эффект был обнаружен автором на примере колебаний несовершенного кольца, находящегося в условиях плоской деформации [14, 15].

ВЫВОДЫ

В работе впервые обнаружена возможность возникновения зоны расщепления изгибного частотного спектра, обусловленная наличием у оболочки начальных отклонений от идеальной круговой формы. Асимметричные несовершенства формы приводят к расщеплению изгибного частотного спектра. При этом, расстройка частотного спектра наблюдается не только при $n = n_0$, как это принято считать в настоящее время, но и при $n = 2n_0$. В случае, когда $n = n_0$ обе расщепленные частоты меньше, а не больше, частоты колебаний геометрически совершенной оболочки. В случае, когда $n = 2n_0$ одна из расщепленных частот Ω_{n2} больше частоты колебаний соответствующей идеальной оболочки, другая Ω_{n1} – меньше. Расстройка спектра может быть довольно существенной. Эффект расщепления спектра, как при $n = n_0$, так и при $n = 2n_0$ зависит от геометрических и волновых параметров оболочки. Частоты преимущественно радиальных колебаний при определенных значениях параметров волнообразования и амплитуд несовершенств формы могут быть соизмеримы с частотами преимущественно изгибных колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кубенко В.Д. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек / В.Д. Кубенко, П.С. Ковальчук, Т.С. Краснополянская. – Киев: Наук. думка, 1984. – 220 с.
2. Аврамов К.В. Нелинейная динамика упругих систем. Т. 1. Модели, методы, явления / К.В. Аврамов, Ю.В. Михлин. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2010. – 704 с.
3. Лейзерович Г.С. Свободные колебания круговых цилиндрических оболочек с присоединенной малой сосредоточенной массой / Г.С. Лейзерович, С.В. Серёгин // Прикладная механика и техническая физика. – 2016. – Т. 57. № 5 – С. 90-96.
4. Серёгин С.В. Свободные колебания бесконечно длинной круговой цилиндрической оболочки с начальными неправильностями и малой присоединенной массой / С.В. Серёгин, Г.С. Лейзерович // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2014. – Т. 1. № 4 (20). – С. 36-43.
5. Серёгин С.В. Качественные эффекты при колебаниях кольцевых подкрепляющих элементов с присоединенной массой, как частный случай тонкой бесконечно длинной круговой цилиндрической оболочки / С.В. Серёгин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 1 (682). – С. 31-43.
6. Серёгин С.В. Численное и аналитическое исследование свободных колебаний круговых цилиндрических оболочек, несущих присоединенную массу, линейно распределенную вдоль образующей / С.В. Серёгин // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7. № 4. – С. 378-384.
7. Серёгин С.В. Свободные изгибно-радиальные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, несущей присоединенную массу / С.В. Серёгин // Вестник МГСУ. – 2014. – № 11. – С. 74-81.
8. Серёгин С.В. Влияние присоединенной массы на динамические характеристики тонкой оболочки / С.В. Серёгин, Г.С. Лейзерович // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – № 4. – С. 83-89.
9. Серёгин С.В. Об эффекте расщепления изгибного частотного спектра тонких круговых цилиндрических оболочек, несущих присоединенную массу / С.В. Серёгин //

Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 6 (257). – С. 59-61.

10. Лейзерович Г.С. О влиянии малой присоединенной массы на колебания разнотолщинного кругового кольца / Г.С. Лейзерович, Н.Б. Приходько, С.В. Серёгин // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 4. – С. 38-41.

11. Лейзерович Г.С. О влиянии малой присоединенной массы на расщепление частотного спектра кругового кольца с начальными неправильностями / Г.С. Лейзерович, Н.Б. Приходько, С.В. Серёгин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2013. – № 6. – С. 49-51.

12. Пермяков Д.А. Расчетно-экспериментальное исследование собственных колебаний цилиндрической оболочки / Д.А. Пермяков, А.С. Пантеев, С.В. Махнович // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2018. – Т.6, №2. – С. 3-9.

13. Серёгин С.В. Свободные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, ослабленной отверстием / С.В. Серёгин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2015. – № 3. – С. 9-13.

14. С.В. Серёгин. Влияние несовершенств формы на колебания кольцевого резонатора волнового твердотельного гироскопа / С.В. Серёгин // Нелинейная динамика. 2017. – Т. 13. – № 3. – С. 423-431.

15. Серёгин С.В. Особенности расщепления частотного спектра волнового твердотельного гироскопа на примере изолированного несовершенного кольца / С.В. Серёгин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2017. – Т.10. №3. – С. 116-122.

16. Серёгин С.В. Динамика тонких цилиндрических оболочек с присоединенной массой / С.В. Серёгин: моногр. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – 175 с.

17. Серёгин С.В. Влияние асимметричных начальных несовершенств формы на свободные колебания тонких оболочек / С.В. Серёгин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – Т. 15. – № 3. – С. 209-222.

18. Серёгин С.В. О возможных зонах расщепления изгибного частотного спектра оболочек с асимметричными несовершенствами формы / С.В. Серёгин // Известия высших учебных заведений. авиационная техника. – 2018. – № 2. – С. 149-152.

How Asymmetric Initial Imperfections in Shape Affect the Free Oscillations of Thin Shells

Seregin S.V.

Federal State-Financed Educational Institution of Higher Learning
Komsomolsk-na-Amure State University
Komsomolsk-na-Amure, Russia
Seregin-komsHome@yandex.ru

Abstract This paper dwells upon the bending oscillations in thin shells. It is the first to demonstrate there may emerge an additional bending frequency spectrum splitting zone due to the initial shell-shape imperfections. It has been discovered that the bending frequency spectrum splitting occurs not only when the number of circumferential dynamic strain waves equals that of the shell-shape imperfection waves, as is believed nowadays, but also when the

number of shaping waves is half that of the shell-shape imperfection waves.

Keywords: oscillations, shells, imperfections.

Динамика процесса надмолекулярной самоорганизации в граничном смазочном слое

Фоминов Е.В., Шучев К.Г.
Донской Государственный Технический Университет
Ростов-на-Дону, Россия
fominoff83@mail.ru, cshuchev53@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена использованию методов теории массового обслуживания для описания протекания во времени взаимосвязанных процессов роста-разрушения экранирующего граничного смазочного слоя. В качестве первого приближения предлагается использование системы дифференциальных уравнений динамики состояний одноканальной системы массового обслуживания с пуассоновским потоком запросов и экспоненциальным обслуживанием. На основании описываемой методики исследована связь параметров формирования граничного слоя и коэффициента трения при различных скоростях. Произведена оценка структуры граничного слоя для парафинового масла при различных уровнях термомеханического воздействия на смазку в зоне трибоконтакта. Установлено, что эффективность смазочного действия материала при определенном уровне термомеханического воздействия в трибосоприжении зависит от структуры граничного смазочного слоя.

Ключевые слова: граничное трение, граничный смазочный слой, надмолекулярная самоорганизация, безызносность.

ВВЕДЕНИЕ

В современном представлении *граничный смазочный слой* (ГСС) – это структура, состоящая из ориентированных определенным образом слоёв адсорбированных молекул смазочного материала [1], представляющая собой квазикристаллическое [1,2], квазитвёрдое тело [3], обладающее истинной упругостью и аномальной, отличной от объёмной, вязкостью [4–6]. Молекулы граничного смазочного слоя имеют склонность к самоорганизации при определённых условиях, в результате чего может существенно изменяться толщина граничного слоя, что является следствием подстройки трибосистемы под изменение внешних нагрузочно-скоростных факторов. Самоорганизация структур граничного слоя носит, в том числе, и временной характер [7,8]. В процессе фрикционного взаимодействия в зоне трения можно выделить микрообъемы смазочной среды, которые входят в зону контакта, претерпевают там по пути вдоль поверхности трения различные структурные изменения и покидают зону трения, возвращаясь в объём смазочной среды. Таким образом, ГСС является сложной динамической поверхностной структурой, существующей исключительно в условиях трения и формирующейся за счёт протекания конкурирующих процессов роста-разрушения [9–11].

ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА ВРЕМЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ

Сравнение результатов многочисленных трибологических исследований на трибометре, реализующем схему трения «палец-диск» и позволяющем отслеживать процесс

формирования ГСС *in situ* по показаниям датчика перемещения индентора y и изменению силы трения F за время τ , позволяет отметить, что процесс граничного трения, при котором происходит отдаление друг от друга поверхностей трущихся тел, укладывается в рамки одной обобщенной схемы (рис. 1), состоящей из следующих характерных стадий:

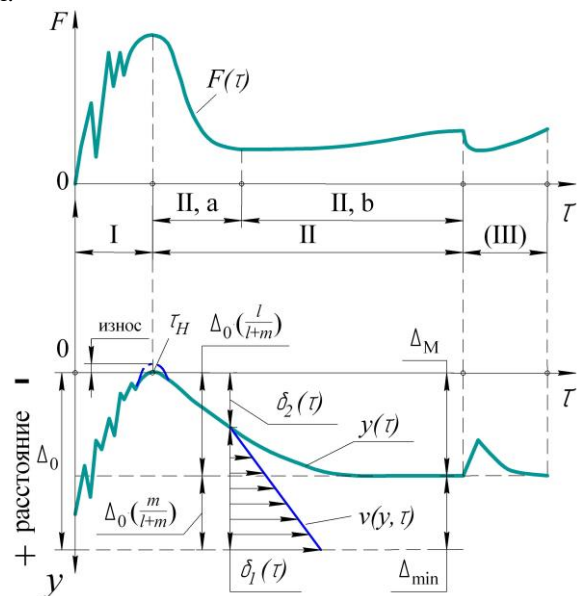


Рис. 1. Обобщенная схема временной реализации процесса трения в условиях граничной смазки

I. *Стадия неустойчивого трения* характеризуется размазыванием смазки, сближением поверхностей трущихся тел и ростом силы трения до максимального значения, наблюдался износ и на поверхности контртела появлялся кольцевой след дорожки трения. В крайних зонах окрестности дорожки трения оставались кольцевые валики избыточной смазки, которые впоследствии служат источником подпитки при образовании граничного смазочного слоя.

II. *Стадия формирования граничного смазочного слоя.* На этой стадии показания датчика сближения индентора и контртела устойчиво смещаются в область отрицательных значений, т.е. происходит удаление индентора от контртела и формирование граничного экранирующего смазочного слоя, исключая непосредственный контакт поверхностей; реализуется процесс практически безызносного трения. По нашим предположениям, граничный смазочный слой состоит из двух частей (рис. 2):

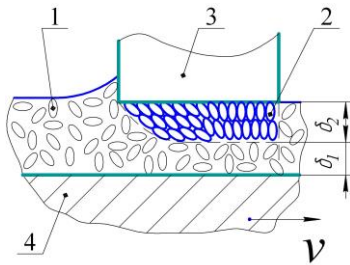


Рис. 2. Состав граничного смазочного слоя: 1 – зона свободного течения; 2 – заторможенный слой; 3, 4 – трущиеся тела

1) **Зона свободного течения** толщиной $\delta_1(\tau)$, в которой происходит вязкая диссипация энергии трения, и свойства которой определяют величину силы трения; ее толщина со временем стремится к некоторому минимальному значению $\delta_1 \rightarrow \Delta_{\min}$;

2) **Заторможенный слой** толщиной $\delta_2(\tau)$ – квазикристаллическая структура, состоящая из определенным образом ориентированных и сцепленных в результате процесса самоорганизации молекул смазки; величина этого слоя постепенно растет во времени, асимптотически стремясь к стабильному значению ($\delta_2 \rightarrow \Delta_M$). *Заторможенный слой*, обеспечивающий режим практической безызносности трибосопряжения, может стабильно существовать только в процессе трения, так как его существование требует постоянной подпитки энергией и веществом. При прекращении процесса трения эта структура постепенно разрушается в результате хаотического теплового движения молекул. В начале стадии II наблюдается падение силы трения (рис. 1, II, а), затем, после некоторого выстоя, сила трения обнаруживает тенденцию к росту (рис. 1, II, б), что связано, вероятно, с ростом градиента скорости в зоне свободного течения, что, согласно закону трения Ньютона, увеличивает силу вязкого сопротивления. После того, как ГСС достигает своей предельной толщины Δ_0 , а составляющие его слои – стабильных значений ($\delta_1 \approx \Delta_{\min}$; $\delta_2 \approx \Delta_M$; $\Delta_0 = \Delta_M + \Delta_{\min}$), сила трения F также стабилизируется. Наблюдаемое в данном случае формирование граничного слоя аналогично возникновению «толстых» [12,13] полимолекулярных пленок, увеличивающих силу трения, но обеспечивающих защиту трущихся поверхностей.

III (необязательная). *Стадия временного срыва части заторможенного слоя*. В отдельных реализациях процесса граничного трения срыв части заторможенного слоя, с последующим его восстановлением до прежнего стабильного значения, т.е. процесс формирования *заторможенного слоя* может носить квазипериодический характер. Срыв заторможенного слоя сопровождается уменьшением значений силы трения, что может быть объяснено уменьшением сил вязкого сопротивления из-за снижения градиента скорости в зоне свободного течения с увеличением ее толщины в момент срыва, а также кавитационными явлениями в смазке [1,9].

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРАНИЧНОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ

Для описания протекания во времени процесса формирования граничного смазочного слоя предлагается математическая модель, графическое представление которой приведено на рис. 3. Стадия I неустановившегося трения из рассмотрения исключается, и время отсчитывается по шкале $\tau = \tau - \tau_H$. Введем безразмерные переменные: $p_1(\tau)$ – относительная толщина зоны свободного течения, $p_2(\tau)$ – относительная толщина заторможенного слоя.

$$p_1(\tau) = \frac{\delta_1(\tau)}{\Delta_0}; \quad p_2(\tau) = \frac{\delta_2(\tau)}{\Delta_0} \quad (1)$$

Если максимальная величина зазора в трибосопряжении Δ_0 не ограничена сверху, то она может быть определена экспериментально, либо оценена на основе аналитических зависимостей для параллельного сдвигания пленки [14]. Динамику формирования граничного смазочного слоя предлагается описать системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dp_1(\tau)}{d\tau} = -l \cdot p_1(\tau) + m \cdot p_2(\tau) \quad (2)$$

$$\frac{dp_2(\tau)}{d\tau} = l \cdot p_1(\tau) - m \cdot p_2(\tau) \quad (3)$$

где l – интенсивность роста заторможенного слоя (предполагается независимой от времени) [c^{-1}]; m – интенсивность разрушения заторможенного слоя (также независимая от времени) [c^{-1}].

Начальные условия

$$p_1(0) = 1; \quad p_2(0) = 0 \quad (4)$$

Дополнительное условие

$$p_1(\tau) + p_2(\tau) = 1 \quad (5)$$

Уравнения (2,3) предполагают, что объемы нарастания толщины заторможенного слоя тем больше, чем больше смазки в зоне свободного течения (в толстом слое свободной смазки вероятность самоорганизации с образованием квазикристаллической структуры больше, чем в тонком), а увеличение толщины заторможенного слоя, в свою очередь, увеличивает объемы его разрушения (увеличивается вероятность дезорганизации образовавшейся структуры). Здесь может быть уместна аналогия с картонным домиком: чем больше карт ставим одна на другую, тем больше вероятность того, что все сооружение рухнет.

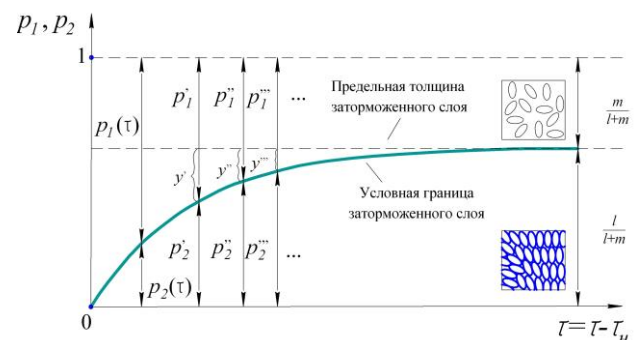


Рис. 3. Модель динамики граничного смазочного слоя

По своей форме уравнения (2–5) идентичны уравнениям динамики состояний одноканальной системы массового обслуживания с пуассоновским потоком запросов и экспоненциальным обслуживанием (уравнения Колмогорова – Чепмена) [15]. Эти уравнения называют также уравнениями «гибели и размножения», имея ввиду их использование для изучения динамики изменения численности биопопуляций. Эти уравнения используют также в теории

надежности для описания готовности параллельных систем с восстанавливаемыми элементами [16–18].

Суть предлагаемого подхода к изучению динамики процессов образования – разрушения смазочного слоя на основе методов теории массового обслуживания состоит вкратце в следующем. Поток «обращений» со стороны свободных молекул смазки за «разрешением» занять свое место в квазикристаллической структуре смазочного слоя с полным основанием можно считать равномерно распределенным во времени, но моменты «обращений» случайны и образуют пуассоновский (простейший) поток случайных событий (стационарный, ординарный, без последствий). Большинство молекул, получивших «разрешение», занимают свое место в структуре почти сразу, но есть и такие, для которых «нахождение своего места в структуре» требует более длительного времени. Все это позволяет считать, что закон распределения случайной величины – времени вхождения молекулы в структуру – имеет убывающую функцию плотности распределения во всей неотрицательной области определения, т.е. закон распределения является экспоненциальным. То же можно сказать и о распределении времени, которое необходимо молекуле, принадлежащей структуре, для того чтобы ее покинуть.

Применение методов теории массового обслуживания к процессу формирования граничного смазочного слоя предполагает введение понятий: *интенсивность роста* l и *интенсивность разрушения* m . Такого рода понятия, по нашему мнению, органически присущи системам атомно-молекулярного масштаба, состоящим из большого количества частиц с множеством существенных связей между ними, которые все невозможно описать и смоделировать. В этом смысле интенсивности роста-разрушения структуры являются такими же характеристиками коллективного поведения, какими являются температура и давление. Физический смысл интенсивности роста (размерность c^{-1}) – это плотность во времени «заявок» на присоединение к структуре. Аналогично, физический смысл интенсивности разрушения – это плотность «заявок» на покидание структуры. Для пуассоновских потоков интенсивности постоянны и не зависят от времени.

Все изложенные соображения приводят к системе уравнений (2,3,5) с начальными условиями (4), решение которой имеет вид

$$p_1(\tau) = \frac{m}{l+m} + \frac{l}{l+m} \cdot \exp[-(l+m) \cdot \tau] \quad (6)$$

$$p_2(\tau) = \frac{l}{l+m} \cdot \{1 - \exp[-(l+m) \cdot \tau]\} \quad (7)$$

Оценка численных значений *интенсивностей роста* l и *разрушения* m заторможенного слоя производится с использованием экспериментальных данных, в результате которых определяются значения удаленности границы заторможенного слоя $y(\tau)$ от его предельного положения (см. рис. 3)

$$y(\tau) = p_1(\tau) - \frac{m}{l+m} = \frac{l}{l+m} \cdot \exp[-(l+m) \cdot \tau] \quad (8)$$

Полученный массив значений $y(\tau)$ обрабатывается с помощью программы, целью которой является подбор коэффициентов A и B для уравнения регрессии экспоненциальной функцией следующего вида:

$$Y(\tau) = A \cdot \exp[-B \cdot \tau] \quad (9)$$

при условии минимальной среднеквадратической ошибки между исходным массивом данных $y(\tau)$ и функцией $Y(\tau)$.

Оценки интенсивностей роста и разрушения при этом определяются как

$$\hat{l} = A \cdot B; \hat{m} = B \cdot (1 - A) \quad (10)$$

ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.

На рисунке 4 представлена зависимость параметров l , l/m и коэффициента трения f от скорости v при трении цилиндрического индентора $\varnothing 5$ мм из быстрорежущей стали P9K5 (65 HRC) по контртелу из конструкционной стали 30XГСА (33 HRC) в среде парафинового масла при постоянной нагрузке ($P=2,1$ МПа). Испытания проводились на трибометре Т-11 (Польша). Величина шероховатости поверхностей трущихся тел находилась в пределах Ra 0,1–0,12 мкм. В проведенных опытах наблюдалось снижение коэффициента трения f при увеличении абсолютной величины *интенсивности роста* ГСС, а также прослеживается обратно пропорциональная зависимость *интенсивности роста* l и отношения l/m .

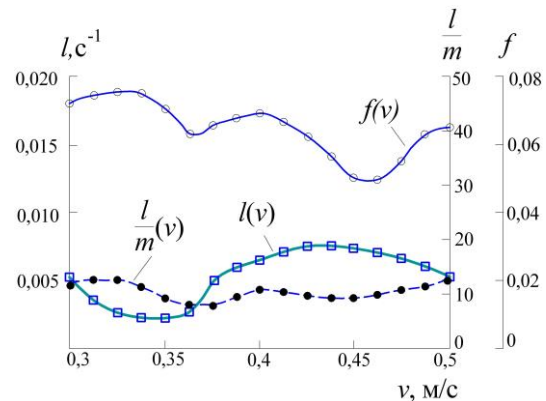


Рис. 4. Характеристики процесса граничного трения

Как известно, смазывающее действие смазочного материала – это мера, не имеющая численного значения, обусловленная химическим составом смазки и целым комплексом различных свойств, определяемая обычно по коэффициентам трения для трибосопряжения конкретной конфигурации [10,19]. Некоторую ясность в понимание механизма смазочного действия материала может внести оценка ГСС по предлагаемой нами методике. Размер и структуру граничного слоя можно сравнивать по предельной толщине ГСС Δ_0 , сформировавшегося за некоторое время (например, за 1500 сек.), а также по величине *зоны свободного течения* Δ_{\min} и предельной толщине *заторможенного слоя* Δ_m . Смазочное действие определённого смазочного материала при различных скоростях трения v связано с толщиной и структурой граничного слоя. Из рис.5 видно, что минимальный средний коэффициент трения f обеспечивает слой некоторой *оптимальной структуры*, сформировавшийся при $v=0,45$ м/с. Снижение коэффициента трения в случае формирования ГСС такой структуры, с точки зрения предлагаемого нами подхода, может быть объяснено следующим образом. Во-первых, слой обладает достаточными для эффективного разделения трущихся поверхностей значениями толщин Δ_0 и Δ_m , что уменьшает возможность контакта микронеровностей, обеспечивает экранирующий эффект (в сравнении, например, со слоем, сформированным при скорости $v=0,4$ м/с). Во-вторых, при

достигнутом на данной скорости уровне термомеханического воздействия, смазочный материал в зоне *свободного течения* Δ_{\min} имеет динамическую вязкость, которая, в сочетании с градиентом скорости в этой зоне, обеспечивает меньшее *сдвиговое сопротивление* σ . Так, при скорости трения $v=0,35$ м/с, зона свободного течения Δ_{\min} в 3,7 раза превышает аналогичный параметр для ГСС на скорости $v=0,45$ м/с. Экранирующий эффект, определяемый значениями Δ_0 и Δ_M , в этом случае также выше. Однако, за счёт большей вязкости парафинового масла при низком уровне термомеханического воздействия, сдвиговое сопротивление σ этого слоя выше, что и отражается на коэффициенте трения.

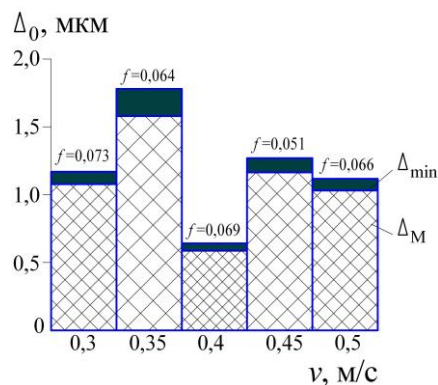


Рис.5. Структура граничных слоев при трении в парафиновом масле ($P=2,1$ МПа): Δ_{\min} – толщина зоны свободного течения; Δ_M – толщина заторможенного слоя

В связи с этим следует отметить, что предлагаемая в настоящей работе структура граничного слоя (рис.2) позволяет определять *фактическую динамическую вязкость* μ смазочного материала со свойствами ньютоновской жидкости в период пребывания трибосистемы в стабильном состоянии ($\delta_1 \approx \Delta_{\min}$; $\delta_2 \approx \Delta_M$) [19,20]:

$$\mu = \frac{F \cdot \Delta_{\min}}{v \cdot S} \quad (10)$$

где S – площадь трибоконтакта.

Определённые таким образом значения *фактической динамической вязкости* могут дать представление о величине температуры в зоне трибоконтакта на основе зависимостей параметра μ от температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный для моделирования явлений самоорганизации в граничном смазочном слое подход может быть полезным для понимания механизма смазочного действия при граничном трении и применяться для решения практических задач, связанных с обеспечением условий безызносности и подбором эффективных смазочных материалов и присадок к ним для трибосопряжения заданной конфигурации. Концепция структуры граничного слоя позволяет определить фактическую динамическую вязкость смазки со свойствами ньютоновской жидкости в зоне трибоконтакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боуден Ф.П. Трение и смазка твердых тел. / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор; пер. с англ.; под ред. И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.

2. Буяновский И.А. Наноструктурированные углеродные покрытия-ориантаны и их взаимодействие с граничными смазочными слоями / И.А. Буяновский, В.А. Левченко, З.В. Игнатъева и др. // Трение и износ. – 2009. – Т. 30, № 6. – С. 569-574.

3. Ахматов А.С. Граничный смазочный слой как квазитвердое тело // Сборник трудов II-ой Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1949. – Т. III. – С. 144-154.

4. Дерягин Б.В. Исследования профиля скоростей и вязкости граничных слоёв методом сдувания / Б.В. Дерягин, Е.Ф. Пичугин // Сборник трудов II-ой Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1947. – Т. I. – С. 103-110.

5. Bhushan B. Nanotribology: friction, wear and lubrication at the atomic scale / B. Bhushan, U. Landman, J. Israelachvili // Nature. – 1995. – № 374. – P. 607-616.

6. Georges J.-M. Some surface aspects of tribology // New directions in Tribology; Ed by I.M. Hutchings. – Bury, St. Edmunds and London: MEP, 1997. – P. 67-82.

7. Кравчик К. Попытка выявления самоорганизации динамических структур смазочной среды в зоне трения с использованием идеализированных моделей // Вестник Донского государственного технического университета. – 2001. – Т. 1, № 4(10). – С. 54-62.

8. Кравчик К. Трибологическая идентификация самоорганизации при трении со смазкой: дис. ... д-ра техн. наук. – Ростов н/Д., 2000. – 282 с.

9. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ. / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

10. Фролов К.В. Современная трибология: итоги и перспективы. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.

11. Гаркунов Д.Н. Триботехника: учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МСХА, 2002. – 632 с.

12. Furey M.J. The Formation of Polymeric Films Directly on Rubbing Surfaces to Reduce Wear //, Wear. – 1973. – vol. 26. – P. 369-392.

13. Furey M.J. The «in situ» Formation of Polimeric Films on Rubbing Surfaces // Proc. of International Conf. on Polymerys and Lubrication. – Paris: Published by Centre National de la Recherche Scientifique, 1975. – P. 393-404.

14. Мур Д. Основы и применение трибоники. – М.: Мир, 1978. – 487 с.

15. Ивченко Г.И. Теория массового обслуживания: учеб. пособие для вузов. / Г.И. Ивченко, В.А. Каштанов, И.Н. Коваленко. – М.: Высшая школа, 1982. – 256 с.

16. Острейковский В.А. Теория надежности: учеб. для вузов. – М.: Вышш. шк., 2008. – 463 с.

17. Smith D. Reliability, Maintainability and Risk: practical methods for engineers. – 8th Edition / D. Smith. – Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2011. – 436 p.

18. Ушаков И.А. Курс теории надёжности систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.

19. Blau P.J. Friction science and technology: from concepts to applications. – 2nd Edition / P.J. Blau. – Taylor&Fransis Group LLC, 2009. – 421 p.

20. Фалькович Г. Современная гидродинамика. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2014. – 208 с.

Dynamics of supramolecular self-organization process in boundary lubrication layer

Fominov E. V., Shuchev C. G.
Don State Technical University, «Metal-cutting
machines and tools» department,
Rostov-on-Don, Russia
fominoff83@mail.ru, cshuchev53@mail.ru

Abstract. The article is dedicated to studies of supramolecular self-organization processes evolving in time in boundary lubricant layers. The essence of the article consists in use of the model of the connected processes of formation and destruction of a shielding delayed lubricant layer based on differential equations similar to that which are used for description in time of dynamics of probability of states of a single channel system of queueing theory with Poisson stream of queries and exponential service (Kolmogorov-Chapman equations). Proposed method involves introducing concepts: the intensity of delayed layer growth - l and the intensity of delayed layer destruction - m . This kind of concept, in author's opinion, is organically inherent in atomic-scale molecular systems

consisting of large numbers of particles with many significant connections between them, all of which are impossible to describe and simulate. Proposed approach to modeling phenomena of self-organization in boundary lubricant layer can be useful for understanding the mechanism of lubricating action in conditions of boundary friction and applied for solving some practical problems related to the selection of effective lubricants for tribo couplings of the specified configuration and loading parameters.

Keywords: boundary friction, lubrication, supramolecular self-organization, wearresistance.

Улучшение эксплуатационных характеристик агрегатов путем наноструктурирования поверхностей трибосопряжений

Карелина М.Ю., Черепнина Т.Ю.

Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)
Москва, Россия
karelinamu06@gmail.com, 2783974@gmail.com

Бугакова Н.Ю.

Калининградский государственный технический
университет
Калининград, Россия
bugakova@klgtu.ru

Аннотация. В статье представлено решение задачи улучшения эксплуатационных характеристик агрегатов сельскохозяйственной техники за счет нанесения на поверхности трибосопряжений мономолекулярной защитной пленки поверхностно-активного вещества. В соответствии со стратегией развития сельского хозяйства, одним из приоритетных направлений которого является импортозамещение, проведен анализ существующих методик улучшения эксплуатационных характеристик агрегатов сельскохозяйственной техники модифицированием поверхностей сопряжений поверхностно-активными веществами. В статье приведено теоретическое обоснование и результаты эксперимента, подтверждающего обоснование повышения эксплуатационной износостойкости передач и ресурса за счет изменения величины граничного трения на поверхностях сопряжений. Используются свойства молекул поверхностно-активных веществ изменять поверхностную энергию на границе раздела фаз и влиять тем самым на физико-химические процессы: смачивание, износ, трение, коррозию [1-4]. Представлены способы формирования мономолекулярной защитной пленки, проведена оптимизация технологии модифицирования поверхностей пар трения поверхностно-активными веществами, основанная на модели поведения капли на поверхности и оценке угла смачивания. Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности модификатора, оценки его физико-химических и эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: поверхностно-активное вещество, мономолекулярная пленка, поверхностная энергия.

ВВЕДЕНИЕ

Улучшение эксплуатационных характеристик агрегатов сельскохозяйственной техники, в том числе за счет снижения потерь на трение в трибосопряжениях, – одно из приоритетных направлений научного поиска, проведения прикладных исследований и разработок. Высокая значимость решения проблемы определяется в настоящее время, прежде всего, необходимостью поиска импортозамещающих технологий и материалов, адекватно заменяющих зарубежные аналоги и улучшающих эксплуатационные характеристики агрегатов узлов и техники в целом. Ввиду объективного сокращения закупок новых машин, а также модификаторов различного назначения зарубежного производства, недостаточных объемов выпуска отечественной техники повышение эксплуатационных характеристик техники является актуальной задачей, требующей оперативного и качественного решения.

Снижение надежности единицы техники, в основном, определяется интенсивным изнашиванием деталей. Повышение износостойкости в передачах является одним из направлений повышения надежности их эксплуатации.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Поиск новых методов уменьшения износа пар трения в режиме граничного трения за счет снижения гидродинамического трения является в настоящее время актуальным, так как решение задач, связанных с уменьшением износа пар трения – одно из направлений повышения экономической эффективности эксплуатации сельскохозяйственной техники за счет снижения расхода топлива и увеличения ресурса техники [5].

Основными задачами Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы является обеспечение создания в Российской Федерации производства сельскохозяйственной техники, соответствующей международным стандартам, путем модернизации существующих производственных мощностей, создание отечественных конкурентоспособных образцов техники, отвечающих современным требованиям эксплуатации, безопасности труда [6, 7].

При исследовании тенденций и перспектив развития сельскохозяйственного машиностроения в Российской Федерации программе представлено четыре сценария, которые определяются долей импорта на внутреннем рынке и соотношением экспорта сельскохозяйственной техники к внутреннему рынку.

Наиболее приемлемой для России является третья модель – «Глобальный экспортер». Модель характеризуется защитой внутреннего рынка и масштабной государственной поддержкой экспорта отечественной продукции. Данная модель обеспечивает соблюдение интересов всех групп и является наиболее экономически привлекательной. Она в большей степени соответствует заявленным целям Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России до 2020 года – снижению зависимости от импорта продукции и развитию экспортного потенциала продукции отрасли [8, 9]. В настоящее время сложилась такая ситуация на рынке выпуска сельскохозяйственной техники (рис. 1), что на долю России приходится менее 6% мирового производства, в то время как Китай обеспечивает 14%.

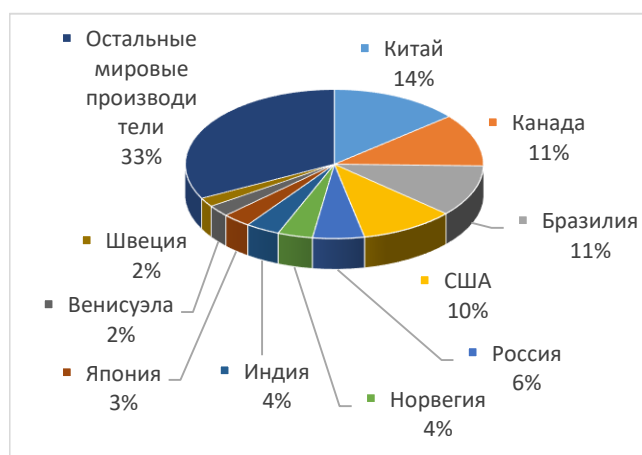


Рис. 1. Доли ведущих стран-производителей сельскохозяйственной техники

По данным Минсельхоза РФ в АПК по состоянию на 01.10.2018 г. числилось в наличии 3 003 469 самоходных машин и прицепов к ним. [10].

Обеспечение высокой работоспособности сельскохозяйственной техники требует создания и четкого функционирования материально-технической базы обслуживания и ремонта машин.

Имеющееся в производственных мастерских ремонтно-технологическое оборудование устарело, новые технологии выполнения ремонтных работ не применяются. Практически не осуществляется восстановление изношенных деталей. Всё это ведёт к увеличению затрат на ремонт техники, сроков исполнения ремонта, ухудшению его качества и, в конечном итоге, к снижению уровня технической готовности машинно-тракторного парка.

Действующие типовые технологии технического обслуживания и ремонта машин выполняются не полностью и не охватывают в достаточной мере всего комплекса процессов обеспечения их работоспособности. Ряд технологий ремонта и технического обслуживания, в связи с модернизацией и приобретением хозяйствами новой техники, требуют новых разработок [11-13].

Поддержание в работоспособном состоянии техники должно осуществляться за счет значительного повышения ресурса отремонтированной техники на основе освоения современных технологий ремонта и обслуживания с широким использованием нового технологического оборудования и горюче-смазочных материалов.

Наибольший износ деталей наблюдается при граничном трении, интенсивность износа в сопряжениях определяется влиянием смазочной среды, трением, свойствами материалов и характеристиками взаимодействующих поверхностей. При граничной смазке в основном происходит адгезионное, коррозионно-механическое и усталостное изнашивание [14, 15].

Очевидна необходимость разработки новой технологии модифицирования поверхностей, позволяющей влиять на условия смазки деталей пар трения в граничном и гидродинамическом режиме с целью повышения эксплуатационных показателей техники [16, 17].

Граница раздела фаз представляет собой неотъемлемую часть всех материальных объектов, поэтому она является основным участником как при осуществлении технологических процессов, так и при создании новых материалов и технологий, так как такие физико-химические процессы как трение, износ, адгезия, химическая и электрохимическая коррозия, влияющие на надежность и экономичность техники происходят на границах раздела фаз: твердое тело – твердое тело, твердое тело – жидкость, газ – твердое тело. Так как поверхностная энергия связана с межмолекулярным взаимодействием, в связи с тем, что состояние атомов и молекул на границе раздела фаз отличается от состояния в объеме фаз вследствие нескомпенсированности силовых полей на поверхности раздела, имеется возможность влиять на физикохимические процессы – изменяя поверхностную энергию. Зависимости физико-химических свойств ПАВ и их способность уменьшать поверхностную энергию от состава и структуры молекулы, плотности упаковки на поверхности раздела, вида связи полярной группы молекул с поверхностью, количества полярных групп в молекуле позволяют стремиться при научном поиске к значительному уменьшению поверхностной энергии [18].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для снижения величины и стабилизации условий трения, снижения интенсивности износа в трибосопряжениях необходимо:

- 1) обеспечить слой смазки между поверхностями трибосопряжений достаточной толщины, обеспечивающей отсутствие соприкосновения вершин поверхностей;
- 2) определить поверхностно-активную добавку, изменяющую поверхностную энергию;
- 3) предложить технологию модифицирования поверхностей трибосопряжений фтор-ПАВ;
- 4) обеспечить качественное нанесение мономолекулярной защитной пленки;
- 5) обеспечить контроль качества наномодификации.

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ПАВ В КОМПОЗИЦИИ

Перфторполиоксапропиленкарбоновая кислота является основным материалом для противозадирных и противоизносных присадок в маслах и пластичных смазках, а также в составах для обработки металлообрабатывающего инструмента и узлов трения с целью повышения их ресурса работы [19, 20].

Недостатком этих соединений является то, что они не растворяются и слабо эмульгируют в смазочных маслах, а получение их эмульсии в масле возможно только при использовании дефицитных и дорогостоящих фторсодержащих эмульгаторов. Кроме того, способ получения указанных соединений очень сложен и длителен.

В качестве ПАВ предлагается использовать фторорганическое соединение, которое допускало бы его применение в узлах трения машин и механизмов (дизельные, карбюраторные двигатели, редукторы, трансмиссии и т.п.). Для этого оно должно обладать следующими характеристиками: легкая эмульгация в смазочных маслах; высокая термостойкость; высокие адгезионные, противоизносные, противозадирные и антикоррозионные свойства [21-23].

Это соединение имеет фторуглеродный и углеводородный радикал, амидную функциональную группу вместо

карбоксильной и представляет собой бесцветную или слабобелую жидкость с вязкостью $6-35 \cdot 10^{-6}$ м²/с, плотностью 1620–1810 кг/м³. Структура соединений доказана данными инфракрасной спектроскопии, спектроскопии ядерного магнитного резонанса и элементного анализа.

Адсорбции данного соединения на твердых поверхностях приводит к снижению их поверхностной энергии с 1800–6000 мН/м до 4–6 мН/м, коэффициент трения и момент трения покоя снижается соответственно в 10–20 и в 100–104 раз, тангенциальное усилие сдвига масла на твердой поверхности уменьшается в 70–75 раз, при этом соединение термостабильно до температуры 450 °С, не горюче, взрыво- и пожаробезопасно и не токсично (4 класс опасности).

Важнейшим фактором является доступность рассматриваемого соединения, а также возможность синтезировать его производные с различной растворимостью и эмульгирующей способностью в смазочных маслах. Кроме того, для получения предлагаемого соединения не требуется использование дефицитного сырья [24].

Задача заранее определять и получать в ходе синтеза требуемый размер органической молекулы и, как следствие, эффективность защитной молекулярной пленки, решается путем введения различного количества (от 0,5 до 3 моль) N_2O_3 в реакционную смесь.

Таким образом, получаем целевой продукт с различной молекулярной массой. Длина молекулы влияет на структуру защитного молекулярного слоя на поверхности твердого тела, при насыщении получается квазикристаллическая структура. Растворимость Фтор-ПАВ зависит от длины фторуглеродного радикала.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАР ТРЕНИЯ ПЕРФТОРИРОВАННЫМИ ПАВ

Следующая задача исследования заключалась в оценке оптимальной технологии модифицирования поверхностей пар трения перфторированными ПАВ. Базовой исследуемой характеристикой оптимизации был принят объем смазки удерживаемой на поверхности - Y , которая естественным образом наиболее существенно зависит от концентрации раствора C и шероховатость поверхности R .

В проведении плана испытаний использовалась модель регрессии второго порядка:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (1)$$

с использованием ортогонального трехуровневого Вох-Бехнкен плана для трехкратного повторения (табл. 1). Построенная поверхность отклика (рис. 2) и график прогнозных значений относительно наблюдаемых (рис. 3) показывает, что квадратичная аппроксимация является вполне адекватной моделью для данной зависимости.

Таблица 1

| № опыта | Уровни факторов | | Результаты испытаний Y для параллельных экспериментов, мг | | |
|---------|--------------------------------|---------------------------|---|----------|----------|
| | Концентрация фтор-ПАВ, C , % | Шероховатость R_a , мкм | $Blok_1$ | $Blok_2$ | $Blok_3$ |
| | | | | | |
| 1 | 0,1(-) | 0,1(-) | 0,49 | 0,47 | 0,48 |
| 2 | 0,5(+) | 0,1(-) | 0,33 | 0,30 | 0,30 |
| 3 | 0,1(-) | 0,3(+) | 1,84 | 1,91 | 1,86 |
| 4 | 0,5(+) | 0,3(+) | 1,13 | 1,15 | 1,11 |
| 5 | 0,3(0) | 0,2(0) | 2,35 | 2,38 | 2,38 |

| | | | | | |
|---|--------|--------|------|------|------|
| 6 | 0,5(+) | 0,2(0) | 1,66 | 1,68 | 1,67 |
| 7 | 0,1(-) | 0,2(0) | 1,90 | 1,92 | 1,91 |
| 8 | 0,3(0) | 0,3(+) | 2,23 | 2,27 | 2,22 |
| 9 | 0,3(0) | 0,1(-) | 0,67 | 0,65 | 0,69 |

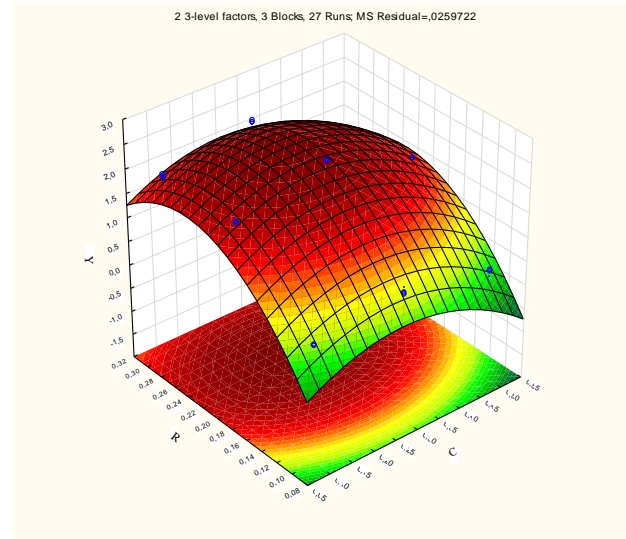


Рис. 2. Поверхность отклика объема смазки от концентрации и шероховатости

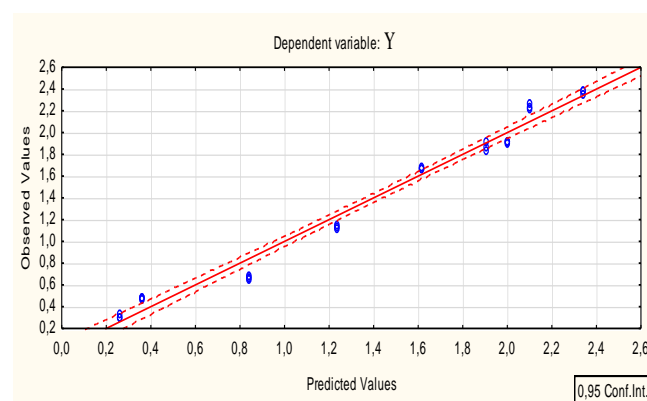


Рис. 3. График прогнозных значений относительно наблюдаемых

В рамках проведенного анализа факторного плана получены значения всех параметров регрессии (табл. 2).

Таблица 2

Таблица оценок параметров регрессии

| Factor | Effect Estimates; Var.: Y ; R-sqr=,96425; Adj.: 95352 (CR_5.sta) 2 3-level factors, 3 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0259722 DV: Y | | | | | |
|--------------|---|----------|--------|-------|---------------|---------------|
| | Effect | Std.Err. | t(20) | p | -95% Cnf.Limt | +95% Cnf.Limt |
| Mean/Interc. | 1,406 | 0,031 | 45,318 | 0,000 | 1,341 | 1,470 |
| Blok(1) | 0,018 | 0,088 | 0,203 | 0,841 | -0,165 | 0,201 |
| Blok(2) | -0,007 | 0,088 | -0,076 | 0,940 | -0,190 | 0,176 |
| (1) C (L) | -0,383 | 0,076 | -5,046 | 0,000 | -0,542 | -0,225 |
| C (Q) | 0,532 | 0,066 | 8,081 | 0,000 | 0,394 | 0,669 |
| (2) R (L) | 1,260 | 0,076 | 16,585 | 0,000 | 1,102 | 1,418 |
| R (Q) | 0,867 | 0,066 | 13,173 | 0,000 | 0,729 | 1,004 |

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

Описательные статистики значений угла смачивания для различных значений концентрации

| C: Weighted Means (Угол_2.sta) | | | | | | |
|--|----|-----------|---------------|--------------|--------------|----|
| Current effect: F(7, 472)=1470,9, p=0,0000 | | | | | | |
| Effective hypothesis decomposition | | | | | | |
| Cell No. | C | U Mean | U Std.Err. | U -95,00% | U +95,00% | N |
| 1 | D0 | 12,72 | 0,90 | 10,91 | 14,52 | 60 |
| 2 | D1 | 34,65 | 0,12 | 34,40 | 34,90 | 60 |
| 3 | D2 | 43,86 | 0,15 | 43,56 | 44,17 | 60 |
| 4 | D3 | 46,57 | 0,14 | 46,29 | 46,85 | 60 |
| 5 | D4 | 48,70 | 0,15 | 48,40 | 49,01 | 60 |
| 6 | D5 | 53,16 | 0,15 | 52,87 | 53,45 | 60 |
| 7 | D6 | 52,02 | 0,28 | 51,46 | 52,58 | 60 |
| 8 | D7 | 54,80 | 0,25 | 54,30 | 55,29 | 60 |

При рассмотрении влияния сразу двух факторов (процентного содержания раствора и количества промывок) использовалась модель двухфакторного анализа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИКАТОРА

Лабораторные триботехнические показали, что использование добавки фтор-ПАВ дает существенное уменьшение момента сил трения и температуры, более чем в два раза снижение скорости изнашивания, а также достаточно слабую зависимость скорости изнашивания и нормальной нагрузки. Доказана эффективность добавок фтор-ПАВ в смазочные композиции на основе трансмиссионных масел ТМ5-18 [25].

Результаты стендовых испытаний на редукторном стенде Ш-3 показали, что рабочие поверхности зубьев шестерен после испытаний при использовании модификатора остались в удовлетворительном состоянии. При этом потеря массы шестерен стала почти в два раза меньше, значительно ниже установленных норм. Кроме того, в ходе испытаний незначительно изменились и физико-химические свойства самого масла.

Стендовые испытания моделей ШВМ позволили определить ресурс механизма, который составил 4530 циклов, а также зафиксировать постоянное значение температуры в зоне трения не превышающее 40°C. Кроме того, применение технологии модифицирования поверхностей пар трения позволило снизить более чем в 4 раза скорость приработки в начальный период и в 1,5 раза сократить износ после приработки.

Результаты испытаний на роликовом стенде показали, что добавка фтор-ПАВ позволяет снизить механические потери в передачах и силовых установках, обеспечивая почти на 13% повышение тягового усилия.

Следует отметить также, что исследования в области сохраняемости техники в эксплуатационный период и в период консервации в части защиты от коррозии, дают положительные результаты [26, 27]. Разработаны и оптимизированы ингибиторные составы для обеспечения сохраняемости сельхозтехники [28]. Проведены работы и получены достоверные и адекватные результаты в области исследования систем «покрытие-основа» и формирования равнотолщинных газотермических покрытий [29, 30].

- в результате адсорбции молекулы Фтор-ПАВ на поверхности формируется МЗП в 3-6 нм, не влияющая на дислокационную поверхностную структуру, твердость и микротвердость металлов;

- формируя различную структуру МЗП на поверхности трибосопряжений возможно увеличение маслоемкости поверхности на границе МЗП-металл;

- мономолекулярная защитная пленка берет на себя роль «компенсатора» в трибосопряжениях с разными условиями смазки и защищает поверхности пар трения как при гидродинамическом, так и при граничном трении;

- на маслоудержание масла на поверхности влияет концентрация фтор-ПАВ в рабочем растворе и шероховатость. Максимальный эффект достигается при концентрации 0,346% и шероховатости 0,238 мкм.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ЗАЩИТНОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ПЛЕНКИ

Методика определения качества защитной молекулярной пленки предназначена для оценки наличия защитной молекулярной пленки, а также достаточности толщины и равномерности пленки, нанесенной из раствора Фтор-ПАВ на поверхность твердого тела.

Показателем наличия качественной защитной молекулярной пленки на поверхности твердого тела является величина краевого угла смачивания θ капли масла МН-60, нанесенной на чистую модифицированную поверхность тарированной маслodoзиривкой. Эта величина краевого угла должна быть не менее 45°.

Для количественной оценки эффекта использования раствора Фтор-ПАВ были приготовлены растворы различной концентрации, используя летучее вещество хладон 112 в качестве растворителя. Специально подготовленные металлические пластины опускались в раствор. После выдержки в растворе и последующей сушки металлических пластин, выполнялись замеры значения краевого угла смачивания.

По данным однофакторной модели (рис. 5, табл. 3) видна отчетливая тенденция увеличения угла до значений 0,5%. После этого значения в пределах статистической значимости зависимость практически не изменяется.

При рассмотрении влияния сразу двух факторов (процентного содержания раствора и количества промывок) использовалась модель двухфакторного анализа.

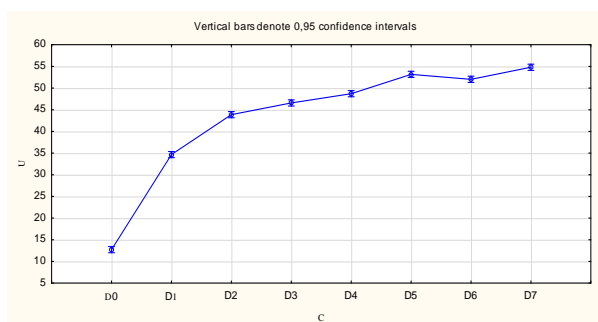


Рис.5. Однофакторная экспериментальная зависимость угла смачивания от концентрации раствора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

В статье отражены базовые моменты проведенного исследования и решена задача улучшения эксплуатационных характеристик агрегатов сельскохозяйственной техники за счет нанесения на поверхности трибосопряжений мономолекулярной пленки поверхностно-активного вещества.

Результаты проведенных экспериментов и полигонных испытаний, а также внедрение в Государственном космическом научно-производственном центре имени М.В. Хруничева и других подтверждает, что результаты исследования могут быть применены при решении основных задач, обозначенных в Программе «Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения России до 2020 года».

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайдар С.М. Повышение износостойкости узлов трения / С.М. Гайдар, М.Ю. Карелина, Е.А. Петровская, Э.А. Зиятдинов // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 122. – С. 40 – 47.

2. Волков А.А. Совершенствование трибологических свойств смазок на основе трансмиссионного масла / А.А. Волков, М.Ю. Карелина, Э.А. Зиятдинов // Инновационные направления развития технологий и технических средств механизации сельского хозяйства: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию кафедры сельскохозяйственных машин агроинженерного факультета Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I (Воронеж, 25 декабря 2015 г.). – Воронеж, 2015. – С. 115 – 119.

3. Карелина М.Ю. Улучшение трибологических характеристик смазочных композиций на основе трансмиссионного масла / М.Ю. Карелина, Е.А. Петровская, А.В. Пыдрин // Инновационные технологии и технические средства в АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (Воронеж, 26-27 ноября 2015 г.). – Воронеж, 2015. – С. 228 – 233.

4. Гайдар С.М. Адсорбция Фтор-ПАВ и ее влияние на смазку трибосопряжений в условиях граничного и гидродинамического трения / С.М. Гайдар, М.Ю. Карелина // От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к наноиндустрии: тезисы докладов Пятой международной конференции (Ижевск, 02-03 апреля 2015 г.). – Ижевск, 2015. – С. 44 – 45.

5. Гайдар С.М. Исследование эффективности триботехнических препаратов на основе наноматериалов / С.М. Гайдар, М.Ю. Карелина // Грузовик. – 2015. – №4. – С. 17 – 29.

6. Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы. Утверждена Постановлением Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. № 717. – URL: <http://government.ru/programs/208/events/> (дата обращения: 01.11.2018).

7. Виноградов В.В. Импортзамещающая технология восстановления и упрочнения рабочего оборудования строительных и дорожных машин / М.Ю. Карелина, А.В. Коломейченко, И.А. Петриков, К.С. Поджарская, Н.В. Титов // Строительные и дорожные машины. – 2015. – №8. – С. 34 – 37.

8. Голубев И. Г. Опыт импортозамещения запасных частей зарубежной сельскохозяйственной техники / И.Г. Голубев, П.И. Носихин, А.Ю. Фадеев – Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 30 с.

9. Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения России до 2020 года. Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 07.07.2017 г. №1455-р. – URL: static.government.ru/media/files/Ba4B6YDTiuOitleLkDQ05MCbz4WrfZjA.pdf (дата обращения 01.11.2018).

10. http://usmt.mcx.ru/opendata/7708075454-statistika_po_aktualnoy_tekhnike_po_vidam_vladeltsev (дата обращения 01.11.2018).

11. Агафонов Н.И. Экономико-инженерный прогноз создания оптимизированной системы технического сервиса в современном АПК / Н.И. Агафонов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2010. – №6. – С. 23–27.

12. Черепанов С.С. Комплексная система технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве / С.С. Черепанов – Москва: ГОСНИТИ, 1985. – 143 с.

13. Федеральный регистр технологий технического сервиса сельскохозяйственной техники и транспортных средств / сост. Л.П. Кормановский и др. – Москва: Информагротех, 1999. – 106 с.

14. Карелина М.Ю. Влияние фторорганических поверхностно-активных веществ на эксплуатационные характеристики ДВС / М.Ю. Карелина // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2015. – №1(31). – С. 12 – 17.

15. Карелина М.Ю. Механизм действия поверхностно-активных веществ на границах раздела фаз в условиях граничного и гидродинамического трения / М.Ю. Карелина // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2015. – №4(43). – С. 25 – 33.

16. Зубрилина Е.М. Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий высокоскоростными методами нанесения / Е.М. Зубрилина, М.Ю. Карелина, А.А. Коломейченко, И.Н. Кравченко // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. Т. 15, №3(82). – С. 19 – 27.

17. Гайдар С.М. Технология повышения износостойкости поверхностей трибосопряжений физико-химическим методом / С.М. Гайдар, М.Ю. Карелина // Грузовик. – 2015. – №3. – С. 12 – 16.

18. Волков А.А. Адсорбция фтор-ПАВ и ее влияние на смазку трибосопряжений в условиях граничного и гидродинамического трения / А.А. Волков, С.М. Гайдар, М.Ю. Карелина // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 118. – С. 113 – 124.

19. Рябинин Н.А., Рябинин А.Н. Амиды и эфиры перфторполиоксаалкиленсульфо- или перфторполиоксаалкиленкарбоновых кислот и способ их получения // Патент России №2045544. 1995. Бюл. №28.

20. Рябинин Н.А., Сергеева Г.З., Володьков В.Н., Рябинин А.Н. Способ получения полиперфторпропиленоксида // Патент России №2046127. 1995. Бюл. № 29.

21. Гайдар С.М. Исследование влияния наноструктурирования поверхностей трибосопряжений на эксплуатационные характеристики двигателей / С.М. Гайдар, М.Ю. Карелина, А.В. Пыдрин // Грузовик. – 2015. – №2. – С. 29 – 37.

22. Карелина М.Ю. Улучшение эксплуатационных характеристик двигателей внутреннего сгорания с применением наноматериалов / М.Ю. Карелина // Строительные и дорожные машины. – 2015. – №7. – С. 16 – 19.

23. Карелина М.Ю. Лиофобизация поверхностей топливной системы двигателей внутреннего сгорания / М.Ю. Карелина // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2015. – №2(41). – С. 20 – 24.

24. Карелина М.Ю. Повышение долговечности и экономичности силовых установок и передач модифицированием соединений поверхностно-активными веществами: дис. ... доктора техн. наук. – Москва, 2016. – 342 с.

25. Карелина М.Ю. Трибохарактеристики смазочных композиций на основе трансмиссионного масла ТМ5-18 / М.Ю. Карелина, Е.А. Петровская, А.В. Пыдрин // Сельский механизатор. – 2015. – №11. – С. 30 – 31.

26. Гайдар С.М. Инновационное техническое средство для нанесения защитной молекулярной пленки на поверхность машин / С.М. Гайдар, М.Ю. Карелина // Техника и оборудование для села. – 2015. – №3. – С. 26 – 28.

27. Быкова Е.В. Перспективы использования лакокрасочных материалов, модифицированных фторсодержащими поверхностно-активными веществами, для защиты сельхозтехники / Е.В. Быкова, С.М. Гайдар, М.Ю. Карелина // Техника и оборудование для села. – 2015. – №7. С. 34 – 37.

28. Карелина М.Ю. Оптимизация ингибированного состава для обеспечения сохранности сельскохозяйственной техники / М.Ю. Карелина, Е.А. Петровская, А.В. Пыдрин // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 121. – С. 89 – 93.

29. Карелина М.Ю. Расчетно-экспериментальный метод исследования теплового состояния системы «покрытие-основа» с перемещающейся границей / М.Ю. Карелина, А.А. Коломейченко, И.Н. Кравченко // Машиностроение. – 2015. – Т. 3, №4. – С. 3 – 8.

30. Гайдар С.М. Оптимизация процесса формирования равнотолщинных газотермических покрытий / С.М. Гайдар, М.Ю. Карелина, И.Н. Кравченко, Н.И. Салаяев // Техника и оборудование для села. – 2015. – №12. – С. 38 – 42.

Improvement of Operational Characteristics of Aggregates by Nanostructuring Surfaces of Tribounits

Karelina M. Yu., Cherepnina T. Yu.

Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI)
Moscow, Russia

karelinamu06@gmail.com, 2783974@gmail.com

Bugakova N. Yu.

Kaliningrad State Technical University
Kaliningrad, Russia

bugakova@klgtu.ru

Abstract. The article presents a solution to the problem of improving the operational characteristics of agricultural machinery aggregates by applying a monomolecular protective film on the surface of tribounits. In accordance with the strategy for the development of agriculture, one of the priority areas of which is import substitution, an analysis has been made of existing methods for improving the performance of agricultural machinery aggregates by modifying the interface surfaces with surface-active substances (surfactants). The article presents the theoretical justification and the results of the experiment, confirming the rationale for increasing the operational wear resistance of gears and life by changing the magnitude of the friction on the interface surfaces. The properties of molecules of surface-active substances are used to change the surface energy at the interface and thereby affect the

physicochemical processes: wetting, wear, friction, corrosion [1-4]. The methods of forming a monomolecular protective film are presented as well as the technology of modifying the surfaces of friction pairs by surfactants is optimized, based on a model of the behavior of a drop on the surface and an estimate of the wetting angle. The results of experimental studies of the effectiveness of the modifier, evaluation of its physicochemical and operational properties are presented.

Keywords: surface-active substance, monomolecular film, surface energy.

Метод моделирования циркуляции смазывающей жидкости в машиностроительных изделиях

Горобцов А.С., Громов Е.Г., Чигиринская Н.В.

Волгоградский государственный технический университет

Волгоград, Россия

jek_kot@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен метод расчета циркуляции смазывающей жидкости во внутренних объемах сборок агрегатов машин с использованием метода крупных частиц на ортогональной сетке. Объем смазывающей жидкости представляет собой набор частиц, которые могут двигаться без взаимодействия в поле силы тяжести. Частицы начинают движение из специальных областей, называемых областями разбрызгивания, перемещаются в пределах внутреннего объема сборки и стекают по граничным поверхностям геометрической модели сборки. Движение частиц по внутренней поверхности происходит с учетом их скорости, вязкого сопротивления скольжению при контакте с поверхностью и нормалей к граничной поверхности. CAD геометрия сборок используется для генерации сеточных моделей внутренних объемов с каналами и пустотами. Результат вычислений может быть представлен в виде траекторий движения частиц или отображения скопления частиц на границах. Могут быть построены графики перемещений и скоростей частиц смазывающей жидкости во внутреннем объеме сборки. Представлена программная система, разработанная на основе предлагаемого подхода. Произведено тестирование работы системы на модельных задачах. Произведен расчет циркуляции смазывающей жидкости в редукторе ведущего моста грузового автомобиля. Указаны направления для дальнейших работ.

Ключевые слова: расчет смазки, метод крупных частиц, смачивание поверхности, динамика систем тел, ортогональная сетка, генератор сеточных моделей, сеточные модели.

ВВЕДЕНИЕ

Численное моделирование циркуляции смазывающей жидкости в различных узлах и деталях машин является актуальной задачей, поскольку позволяет значительно снизить затраты на экспериментальную доводку таких узлов [1]. При использовании методов расчета, основывающихся на решении точных уравнений гидродинамики, требуются значительные вычислительные ресурсы. Их применимость ограничена изделиями с относительно небольшим количеством подвижных деталей [2, 3]. Так, в работе [4] были смоделированы гидродинамические процессы в картере ведущего моста автомобиля семейства «КАМАЗ» с использованием программного продукта FlowVision. Исследование распределения масла в рабочей области картера ведущего моста выполнено в рамках модели течения несжимаемой жидкости под действием вращающихся элементов конструкции в поле тяжести [4]. Решение данной задачи требует ресурсоемкого численного решения дифференциального уравнения Навье-Стокса [5, 6, 7]. Вследствие этого в работе [4] расчет велся только для пяти оборотов центрального колеса редуктора. Однако расчет пяти полных оборотов не дает всей картины течения смазывающей жидкости.

Усложнение расчетной схемы так же приводит к значительному росту необходимых вычислительных ресурсов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В настоящей работе для определения характеристик циркуляции смазки (жидкости) во внутреннем объеме как трехмерном пространстве сложной конфигурации предлагается использовать метод крупных частиц. Геометрия внутренних деталей с учетом нормалей к поверхности позволяет оценить течение смазки в машиностроительном изделии [8]. Она представляется кубическими ортогональными сетками, которые получаются из CAD геометрии рассматриваемого узла (агрегата) [9]. Это позволит получить некоторые физические характеристики в моделируемом объекте [10]. Это могут быть статистические характеристики циркуляции жидкости, например, интенсивность смачивания поверхностей и параметры потоков жидкости.

Основными правилами движения частиц, используемыми при разработке алгоритмов расчета циркуляции смазки, являются:

- 1) свободное движение внутри объема без взаимодействия;
- 2) движение по внутренней поверхности с учетом скорости, сопротивления скольжению и нормалей к поверхности;
- 3) учет силы веса при стекании;
- 4) учет областей разбрызгивания;
- 5) движение частиц осуществляется в ортогональной сетке, описывающей исследуемый объем с каналами и пустотами, по которым циркулирует смазывающая жидкость.

Расчет циркуляции смазывающей жидкости будет вестись итеративно, пока не будет достигнуто максимальное количество итераций, которое вычисляется на основании шага расчетов и максимального времени. В пределах одной итерации происходит пересчет объема жидкости в каждой ячейке, пересчет правых частей, а также сохранение результатов расчетов.

На первом этапе происходит вычисление начального уровня статической ванны. Количество элементов дискретной модели, участвующих в начальной заливке, представляет собой частное от объема заливки и объема элемента дискретной модели. Объем элемента дискретной модели вычисляется как куб шага сетки вследствие ортогональности используемой сетки.

На следующем этапе происходит итеративный процесс поиска элементов с минимальным значением потенциальной энергии и добавления этих элементов в список элементов статической ванны.

Заполнение каждой ячейки сеточной модели, которые образуют статическую ванну, происходит путем добавления в нее определенного количества частиц, равного максимальному количеству частиц на один элемент дискретной модели, определенному при задании параметров решателя. Одновременно каждой частице присваиваются скорость и перемещения вдоль осей координат X, Y и Z, необходимые для дальнейшего определения траектории движения частиц. Скорость определяется путем задания среднего значения проекций ее вектора вдоль всех осей координат. При задании скоростей частиц учитывается разброс, также задаваемый в исходных данных. При этом возможно задание разброса по закону нормального распределения либо по закону равномерного распределения.

Решение задачи нахождения траектории движения частиц является итеративным и длится до тех пор, пока не будет достигнуто предельное количество итераций. Основные и наиболее крупные этапы на каждой итерации – это расчет объема жидкости в каждой ячейке, пересчет правых частей и сохранение результатов расчетов на шаге.

Расчет объема жидкости в каждой ячейке необходим для того, чтобы избежать переполнения каждого элемента дискретной модели (алгоритм работы предусматривает определенное количество частиц на одну ячейку сеточной модели). В случае, если происходит переполнение какой-либо из ячеек дискретной модели, то частица перемещается в соседнюю ячейку. На данном этапе происходит также преобразование результатов расчетов на шаге в соответствии с заданными параметрами решателя (параметры вывода: отображать след от движения частицы, отображать накопление частиц в элементах дискретной модели исследуемого объема).

После вычисления объема жидкости в каждой ячейке происходит пересчет правых частей, который представляет собой назначение скоростей и перемещений частицам, а также вычисление нового уровня статической ванны.

Вычисление нового положения частиц происходит согласно формуле для равноускоренного движения тела. Расстояние, пройденное частицей, вычисляется по формуле [11, 12, 13].

$$S = S_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (1)$$

где s_0 – начальное положение частицы, v_0 – начальная скорость частицы, a – ускорение частицы, t – время.

При этом за ускорение принимается сила тяжести g , заданная в исходных данных. При задании силы тяжести используется ее модуль, а также косинусы углов наклона ее вектора на оси системы координат исследуемого тела. Так как используются аналитические выражения для вычисления положения частицы, то можно точно определить момент соприкосновения частицы с границей. Проверка на выход частицы за пределы геометрии является обязательной. Если частица не продолжает находиться внутри исследуемого объема, то находится элемент дискретной модели, находящийся на удалении вычисленного количества шагов дискретизации сеточной модели от текущего, и частице присваивается номер этого элемента. При выходе частицы за пределы исследуемого объема возможно два варианта. В первом случае, когда в исходных данных задано, что нормали не учитываются, скорость по той оси, вдоль которой

происходит выход частицы, принимается равной нулю. Если же указано, что нормали должны быть учтены, то принимается, что частица находится на границе геометрии и приклеивается к ней, начиная стекать по стенкам. Для дальнейшего расчета траектории частицы происходит вычисление касательной и нормальной составляющей скорости частицы, а проекции скорости частицы вдоль осей принимаются равными значениям касательной составляющей скорости в момент выхода за пределы исследуемой модели (рис. 1).

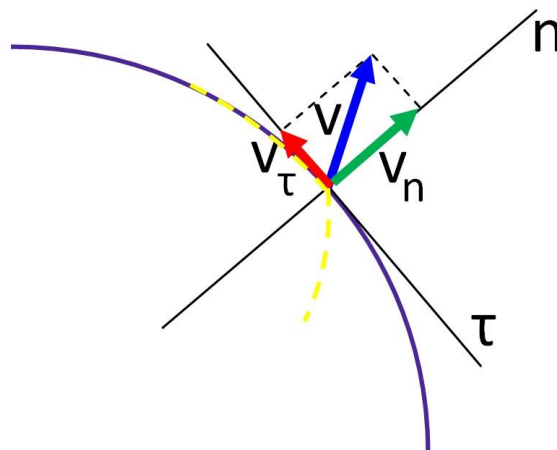


Рис. 1. Определение вектора скорости частицы при ударе о граничную поверхность

На рис. 1 буквой τ обозначена касательная к поверхности, буквой n – нормаль к поверхности. Скорость частицы при ударе о поверхность обозначена буквой v (вектор скорости выделен синим цветом), а искомая скорость – v_t (выделена красным). Зеленым цветом выделена проекция v_n вектора скорости v на нормаль.

Для нахождения значения v_t необходимо определить как значение самого вектора v , так и значение нормальной компоненты v_n этого вектора. Так как нормаль представляет собой единичный вектор, то значение v_n может быть вычислено как скалярное произведение вектора v и вектора n (формула 2) [14, 15, 16].

$$v_n = v_x n_x + v_y n_y + v_z n_z \quad (2)$$

Нормальная проекция вектора v в системе координат исследуемой модели v_{n_ucx} будет определяться выражением 3.

$$v_{n_ucx} = (v_{n_x}; v_{n_y}; v_{n_z}) = (v_n x; v_n y; v_n z) \quad (3)$$

Определение вектора касательной скорости после неупругого удара (рис. 1) выполняется по выражению:

$$v_t = (v_x - v_n x; v_y - v_n y; v_z - v_n z) \quad (4)$$

Движение частицы под действием силы вязкого сопротивления и силы тяжести описывается дифференциальным уравнением [17, 18]:

$$a_t + bv_t = q_t \quad (5)$$

где b – коэффициент вязкого сопротивления, a_t – проекция ускорения частицы на касательную τ , q_t – проекция силы тяжести на касательную τ .

Решение уравнения 5 можно записать в виде [19, 20, 21]:

$$s_{t_i+1} = -\frac{c_1}{b}e^{-bh} + c_2h + c_3 \quad (6)$$

где $c_1 = v_{t_i} - \frac{q_t}{b}$, $c_2 = \frac{q_t}{b}$, $c_3 = s_{t_i} + \frac{c_1}{b}$, s_{t_i} – начальное положение частицы, h – шаг по времени.

Моделирование циркуляции смазывающей жидкости состоит из трех этапов:

- 1) подготовка данных для расчетов (указание геометрической модели, генерация сеточной модели, указание входных данных);
- 2) аналитические расчеты траекторий движения частиц с использованием сеточной модели;
- 3) визуализация.

При подготовке данных для расчетов используются САД геометрии деталей исследуемой модели. На их основе происходит генерация сеточных моделей, используемых при расчетах.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

В качестве примера будет рассмотрен расчет течения смазывающей жидкости в модели шара с вырезом (рис. 2) и в модели редуктора грузового автомобиля (рис. 3).

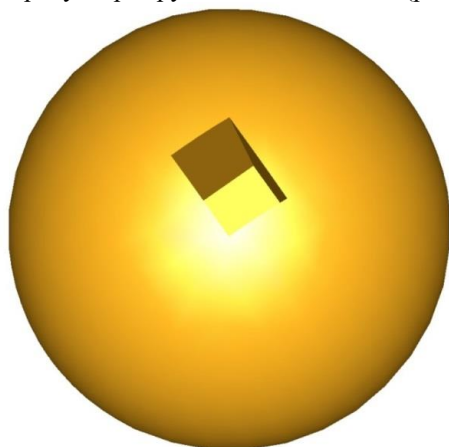


Рис.2. Геометрия для расчета течения смазывающей жидкости (шар с внутренним выступом)

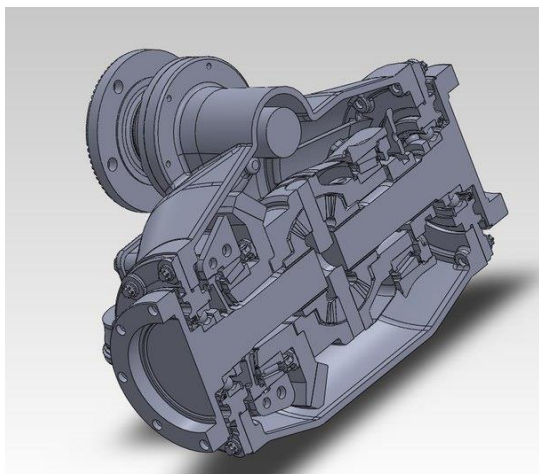


Рис.3. Геометрия для расчета течения смазывающей жидкости (редуктор)

На рис. 4 приведен результат расчетов траектории движения частиц, а на рис. 5 – отображение скопления частиц на границах (смачивание). При этом расчеты велись с учетом нормального распределения начальных скоростей.

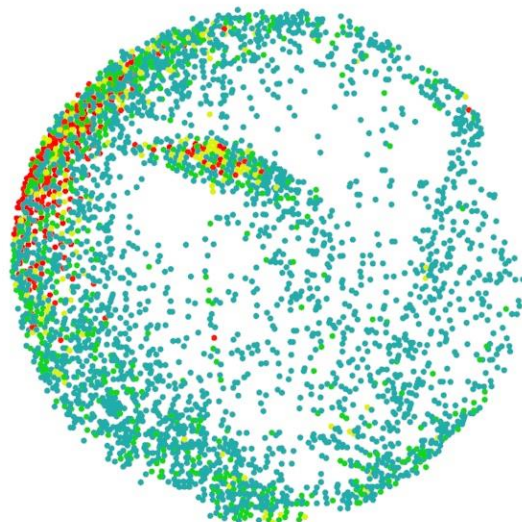


Рис.4. Траектории движения частиц на тестовой модели



Рис.5. Скопление частиц на границах на тестовой модели

Было произведено построение графиков перемещений и скоростей частицы с учетом коэффициента демпфирования. На рис. 6 изображен график перемещений частицы в плоскости OYZ, а на рис. 7 – график горизонтальных скоростей частицы.

На рис. 6 – 7 точка 1 представляет собой точку разбрызгивания. Частица вылетает в вертикальном направлении (участок 1 – 2), с последующим столкновением с поверхностью (точка 2). Так как нормаль в этой точке почти горизонтальна, скорость частицы по X после отражения становится равной скорости по Y в момент удара, и частица начинает свободно падать, сохраняя скорость по X (участок 2 – 3). В точке 3 происходит контакт с поверхностью и начинается свободное скатывание частицы (участок 3 –

4). В точке 4 происходит остановка частицы вследствие воздействия демпфирования. Ступенчатые участки кривых траекторий на рис. 6 – 7, объясняются дискретным взаимодействием с граничными ячейками в рамках используемой модели.

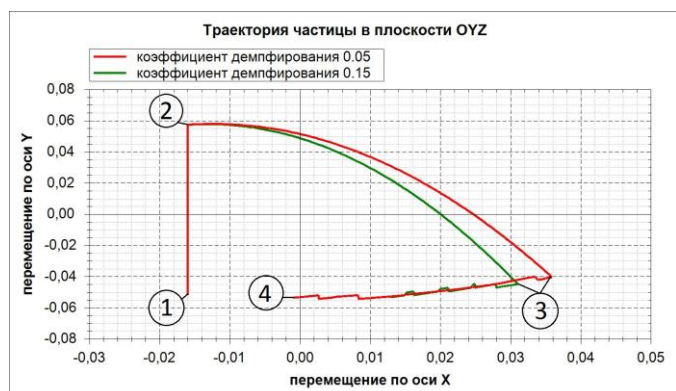


Рис.6. Перемещения частицы в плоскости OYZ в зависимости от коэффициента демпфирования

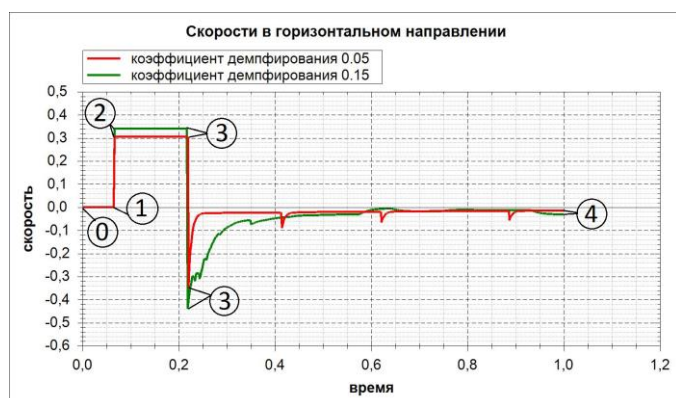


Рис.7. Горизонтальные скорости частицы в зависимости от коэффициента демпфирования

Программа для расчета течения смазывающей жидкости была использована при моделировании редуктора грузового автомобиля. На рис. 8 представлено сечение внутреннего объема корпуса редуктора, полученное на основе исходной геометрической модели.

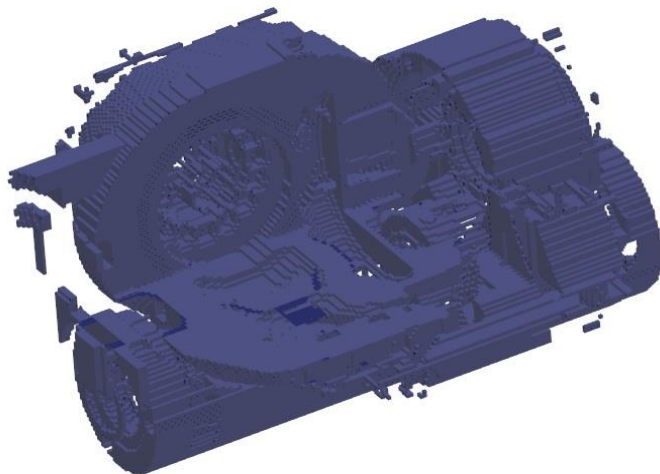


Рис.8. Внутренний объем корпуса редуктора

На рис. 9 показано распределение смазки в корпусе редуктора. Можно заметить, что смазывающая жидкость циркулирует не только внутри объема, образованного корпусом редуктора и деталями, находящимися внутри него, а также по специальным каналам внутри корпуса. На рис. 9 можно заметить области, в которые попадает малое количество смазывающей жидкости. Эти области совпадают с вышедшими из строя деталями редуктора.

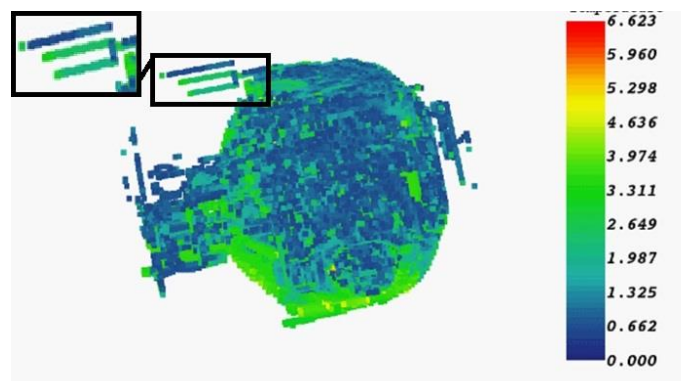


Рис.9. Расчет распространения масла в редукторе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Результатом данной работы является программный продукт, использующий метод крупных частиц для расчета циркуляции смазывающей жидкости. Данный продукт позволяет вести расчеты на сеточных моделях большой размерности для внутренних объемов геометрических моделей.

Использование разработанного программного продукта при расчетах с использованием геометрических моделей реальных агрегатов машин (редуктор грузового автомобиля) и совпадение областей недостаточной циркуляции смазывающей жидкости с вышедшими из строя узлами позволяет сделать вывод о корректности используемой математической модели.

Дальнейшими направлениями разработки являются:

- 1) уточнение моделей элементов разбрызгивания смазывающей жидкости – шестеренки, конические подшипники;
- 2) доработка алгоритма вычисления начального уровня смазывающей жидкости;
- 3) отработка интерфейса привязки элементов разбрызгивания к геометрии сетки;
- 4) доработка методов визуализации сетки и результатов расчета;
- 5) увеличение детальности сетки за счет использования повышенных вычислительных мощностей – внедрения технологии распределенных вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горобцов А.С. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкции автомобилей / А.С. Горобцов, С.К. Карцов, А.Е. Плетнев, Ю.А. Поляков. – М.: Машиностроение, 2011. – 463 с.
2. Солоденков С.В. Математическая модель гидромеха-

нической системы постоянной частоты вращения / С.В. Солоденков, А.С. Горобцов, К.И. Лютин // Автомобильная промышленность. - 2008. - № 8. - С. 21-24

3. Holdeman, J. T. (2010), "A Hermite finite element method for incompressible fluid flow", Int. J. Numer. Meth. Fluids, 64 (4): 376–408

4. Валеев Д. Х. Численное моделирование гидродинамических процессов в картере ведущего моста автомобиля семейства «КАМАЗ» / Д. Х. Валеев, М. Н. Жестков, Ф. Г. Ильясов, В. В. Русаков, М. Л. Сазонова, В. В. Шмелев // Инженерные системы – 2017: Труды Международного форума: Москва, 11–12 апреля 2017 г. / Инжиниринговая компания «ТЕСИС». - 2017. - С. 27-44.

5. Launder B.E.; D.B. Spalding (1974). "The Numerical Computation of Turbulent Flows". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3 (2): 269–289.

6. J.D. Anderson, Jr. (1995) Computational Fluid Dynamics. The basics with applications. McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 1 edition.

7. Huebner, K.H.; Thornton, E.A.; Byron, T.D. (1995). The Finite Element Method for Engineers (Third ed.). Wiley Interscience

8. Громов Е. Г. Мультифизические задачи в динамике систем твёрдых и упругих тел / Е. Г. Громов, А. А. Насонов, А. А. Новокщенов, В. О. Фирсова // XI всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Казань, 20-24 авг. 2015 г.): сб. докл. / сост.: Д.Ю. Ахметов [и др.]; АН Республики Татарстан, Казанский (Приволжский) федеральный ун-т [и др.]. - Казань, 2015. - С. 1080-1082.

9. Chibisov D. Generation of Orthogonal Grids on Curvilinear Trimmed Regions / Dmytro Chibisov, Victor Ganzha, Ernst W. Mayr, Evgenii V. Vorozhtsov, Constant Time 8th International Workshop, CASC 2005, Kalamata, Greece, September

12-16, 2005, Proceedings, pp. 105-114

10. Андреев А. Е. Система для расчета тепловых технологических процессов машиностроения / А. Е. Андреев, Е. Г. Громов, М. В. Резников, О. В. Шаповалов // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 7 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 12. – С. 124-126.

11. Сивухин Д. В. Общий курс физики. – М.: Физматлит, 2005. – Т. I. Механика. – 560 с.

12. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. – Издание 5-е, стереотипное. – М.: Физматлит, 2004. – 224 с.

13. David C. Cassidy; Gerald James Holton; F. James Ruthenford (2002). Understanding physics. Birkhäuser

14. Погорелов А. И. Дифференциальная геометрия (6-е издание). М.: Наука, 1974.

15. Lipschutz S.; M. Lipson (2009). Linear Algebra (Schaum's Outlines) (4th ed.). McGraw Hill.

16. Кострикин А.И. Линейная алгебра и геометрия / А.И. Кострикин, Ю.И. Манин. – М.: Наука, 1986. – 304 с.

17. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. – М.: Наука, 1970. – 492 с.

18. Landau L.D.; Lifshitz, E.M. (1987), Fluid Mechanics (2nd ed.), Pergamon Press

19. Zill, Dennis G. A (2000) First Course in Differential Equations (5th ed.). Brooks/Cole

20. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. – М.: Наука, 1966.

21. Полянин А. Д. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики / А.Д. Полянин, В.Ф. Зайцев, А.И. Журов. – М.: Физматлит, 2005.

Method for Modeling of Circulation of the Lubricating Fluid in Models of Machine-Building Products

Gorobtsov A.S., Gromov E.G., Chigirinskaya N.V.

Volgograd State Technical University

Volgograd, Russia

jek_kot@mail.ru

Abstract. A method for the computation of the lubricating fluid circulation is presented. It uses orthogonal meshes of inner volume of assemblies and particle-in-cell method to calculate the flows of lubricant. Volume of lubricating fluid consists of a set of particles which can move without interaction in the field of a force of gravity. Particles are sprayed from special areas, move in inner volume and drain on the border of a volume. Movement of a particle on the inner surface of a model is calculated using particle velocity, damping coefficient and normal to this surface. CAD geometry of assemblies is used to generate a mesh of inner volume. The result of calculations can be presented as movement trajectories of particles or as accumulation of particles on the border. Charts of

movement and velocity of particles can be generated. Program system, which uses this method, is developed. Testing on test samples is performed. Calculation of the circulation of lubricating fluid in the reducer of a cargo vehicle is carried out. Directions of further development are given.

Keywords: computation of the lubricating fluid, particle-in-cell method, surface wetting, multibody dynamics, orthogonal mesh, generator of grid models, grid models.

Дискретный контакт в зубчатом зацеплении

Титенок А.В.

Брянский государственный аграрный университет
Кокино, Россия
titenok@bk.ru

Титенок И.А.

ООО АББ
Москва, Россия
Elproekt-it@yandex.ru

Аннотация. На базе собственных изобретений и анализируя известные экспериментальные исследования, авторы обосновали параметры наполнителя смазочного материала в форме микроскопических сфер, выполняющего функции противозносной и антифрикционной присадки для улучшения качественных показателей работы зубчатого зацепления.

Ключевые слова: зубчатое зацепление, форма зубьев, форма естественного износа, “дискретный контакт”, сферические частицы.

ВВЕДЕНИЕ

Коэффициент полезного действия (КПД) – это количественный показатель технической эффективности устройства и значение его в зубчатом зацеплении – важнейший оценивающий фактор. На качество работы зубчатой передачи влияет устойчивость формы зубьев зацепления в процессе эксплуатации. У передачи с эвольвентным профилем зубьев наибольший износ претерпевает периферийная поверхность головки и ножки зубьев, а максимальные нормальные контактные напряжения действуют в полюсе зацепления. Эвольвентная форма зубьев приобретает форму естественного износа [1], вначале устойчивую, а затем имеющую негативные показатели, связанные с изменением точности в зацеплении.

Констатируем наличие технико-экономического противоречия. С теоретической позиции имеем высокий КПД зубчатого зацепления в форме высшей кинематической пары. В процессе эксплуатации этот показатель варьирует, что сопровождается многими негативными проявлениями. В статье рассматривается один из альтернативных путей разрешения упомянутого противоречия за счет изменения рабочей среды в зубчатом зацеплении [2,3] с введением понятия “дискретный контакт” – меняющий структуру и форму в процессе трения.

ОБОСНОВАТЕЛЬНАЯ БАЗА

Широкий диапазон и разнообразное сочетание нагрузок, скоростей качения и скольжения, рабочих температур, разнообразие применяемых материалов и методов обработки ведет к различному характеру повреждения и разрушения зубчатых передач.

Существующая классификация повреждений зубьев сводится к следующим признакам: разрушение под воздействием изгибных напряжений и ударных напряжений; выкрашивание рабочих поверхностей зубьев (питтинг); схватывание (заедание); механический износ; пластическая деформация рабочего поверхностного слоя зубьев; химический износ.

Из этих видов повреждения только первый мало связан с характером смазки. Все остальные повреждения представляют собой разные виды износа. Они связаны с характером

смазки, и их особенности должны учитываться при выборе смазочных материалов.

Основатель теории гидродинамической смазки Н.П. Петров в работе “Трение в машинах и влияние на него смазочного материала” дал описание характера и значения жидкостного трения между поверхностями деталей машин. Суть его в том, что зазор между скользящими поверхностями должен иметь клиновидную форму. Смазочный материал должен заполнять зазор и непрерывно поступать в требуемом количестве. Скорость относительного перемещения одной из поверхностей должна быть такой, чтобы в масляном слое создавалось внутреннее давление за счет заклинивания смазочного материала. Смазочный материал должен полностью разделять контактирующие тела.

Теория масляного клина, предложенная Н.П. Петровым, не утратила своей актуальности, а гидродинамическая смазка реализуется в приработанных зубчатых передачах. При взаимодействии двух контактирующих поверхностей, между которыми находятся твердые частицы износа, последние, в силу специфики свойств и при наличии определенной геометрии, могут вовлекаться во вращательное движение [4]. И у элементов жидкости также происходит подобное вращение. Связанно это с простым сдвигом (завихрением) и происходит из-за кинетической энергии частиц жидкости, рассматриваемых как малые объемы. Это явление в 1956-м году М. Рейнер [5] назвал “теарот-эффектом”. Вихри при простом сдвиге – это не “прилипание” жидкости, а её давление ее на поверхность вследствие кинетической энергии вращения вихрей. Завихрения жидкости способствует обтеканию неровностей поверхности твердого тела. В процессе эрозийного разрушения бугорки шероховатой поверхности приобретают оптимальную форму – округлую.

Нарушение структуры поверхностного слоя в процессе трения приводит к образованию частиц износа, которые деформируются специфическим образом. Приобретая сферическую или цилиндрическую форму, эти объемы масс совершают вращательное перемещение. Ротационный механизм движения является типичным для фрагментов разрушения.

При исследовании шариковых подшипников с помощью сканирующего электронного микроскопа в усталостных трещинах обнаружены мельчайшие сферические частицы; аналогичные частицы обнаружены были и на стекле феррографа. Известно явление спонтанного качения, возникающего при трении скольжения: при некоторых режимах образовывались микросферы, которые выкатывали канавки, подобные дорожкам подшипников. Коэффициент трения резко уменьшался. В таких случаях геометрическая форма элементов качения стремится к идеальной форме. Значение механизма спонтанного качения возрастает по

мере измельчения очагов контакта и увеличения относительной несущей способности поверхности за счет масштабного фактора прочности [6, 7].

Экспериментально установлено, что если размер частиц износа (любой формы) не превышает 5 мкм, то они, имея большую развитую поверхность, адсорбируют на себе продукты окисления масла, что может снизить интенсивность изнашивания деталей. Частицы, возможно, интенсифицируют теплопередачу между поверхностями трения. Мелкие частицы выполняют функции противоизносной и антифрикционной присадок, препятствуя непосредственному контакту трущихся поверхностей.

Все это относится к частицам менее 5 мкм. Большие частицы приносят вред. Образование сферических металлических частиц в системах качения и скольжения возможно в результате различных процессов. Образование сферических частиц износа при наличии на поверхностях контакта износостойких боридных покрытий обусловлено как агрегатированием мельчайших продуктов изнашивания, так и оплавлением вторичных структур, состоящих, в основном, из оксидов бора и других соединений, находящихся в аморфном состоянии.

Элементный состав сферических частиц износа показал, что они содержат 47% углерода, 34% кислорода, 8,7% железа, 8,2% бора, 1,6% серы. Так как температура плавления оксида бора составляет 450⁰ С, можно предположить преимущественное образование сферических частиц износа при более тяжелых режимах испытаний. Характерно, что такие сравнительно высокие температуры возникают в только объемах, составляющих не более нескольких микрометров.

Модель, в которой сферические частицы являются вторичными, соответствует экспериментальным данным. Полученные в результате эксперимента частицы не превышали 5 мкм, но размер частиц может значительно меняться – в зависимости от условий трения и свойств материала (от 2,5 до 16 мкм). Предполагают, что для образования частиц сферической формы отношение амплитуды колебаний к окружности сферической частицы должно быть равным 1 (по разным данным это отношение колеблется в пределах от 0,2 до 2,4). На практике сферические частицы очень редко встречаются в трибосистемах с однонаправленным движением.

Уровень качества зубчатого зацепления повышается за счет снабжения смазочного материала частицами сферической формы с размерами не более 5 мкм [2, 3], что позволяет реализовать контактный механизм смежных поверхностей сложной формы с использованием тел качения. В процессе работы зубчатой передачи микросферы будут перемещаться к полюсу зацепления. Это явление обеспечивает получение эффекта, обнаруженного В.В. Шульцем [1] для колес, имеющих зубья с профилем естественного износа.

Второй позитивный эффект новшества заключается в том, что микросферы смазочного материала заполняют впадины микронеровностей рабочих поверхностей зубьев. Тем самым перераспределяется удельная поверхностная нагрузка и снижается контактное напряжение.

Технологический аспект новшества состоит в следующем. Сферические микрочастицы можно изготовить спосо-

бом, применяемым в порошковой металлургии – распылением расплава в среде инертных газов [8]. Какого размера должны быть частицы? Интенсивность перемещения по поверхности тела и износа этой поверхности от воздействия частиц зависит от их формы [9, 10]. По данным зарубежных исследований [11, 12] после достижения критического размера частиц износ металла почти не зависит от их размера (исследовались частицы размером от 0 до 70 мкм). При изменении размера частиц износа от 75 до 250 мкм интенсивность изнашивания стальных образцов вначале постепенно уменьшается, а затем при изменении размеров частиц от 250 до 500 мкм остается неизменной. Максимум изнашивания наблюдается при размере частиц около 40 мкм или, в другом аналогичном исследовании, он наблюдается при размере частиц 600 мкм. Д.Н. Гаркунов [13] приводит данные о влиянии мелких абразивных частиц на износ в том случае, когда упомянутые частицы содержатся в смазочном материале. В разное время и не зависимо друг от друга такие данные были получены исследователями (Никифоров О.А., Виноградов Г.В., Венцель С.В. и Венцель Е.С., Барабаш М.Л., Корогодский М.В., Бортник Г.И., Шпеньков Г.П.).

Подобное явление возможно реализовать на макроуровне. Коллективом авторов [14...18] разработан и исследован ряд механизмов с высшими кинематическими параметрами для возвратно-поступательного перемещения рабочего органа машины и уменьшения воздействия вибрации на человека и окружающую его среду в том числе на примере работы жатки зерноуборочного комбайна.

Вибрацию классифицируют признаками: по способу воздействия на человека – общая и локальная; по источнику возникновения – *транспортная* (при движении машин), транспортно-технологическая (при совмещении движения с технологическим процессом, например при косье или обмолоте самоходным комбайном, рытье траншей экскаватором и т.п.) и *технологическая* (при работе стационарных машин, например насосных агрегатов); по частоте колебаний – низкочастотная (менее 22,6 Гц), среднечастотная (22,6...90 Гц) и высокочастотная (более 90 Гц); по характеру спектра – узко- и широкополосная; по времени действия – постоянная и непостоянная; последнюю, в свою очередь, делят на колеблющуюся во времени, прерывистую и импульсивную.

Нормы вибрации установлены для трех взаимно перпендикулярных направлений вдоль осей ортогональной системы координат. При измерении и оценке общей вибрации необходимо помнить, что ось *X* расположена в направлении от спины к груди человека, ось *Y* – от правого плеча к левому, ось *Z* – вертикально вдоль туловища. При измерении локальной вибрации следует учитывать, что ось *Z* направлена вдоль ручного инструмента, а ось *X* и *Y* – перпендикулярно к ней.

Стандартом установлены нормы отдельно для транспортной вибрации (категория 1), транспортно-технологической (категория 2) и технологической (категория 3); причем нормы для третьей категории подразделены на подкатегории: 3а – для вибрации, действующей на постоянных рабочих местах производственных помещений; 3б – на рабочих местах складов, бытовых, дежурных и подсобных

помещений, в которых отсутствуют генерирующие вибрацию машины; Зв – в помещениях для работников умственного труда.

В случаях превышения допустимого для человека уровня вибрации следует проводить мероприятия по снижению ее параметров. Вибрация действует на рабочего через объекты – машины, сооружения или транспортные средства, в которых установлены источники колебаний (электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания, станки и т.д.). Поэтому защитные мероприятия должны охватывать все элементы системы “генератор колебаний – объект – человек”.

Если объект подвержен вибрации от периодических сил, то стремятся прежде всего уменьшить их в самом источнике. Для этого повышают точность балансировки вращающихся деталей, точность обработки и чистоту поверхности сопрягающихся деталей, применяют взаимно уравновешивающие механизмы, уменьшают значения действующую на вибрирующую деталь силы и частоты вращения, стремятся равномерно распределить нагрузки на роторы машин, увеличивают продолжительность рабочего цикла.

Активным методом является искусственное возбуждение вибрации в противоположном направлении с основными колебаниями, возникающими в конструкции, с целью создания эффективного противодействия им.

Такое виброгашение имеет смысл при наличии одной фиксированной или подавляющей другие частоте колебаний и строгом соблюдении условия противофазности.

Наряду с этим вибрация оказывает влияние на долговечность машины, особенно, если напряжения близки к пределу усталости. Тогда вибрация, вследствие ее высокой частоты, ускоряет достижение предельного числа циклов, и в машине могут появиться напряжения усталости преждевременно.

Таким образом, задача по разработке механизма уравновешивания ножа жатки является актуальной. Предложены требования для разработки такого механизма:

А. Количества движения (mv) приведенной массы уравновешивающего механизма и ножа жатки должны быть равны. **Б.** Кинематические характеристики уравновешивающего механизма и ножа жатки должны быть зеркально симметричными. **В.** Сила сопротивления перемещению уравновешивающего механизма не должна существенно отличаться от силы трения качения.

Эти требования могут быть осуществлены, при положительных результатах доработки механизма на стойках с высшими кинематическими парами.

В связи с этим были сформулированы задачи:

1. Исследовать возможность устойчивости равновесного состояния материальной системы на стойках с высшими кинематическими парами.
2. Разработать принципиальную конструкторскую схему опоры, в которой скольжение заменено качением, с целью значительного уменьшения абразивного изнашивания и потерь энергии на трение.
3. Определить основные характеристики для оценки качественных показателей опоры возвратно-поступательного движения.
4. Разработать устройство, обеспечивающее устойчивую работу опоры независимо от изменения угла трения в контактах поверхностей качения.
5. Предложить опору для использования в механизме уравновешивания сил инерции и сил тяжести ножа жатки.

В результате работы над проектом поэтапно были получены следующие результаты.

Резюме 1: а) известна конструктивная схема опор возвратно-поступательного движения с высшими кинематическими парами, в которой скольжение заменено перекачиванием внешних поверхностей по внутренним;

б) выявлены основные характеристики для оценки качественных показателей опоры: траектория движения верхней плиты; отношение возвращающего усилия к вертикальной нагрузке, т.е. тангенс угла возврата; угол между равнодействующей сил и ее нормальной проекцией в точках контакта, т.е. угол сцепления;

в) получены расчетные зависимости, по которым исследованы четыре частных случая влияния параметров опоры на ее характеристики; каждый частный случай может быть использован в зависимости от назначения опоры и условий ее эксплуатации.

Резюме 2: а) амплитуду колебаний опоры с высшими кинематическими парами можно существенно увеличить путем установки замыкателей, которые будут воспринимать касательные силы, если угол сцепления превысит угол трения;

б) при установке замыкателей имеет место незначительное скольжение, если $2 < R/r \leq 3$; если $1,5 \leq R/r < 2$, скольжение существенно возрастает по мере приближения к 1,5;

в) для варианта $R/r = 1,5$ амплитуду угловых колебаний стойки следует ограничить 20° .

Полученные материалы теоретического анализа дали основание для формулирования заключения: предложены конструкции опор возвратно-поступательного движения с высшими кинематическими парами и разработана методика расчета основных геометрических, кинематических и силовых параметров; намечены отрасли возможного применения таких опор; разработана общая методика расчетов на контактные и прочностные напряжения.

Резюме 3: а) результаты теоретических характеристик восстанавливающей силы проверены статическими испытаниями на стенде;

б) как расчетные, так и экспериментальные кривые имеют нелинейную характеристику восстанавливающей силы;

в) в эксперименте кривая восстанавливающей силы оказалась ниже теоретической из-за сил трения в элементах системы;

г) при динамических испытаниях колебаний на стенде получены кривые изменения амплитуды колебаний груза в зависимости от частоты и амплитуды возмущающей силы для двух вариантов нелинейной системы;

д) максимальная амплитуда колебаний системы зависит от величины амплитуды возмущающей силы, причем при кинематических амплитудах 10 мм и 7 мм имеет место “сброс” амплитуд при переходе в зарезонансную зону, при амплитуде 4 мм амплитуда не достигает значения “сброса” из-за наличия существенного трения в системе; е) проведенные испытания позволили качественно подтвердить, что поведение груза на опорах с высшими кинематическими парами при вынужденных колебаниях не противоречит общепринятой теории колебаний нелинейных систем;

ж) при стендовых испытаниях натурного образца опоры полученные характеристики возвращающей силы практически совпали с расчетными числами.

Резюме 4: а) если нож жатки не уравновешен, то при возвратно-поступательном его движении возникают виброколебания всего жатвенного агрегата;

б) амплитуда виброколебаний зависит от отношения собственной и вынужденной частот и при отношении, близкому к единице, амплитуда теоретически может возрастать до бесконечности;

в) станок уравновешивающего механизма исключает возникновения виброколебаний, источником которых является нож жатки.

Таким образом, интегрально следует:

1. Разработаны теоретические основы устойчивости равновесного состояния системы на стойках с высшими кинематическими парами.

2. Предложена принципиально новая конструкция опор с высшими кинематическими парами, в которых скольжение заменено перекачиванием выпуклых цилиндрических поверхностей по вогнутым поверхностям, что существенно увеличило износостойкость рабочих поверхностей опор.

3. Выявлены основные характеристики для оценки качественных показателей опоры возвратно-поступательного движения: траектория движения верхней плиты; отношение возвращающего усилия к вертикальной нагрузке (тангенс угла возврата); угол между равнодействующей сил и ее нормальной проекцией в точках контакта (угол сцепления).

4. Разработана принципиальная схема и метод расчета замыкателей касательных сил – устройства обеспечивающего устойчивую работу опоры вне зависимости от изменения угла трения.

5. Предложены элементы конструкции опор с высшими кинематическими парами и методика их прочностных расчетов.

6. При статических и динамических стендовых испытаниях опор расчетные характеристики подтвердились.

7. Разработана конструкция опоры с высшими кинематическими парами для использования в механизме уравновешивания сил инерции и сил тяжести ножа жатки.

Несмотря на положительные результаты работы, такие опоры имеют ограниченное применение из-за своих конструктивных признаков, в связи с чем устройство было усовершенствовано.

Опора возвратно-поступательного движения с высшими кинематическими парами, содержащая основание и верхнюю плиту с вогнутыми поверхностями и установленные между ними стойки с выпуклыми поверхностями на торцах, отличается от исследованных ранее тем, что контактирующие рабочие поверхности основания, верхней плиты и стойки выполнены с неровностями, которые могут быть или зубчатыми с любой формой профиля зубьев, или с выпукло-вогнутым конгруэнтным профилем, или с выпукло-вогнутым зубчатым профилем (заявка на изобретение № 2017142218/20(073019) от 04.12.2017). В данном проекте исследуются возможности реализации принципа "дискретного контакта" в работе зубчатого зацепления возвратно-поступательного движения.

В некоторых отраслях техники применяются подвески,

в которых используются опоры с высшими кинематическими парами, благодаря чему существенно повышается износостойкость таких опор по сравнению с опорами скольжения. Подвески с такими опорами надежно работают более 20 лет. Однако эти подвески имеют большие габариты и массу и по этой причине не получили широкого распространения в технике.

Предлагаемая опора с высшими кинематическими парами, работающая на сжатие, которая, обладая достоинствами подвески, имеет небольшие габариты по высоте и в несколько раз меньшую массу. Кроме того, как оказалось в процессе реализации проекта, диапазон характеристик у нее значительно шире, чем у подвески.

Шульц В.В. [1] учел форму естественного износа зубчатых передач. По его мнению, математическая теория изнашивания подвижных сопряжений должна принимать за исходные положения экспериментальные наблюдения над микроскопическим поведением изнашиваемого контакта. Исследуя изнашивание зубьев передач, был определен рациональный теоретический профиль зубьев колес, имеющих оптимальную по износу выпукло-вогнутую форму – по сути форму двухэвольвентной передачи и ряд других интересных технических решений на основе учета формы естественного износа.

Двухэвольвентной названа эта зубчатая передача потому, что зубья шестерни имеют обычные винтовые эвольвентные поверхности, а зубья колеса – вогнутые винтовые поверхности, очерченные в нормальном сечении по петле удлиненной эвольвенты или ее эквидистанты. Было теоретически обосновано, что форма поверхности зубьев, работающих в режиме энергетического оптимума, устойчива к изнашиванию.

По сути своей, это предложение – криволинейный фланк изнашиваемых объемов части ножки и головки эвольвентного зуба, образованный от полюса зацепления, т.е., такие колеса – это "изношенное" эвольвентное зацепление. Износ – неизбежное следствие эксплуатации передач. Начиная с приработочной стадии, износ ведет к прогрессирующей потере кинематических и прочностных характеристик прямозубой эвольвентной передачи и к потере лишь прочностных свойств косозубой передач. Известно, что в процессе износа эвольвента рабочей поверхности приобретает форму, подобную профилю, очерченному по циклоиде.

В результате приработочного износа зубчатая передача должна обладать тенденцией к сохранению кинематических и стабилизации прочностных показателей. Для этого она должна: быть косозубой; иметь выпуклые и вогнутые в поперечном сечении профили зубьев; быть первоначально точно-сопряженной с почти линейным касанием, при этом линия зацепления должна быть параллельна мгновенной оси; быть внеполюсной, причем внеполюсность должна быть малой, также как и угол зацепления α ; иметь возможно большие радиусы скругления впадин.

Особые требования: позволять, путем воздействия на производящие поверхности, составляющие подвижную неконгруэнтную зону, управлять формой и развитием пятна контакта для более благоприятного распределения нагрузки по зубу и образования профильного перекрытия. Идея о разделении кинематических и силовых функций,

позволившая "освободить" профили от сопряженности, используя при этом свойства винтовых поверхностей, дает возможность проектировать эти профили в соответствии с требованием не только контактной прочности, но и наилучшей гидродинамики и износоустойчивости.

Здесь важно не только соответствие форм поверхностей в точке контакта, но и соответствие формы и относительного движения. Т.е., нерабочие точки взаимодействующих зубьев должны иметь в относительном движении такие траектории, которые в наилучшей степени способствовали бы созданию устойчивого масляного клина.

Поскольку очевидно, что имеются ввиду только о внеполюсные передачи, то траекториями всех точек зубьев одного колеса (например, с выпуклым профилем) будут петли удлинённых эпициклоид. Отсюда следует, что парный ему вогнутый профиль должен быть либо по петле близкой к нему трохоиды, либо по петле удлинённой эвольвенты. Такие профили будут медленно расходиться в относительном движении.

Линия зацепления – это геометрическое место точек контакта в неподвижной системе координат. Условие задачи нахождения энергетически оптимальной линии зацепления представлено кривой, соответствующей наименьшей работе сил трения и максимальному КПД зубчатой передачи при постоянстве передаточного отношения (по сути – это попытка решения задачи, определенной Л. Эйлером). Такие кривые соответствуют эвольвентному и циклоидальному зацеплениям. Они в свое время были найдены из геометро-кинематических соображений, при которых не учитывалась энергетика процесса зацепления.

Плавность этих кривых не отражает скачкообразного перехода от однопарного к двухпарному зацеплению, когда все параметры зацепления меняются ступенчато. Следовательно, износ профилей эвольвентных колес сильно искажает линию зацепления. Меньше искажается линия зацепления циклоидальных колес, так как она ближе к оптимальной форме. Это подтверждают хорошо известные факты искажения профиля зацепления.

Зубчатые колеса, выполненные с учетом формы естественного износа, технологически значительно проблематичнее, чем доминирующие в наше время колеса с эвольвентным профилем. Поэтому явление "дискретного контакта", обоснованное в работе, за счет смещения наполнителя в процессе работы передачи к полюсу зацепления имитирует явление "естественного износа" в эвольвентном зацеплении, что не требует применения специальной технологии для изготовления новых зубчатых колес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Добавленные в смазочный материал мелкие сферические частицы (размером до 5 мкм) – для улучшения качественных показателей работы зубчатого зацепления, выполняют функции противоизносной и антифрикционной присадки. Частицы больших размеров приносят вред. Это может быть принято как рекомендация к отбору параметров сферических частиц наполнителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1990. – 208 стр. С. 139.

2. Титенок А.В. Зубчатая передача // Патент России на изобретение № 1768849. МПК⁷. F 16H 57/04. Оpubл. 15.10.1992 г. Бюлл. № 38.

3. Титенок И.А. Зубчатая передача // Патент России на полезную модель № 31157. МПК⁷. F 16H 57/04. Оpubл. 20.07.2003 г. Бюлл. № 20.

4. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Под ред. Хебды М., Чичинадзе А.В. – М.: Машиностроение, 1990. – С. 224 – 227.

5. Рейнер М. Деформация и течение. Введение в реологию. – М.: ГНТИ нефтяной и топливной литературы, 1963. – С. 44–46.

6. Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. – М.: Наука, 1979. – 118 с.

7. Лабунец В.Ф. Износостойкие боридные покрытия / В.Ф. Лабунец, Л.Г. Ворошнин, М.В. Киндрачук. – Киев: "Техника", 1989. – С. 46–54.

8. Манохин А.И. Новое в технологии получения материалов / А.И. Манохин, А.М. Поживанов, К.А. Блинов и др.; под ред. Ю.А. Осипьяна, А. Хауффа. М.: Машиностроение; Хану: Лейболд АГ, 1990. – С. 194 – 195.

9. Икрамов У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 78–83.

10. Маковецкий П.В. Смотри в корень! Сборник любопытных задач и вопросов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – С. 144–148.

11. Wellinger, K. Einfluß der Korngröße von Quarzstaub auf das Vtrschleißverhalten verschiedener Werkstoffpaarungen/ VDI-Zisch., 1950, № 15, – P. 371–375.

12. Гюнтер Х. О влиянии частиц минерального происхождения на характер износа. Теоретические и прикладные задачи терния, износа и смазки. / Х. Гюнтер, Д. Бессер.; отв. ред. К.В. Фролов. – М.: Наука, 1982. – С. 227–237.

13. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 170 – 171.

14. Аксютенков В.Т. Буксовая направляющая с элементами качения / В.Т. Аксютенков, А.В. Титенок, А.К. Тимаков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – №4. – С. 50 – 54.

15. Аксютенков В.Т. Опоры возвратно-поступательного движения с высшими кинематическими парами / В.Т. Аксютенков, А.В. Титенок, А.К. Тимаков. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2009. – № 2. – С. 49–52.

16. Аксютенков, В.Т. Расширение диапазона характеристик в опорах с высшими кинематическими парами / В.Т. Аксютенков, А.В. Титенок, А.К. Тимаков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – № 1. – С. 31 – 35.

17. Титенок А.В. Экспериментальное определение статических и динамических характеристик опор с высшими кинематическими парами / А.В. Титенок // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – №2. – С. 85 – 95.

18. Титенок А.В. Механизм с высшими кинематическими парами // Вестник Брянского государственного технического университета – 2017. – № 3. – С. 11 – 19.

Discrete Contact in Toothed Gearing

Titenok A.
Bryansk State Agrarian University
Kokino, Russia
titenok@bk.ru

Titenok I.
ABB
Moscow, Russia
Elproekt-it@yandex.ru

Abstract. On the basis of personal inventions and well-known experimental research the authors proved the characteristic of lubricant filling in the form of microscopic rounds as an antiwear and antifriction additive agent to improve toothed gearing quality.

Keywords: toothed gearing, tooth form, normal aging form, discrete contact, globules.

Моделирование процесса переноса шероховатости валков на полосу при прокатывании на дрессировочном стане

Огарков Н.Н., Платов С.И., Звягина Е.Ю.

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Магнитогорск, Россия

zviagina_mmf@mail.ru

Аннотация. В работе выполнено моделирование процесса переноса шероховатости валка на полосу с учетом условий дрессировки. В ходе работы проведен анализ напряженно-деформированного состояния материала вдавливаемого в микровпадины поверхности валка, для чего последние представлены в виде канавок треугольного сечения. Разработана модель переноса шероховатости валков на полосу с учетом реального распределения материала в шероховатом слое валка и полосы, а также с учетом вида обработки валка и условий дрессировки, что позволяет оценить степень заполнения рельефа единичной микровпадины при известных значениях давления на контакте полосы с валком, коэффициенте трения, параметрах шероховатости валка, режимах дрессировки. Полученные результаты позволяют спрогнозировать репродукцию микрорельефа валка на поверхности деформируемой полосы.

Ключевые слова: микрорельеф, механизм переноса микрорельефа, репродукция, микровпадина, дрессируемая полоса, коэффициент отпечатываемости.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее значимых и малоизученных проблем является установление формализованной связи между условиями прокатки и параметрами шероховатости валков и холоднокатаной полосы, и необходимой требуемой микрогеометрии поверхности готового продукта с учетом потребительских свойств [1-8].

Формирование регламентированного микрорельефа полосы непосредственно в очаге деформации реализуется через механизм переноса микрорельефа поверхности валка на полосу и трансформацию исходного микрорельефа [9-14].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Количественную оценку процесса отпечатываемости шероховатости валка на дрессируемой полосе определим через коэффициент отпечатываемости K , который представляет собой отношение величины затекания материала дрессируемой полосы Z_f к размеру микровпадины валка, характеризуемый параметром R_z (рисунок 1).

Задачу решаем для микровпадины валка треугольной формы, напряженное состояние в которой, при заполнении ее дрессируемым металлом, иллюстрируется рисунком 1.

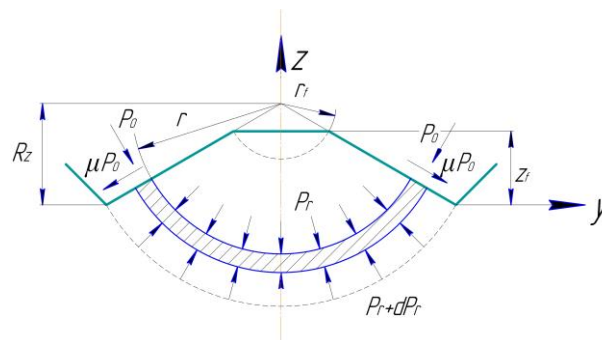


Рис. 1. Схема напряженного состояния при заполнении микровпадины валка треугольной формы дрессируемым металлом

Определение безразмерного напряжения, необходимого для затекания материала во впадины треугольной формы выполним используя зависимость Ю. Бочарова [15], которая применительно к примыкающим друг другу впадинам шероховатости принимает вид:

$$\frac{P}{\sigma_s} = \frac{4}{\sqrt{3\pi}} \left[3 \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{z_f}{R_z}} \right) + \frac{\pi S}{h} \right], \quad (1)$$

где P - давление, действующее на валки в процессе дрессировки; σ_s - предел текучести дрессируемого металла; R_z и S - высотный и шаговый параметр шероховатости рабочей поверхности валка [16,17]; h - толщина дрессируемой полосы на выходе.

Учитывая, что $\frac{z_f}{R_z} = K$ и решая уравнение (1) относительно K получим:

$$K = 1 - \frac{1}{\exp \left[\frac{1}{3} \left(\frac{\sqrt{3\pi} P_{cp}}{4\sigma_s} - \frac{\pi S}{h} \right) \right]}. \quad (2)$$

Для оценки давления, действующего на валки, воспользуемся особенностями процесса дрессировки и сделаем следующие допущения:

- рабочие валки дрессировочного стана являются приводными, одинакового диаметра с одинаковой шероховатостью рабочих поверхностей;
- форма контакта валка с дрессируемой полосой – плоская;
- дрессировка выполняется в сухую с коэффициентом трения в очаге деформации $\mu = 0,25 \dots 0,35$.
- ввиду высоких значений коэффициента трения, нейтральная точка в очаге деформации располагается около центра линии контакта.

Значения параметра q_1 для различных видов обработки рабочих поверхностей дроссировочных валков

| Вид обработки | R_{max} , мкм | q_1 |
|-----------------------------------|-----------------|-------------|
| Шлифование | 4,7/3,2 | 0,402/0,485 |
| | 2,4/1,6 | 0,423/0,519 |
| | 1,2/1,0 | 0,550/0,566 |
| Дробетная обработка | 8,6/5,8 | 0,482/0,538 |
| | 4,8/3,2 | 0,503/0,564 |
| | 1,2/0,8 | 0,548/0,576 |
| Электроэрозионное текстурирование | 12,1/7,2 | 0,489/0,543 |
| | 9,6/4,9 | 0,533/0,564 |
| | 4,2/1,2 | 0,567/0,576 |

С учетом принятых допущений, давление в очаге деформации без учета взаимодействия шероховатостей, определяется уравнением:

$$P = \sigma_d \left[\frac{h_0(1-\varepsilon)}{\mu L} \right] \left\{ \exp \left[\frac{\mu L}{h_0(1-\varepsilon)} \right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

где ε - обжатие дроссируемой полосы; L - длина контакта валок - дроссируемая полоса; μ - коэффициент трения в очаге деформации; h_0 - толщина дроссируемой полосы на входе.

Применительно к взаимодействию валка с деформируемой полосой с большим коэффициентом трения в работах [3,18,19] показано, что длина контакта валок - полоса может быть определена по зависимости:

$$L = \frac{1}{4} [D\varepsilon\mu + \sqrt{(D\varepsilon\mu)^2 + 8Dh_0\varepsilon}], \quad (4)$$

где D - диаметр рабочего валка.

Минимальное давление при дроссировке, необходимое для деформации полосы, определяется по зависимости [20]:

$$\sigma_d = 1,15(\sigma_s + d \lg 1000 \dot{\varepsilon}) - \sigma_t, \quad (5)$$

где σ_s - предел текучести, определяемый при испытаниях на растяжение при стандартной скорости деформации; d - динамический коэффициент, учитывающий влияние скорости при десятикратном увеличении скорости деформации; $\dot{\varepsilon}$ - скорость деформации при дроссировке; σ_t - растягивающее напряжение в очаге деформации, определяемое напряжениями натяжения полосы между разматывателем и клетью и клетью и моталкой.

Среднее значение скорости деформации $\dot{\varepsilon}$, с которой реализуется дроссировка, может быть определена по приближенной зависимости:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2V}{D\mu}, \quad (6)$$

где V - окружная скорость валка.

Слабой стороной уравнения (3) является то, что оно учитывает коэффициент трения в очаге деформации, но не учитывает того факта, что отпечатываемость шероховатости рабочей поверхности валка на дроссируемой полосе реализуется в пределах их шероховатых слоев и в значительной степени зависит от того, насколько процессы деформации дроссируемой полосы в зоне контакта шероховатостей взаимодействуют между собой и с тем «фундаментом», на котором они расположены.

В процессе дроссировки давление, определяющее несущую способность шероховатых слоев, определяется их опорными поверхностями. Закономерность изменения опорных поверхностей при сближении шероховатостей определяется их опорными кривыми. Принимая во внимание, что степень участия микронеровностей поверхностей валка и полосы различна, целесообразно использовать их среднеинтегральные значения [21], которые определяют относительное количества металла в шероховатых слоях.

Сближение шероховатых поверхностей валка и дроссируемой полосы приводит к возникновению общей опорной поверхности шероховатых слоев. Допускаем, что общая опорная поверхность определяется соотношением

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2}, \quad (7)$$

где q_1 и q_2 - относительное количество материала в шероховатых слоях валка и полосы.

Значения параметра q_1 сведены в таблицу 1.

Параметр q_2 при прокатке полосы шлифованными валками составляет 0,43-0,59, в зависимости от состояния рабочих поверхностей прокатных валков.

С учетом выше отмеченного, фактическое контактное давление шероховатых поверхностей в очаге деформации составляет

$$P_{ш} = P/q. \quad (8)$$

Безразмерное давление металла на валки дроссировочного стана с учетом выражений (3), (4), (5) и (6), (7), (8) запишется в виде:

$$\frac{P_{ш}}{\sigma_s} = \frac{1}{q} \left[1,15 \left(1 + \frac{d \lg 1000 \frac{2V}{D\mu}}{\sigma_s} \right) - \frac{\sigma_t}{\sigma_s} \right] \left[\frac{h_0(1-\varepsilon)}{\mu L} \right] \left\{ \exp \left[\frac{\mu L}{h_0(1-\varepsilon)} \right] - 1 \right\}. \quad (9)$$

Формула для расчета коэффициента отпечатываемости окончательно принимает вид:

$$K = 1 - \frac{1}{\exp \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{6q} \left[\left(1 + \frac{d \lg 1000 \frac{2V}{D\mu}}{\sigma_s} \right) - \frac{\sigma_t}{\sigma_s} \right] \left[\frac{h_0(1-\varepsilon)}{\mu L} \right] \left\{ \exp \left[\frac{\mu L}{h_0(1-\varepsilon)} \right] - 1 \right\} - \frac{\pi S}{3h} \right\}} \quad (10)$$

Использование зависимости (10) позволяет определить коэффициент отпечатываемости шероховатости валка на полосе с учетом реального распределения материала в шероховатом слое валка и полосы в зависимости от исходной шероховатости поверхности валков, толщины дроссируемой полосы, скорости прокатки, напряжения натяжения, обжатия.

Расчетные значения коэффициента отпечатываемости при различных режимах дроссировки приведены на рисунке 2.

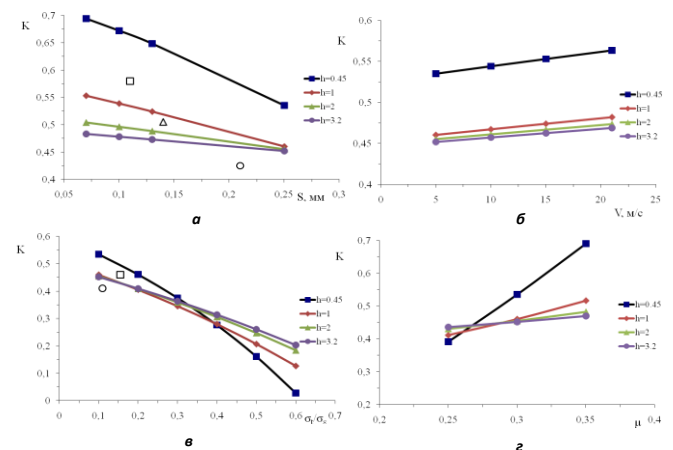


Рис. 2. Зависимость коэффициента отпечатываемости K в сравнении с экспериментальными данными Δ \square \circ , при дроссировки полосы разной толщины при исходных данных $D=500$ мм, $\varepsilon=0,02$, $q=0,5$, $d=12$ от: а) шага микронеровностей; б) окружной скорости валка; в) усилия натяжения; г) коэффициента трения.

Полученная зависимость позволяет сделать выводы, что наилучшая репродукция микрорельефа валка на дрессировочной полосе наблюдается при «сухой» дрессировке тонких полос, с малым шагом микронеровностей.

Полученные данные рекомендуются для «сухой» дрессировки полос, и ограничено для «мокрой» дрессировки [22,23].

Увеличение натяжения полосы резко снижает отпечатываемость микрорельефа валка на поверхности дрессировочной полосы.

При увеличении скорости вращения валка наблюдается незначительное влияние на изменение коэффициента отпечатываемости, особенно для толстых полос.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Разработана модель переноса шероховатости валков на полосу с учетом вида обработки валка и условий дрессировки, что позволяет оценить степень заполнения рельефа единичной микровпадины при известных значениях давления на контакте полосы с валком, коэффициенте трения, параметрах шероховатости валка, режимах дрессировки.

Полученные результаты могут быть использованы при корректировании существующих и разработки новых режимов дрессировки холоднокатанных полос для получения требуемого микрорельефа, в соответствии с потребительскими свойствами, с учетом коэффициента микрогеометрии рабочей поверхности валка дрессировочного стана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полухин П.И. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке / П.И. Полухин, В.П. Полухин – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.

2. Огарков Н.Н. Регламентирование шероховатости поверхности металлопроката в зависимости от его потребительских свойств / Н.Н. Огарков, С.В. Халин // Процессы и оборудование металлургического производства: Межрег. сб. науч. тр. - Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. – 2003. – С. 131 – 136.

3. Робертс В.Л. Холодная прокатка стали. Пер с англ. - М.: Металлургия, 1982. – 544 с.

4. Звягина Е.Ю. Совершенствование оборудования и технологии насечки валков дрессировочных станков дробью для улучшения качества поверхности автолиста: дис. канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2017. – 175 с.

5. Огарков Н.Н. Влияние способа обработки рабочей поверхности валка на качество холоднокатаного листа / Н.Н. Огарков, Е.Ю. Звягина, Ю.Д. Залетов // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: Междунар. сб. научн. тр. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», – 2006. – С. 39 – 45.

6. Белов В.К. Моделирование процессов формирования микропогографии поверхности в процессе дрессировки автолиста / В.К. Белов, Д.О. Беглецов; под ред. В.М. Салганика // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межрегион. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – С. 58-64.

7. Utsch M. EDT - Roll Texturing Technology as a Base of Modern Surfaces in Automotive Cold Mill Flat Products/ Utsch

M., Vinke P. // MS&T.: Conference Proceeding. – 2004. – С. 599-607.

8. Огарков Н.Н. Совершенствование дробеметной обработки прокатных валков для производства автомобильного листа / Огарков Н.Н., Залетов Ю.Д., Ласьков С.А., Звягина Е.Ю., Пожидаев Ю.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2010. - №2(30). – С.41 – 43.

9. Rasp W. Effects of surface-topography directionality and lubrication condition on frictional behavior during plastic deformation / Rasp W., Wichern C.M. // Journal of material processing technology. – 2002. – №125. – С. 379 – 386.

10. Кузнецов Л.А. Теоретическое определение коэффициента отпечатываемости микрорельефа валков на полосе при холодной прокатке / Л.А. Кузнецов, А.В. Мамышев // Известия вузов: Черная металлургия. – 1989. – №6. – С. 38 – 41.

11. Горбунов А.В. Получение автолиста с регламентированной микропогографией поверхности / А.В. Горбунов, А.Ф. Радионов, В.К. Белов и др. // Производство проката. – 2007. – №4. – С.15 – 17.

12. Marigue C. Surface roughness and user properties of cold rolled steel sheets / Marigue C., Bragard A. // American Society for metals. London. – 1983. – May 11-13. – P. 242 – 247.

13. Кузнецов Л.А. Теоретическое определение коэффициента отпечатываемости микрорельефа валков на полосе при холодной прокатке / Л.А. Кузнецов, А.В. Мамышев // Известия вузов: Черная металлургия. – 1989. – №6. – С. 38 – 41.

14. Мухин Ю.А. Формирование микрогеометрии поверхности холоднокатанных полос: учебное пособие / Ю.А. Мухин, А.В. Рыблов, Е.Б. Бобков, В.А. Черный - Липецк: Изд-во Липецкого гос. техн. ун-та, 2014. – 138 с.

15. Bocharov Y. The Mechanics of the Coining Process / Bocharov, Y., Kobayashi S., Thomsen E.G. – Trans. ASME, Series B, J. Eng. Ind.,84. – 1962. – С.491 – 501.

16. Ogarkov N.N. Improvements in Shot Blasting to Increase the Surface Peak Density of Auto-Industry Steel Sheet / N.N. Ogarkov, E.Yu. Zvyagina, Yu.D. Zaletov, N.N. Khomenko, L.F. Kerimova // Steel in Translation. – 2016. - Vol. 46. - No. 12. - PP. 847-850.

17. Tang Jing Gang. Определение и анализ шероховатости поверхности холоднокатанных стальных листов // Iron Steel Vanadium Titanium. – 2004. – № 2. – P. 66 – 70.

18. Алиев И.С. Исследование фактора контактного пластического трения // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: Сб. научн. тр. – Краматорск: ДГМА, 2002. – С. 112 – 120.

19. Васильев Я.Д. Исследование контактной линии с валком при холодной прокатке / Я.Д. Васильев, А.В. Дементенко // Известия высших учебных заведений. Черные металлы. – 2001. – № 7. – С. 21 – 24.

20. Roberts W.L. An Approximate Theory of Temper Rolling // Iron and Steel Engineer Year Book. - 1972. PP. 530-542.

21. Огарков Н.Н. Формирование шероховатости проката с высококачественной отделкой поверхности посредством регулирования состояния поверхностного слоя валков: Дис. докт. техн. наук. - Магнитогорск, 1996. – 322 с.

22. Влияние режимов эксплуатации и маслосъемности контактных поверхностей на толщину смазочной пленки в тяжело нагруженных узлах трения металлургических агрегатов / Д.В. Терентьев, Н.Н. Огарков, С.И. Платов, А.В. Козлов // Черные металлы. – 2018. – С. 60 – 63.

23. Ogarkov N.N. Oil absorption capacity of the contact surfaces in metal-forming processes / N.N. Ogarkov, S.I. Platov, E.S. Shemetova, D.V. Tepentev, V.A. Nekit, M.N. Samodurova // Metallurgist. – 2017. Vol.61, Iss1-2. – P.58 –62.

Modelling of Roll Roughness Transfer Process to the Strip During Skin-pass Rolling

Ogarkov N.N., Platov S.I., Zvyagina E.Yu.
Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russia
zviagina_mmf@mail.ru

Abstract. In this work the modelling of roll roughness transfer process to the strip in terms of skin passing conditions was carried out. In the present paper the analysis of the strain-stress state of material imprinted into microcavities of roll face is made, for which reason the latter is presented in the form of V-shaped grooves. The model of roll roughness transfer to the strip was developed by taking into account the real distribution of material in the rough layer of the roll and the strip, as well as according to type of roll processing and skin-pass conditions that allows to evaluate the degree of filling of singular microcavity under known pressure values of the strip on contact with a roll, friction coefficient, roll

roughness parameters, skin pass conditions. The findings afford to forecast a reproduction of roll microrelief of the surface of deformed strip.

Keywords: microrelief, microrelief transfer mechanism, reproduction, microcavity, temper-rolled strip, coefficient of imprinting.

Информационная модель для хранения состава машиностроительного изделия

Логинов А.Ю.
АО "ОКБ "Новатор"
Екатеринбург, Россия
loginovayu@gmail.com

Аннотация. В статье сформулированы причины потребности в использовании на машиностроительном предприятии формализованного состава изделия. Рассмотрены сходства и отличия конструкторского, технологического и производственного составов. Приведены основные требования к составу изделия как согласно ГОСТам ЕСКД, так и согласно сложившимся практическим наработкам. На основании сформулированных требований построена модель для хранения состава машиностроительного изделия в виде направленного ациклического графа. При этом вершинами этого графа являются элементы машиностроительного изделия, а дугами – факты вхождения одного элемента изделия в другой. В статье приведены допустимые типы элементов, из которых состоит модель машиностроительного изделия: сборочная единица, деталь, материал, покупное изделие, заготовка. Для каждого типа приведен набор атрибутов, необходимых для полного описания элемента этого типа. Приведена и обоснована матрица допустимой входимости различных типов элементов друг в друга. Показано как при помощи предложенной модели можно представить вариативный состав изделия. Построенная модель может быть использована на машиностроительных предприятиях в PDM и ERP системах собственной разработки. Основными особенностями представленной модели являются простота, полный учет требований ЕСКД/ЕСТД.

Ключевые слова: информационная модель, состав изделия, PDM, электронный состав, входимость.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы планирования и управления производством на современном машиностроительном предприятии осуществляются при помощи различных информационных систем [1,2]. В такие информационные системы должны быть загружены формализованные данные о всех аспектах производства: начиная от договоров, заказов, поставщиков и заканчивая используемыми при выпуске материалами и комплектацией выпускаемых изделий.

Большую роль при планировании производства играет состав изделия [3,4,5].

При этом в простейшем (вырожденном) случае состав может быть представлен как линейный список материалов и комплектующих, необходимых для производства изделия. При работе по стандартам ЕСКД/ЕСТД для этого используются "Ведомость комплектующих" [6] и "Ведомость материалов" [7]. В англоязычной практике эти два документа объединены в единый документ, который называется BOM, Bill of Materials [8,9,10].

Однако для точного планирования и управления производством простой линейный список не подходит. Для правильной организации производства необходимо иметь полную иерархическую структуру изделия.

Согласно [11] структура машиностроительного изделия представляет собой совокупность составных частей изделия и связей между ними, определяющих иерархию составных частей. При этом использование составных частей изделия в структуре изделия и/или его составных частей называется входимостью.

Выделяют несколько видов структуры (состава) машиностроительного изделия:

- конструкторский состав – то, как изделие видят спроектировавшие его конструкторы, как правило такой состав легко формируется из конструкторских спецификаций;

- технологический состав – это конструкторский состав, плюс добавленные туда технологические особенности производства деталей [12, 13]. При формировании норм в технологическом составе учитываются материалы из технологических требований, припуски под обработку заготовок на конкретном оборудовании и ряд других факторов;

- производственный состав – это как правило состав конкретного экземпляра изделия. Он формируется исходя из технологического состава. При этом, в случае вариантного состава, на всех уровнях должны быть приняты решения по использованию одного из вариантов. Никаких альтернативных материалов, компонентов, способов производства в производственном составе быть не должно. Использование производственного состава в ERP-системах позволяет наиболее эффективно осуществлять планирование и управление производством.

Отсюда вытекает, что задача правильного представления состава изделия является актуальной при построении ERP-системы предприятия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Информационная модель в информатике — это представление понятий, связей, ограничений, правил и операций, предназначенное для определения семантики данных для конкретной проблемной области [14].

Информационная модель состава машиностроительного изделия должна:

- отражать структуру изделия;
- сохранять необходимые параметры составных частей изделия.

Информационная модель состава машиностроительного изделия должна быть:

- формализованной;
- полной;
- открытой;
- исключающей дублирование.

К более специфическим требованиям можно отнести:

- полное представление вариантной информации (использование различных компонентов-заменителей);
- поддержку исполнений (согласно ГОСТ 2.113-75 [15]);
- поддержку сложных количеств при учёте входимости;
- поддержку случаев изготовления одних составных частей на основе других.
- поддержку композитных материалов, состав которых может быть задан в массовых долях.

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СОСТАВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ИЗДЕЛИЯ

Наиболее точно структуру машиностроительного изделия отражает направленный ациклический граф [16], т.е. такой ориентированный граф, в котором отсутствуют направленные циклы, но могут быть "параллельные" пути, выходящие из одного узла и разными путями приходящие в конечный узел.

При этом представление иерархии входимостей одних элементов графа в другие представлено на рис. 1.



Рис 1. Компоненты и связи

Из рисунка 1 видно, что каждый компонент модели имеет набор атрибутов, его описывающих. Кроме того, он имеет коллекцию ссылок на "родительские" элементы (через набор связей "Входит в") и коллекцию ссылок на своих "потомков" (через набор связей "Содержит"). Каждая связь в этой коллекции обозначает отношение родитель-потомок и снабжена соответствующими атрибутами.

ТИПЫ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ

В машиностроительном изделии используются различные типы компонентов [17].

Для информационной модели будем выделять следующие основные типы составных частей:

- сборочная единица;
- деталь;
- покупное изделие;
- материал;
- заготовка.

При этом покупные изделия и материалы являются элементами НСИ [18, 19]. На машиностроительном предприятии, как правило, существует отдельная система НСИ, в которой хранится информация об используемых стандартных покупных изделиях и материалах, выпущенных согласно ГОСТ и ОСТ. Элементы типа "Материал" и "Покупное изделие" импортируют из НСИ системы "Наименование" и ряд других свойств, при этом связь с базовой системой, содержащей master-данные поддерживается по ключу.

В таблице 1 приведена матрица допустимой входимости основных типов друг в друга. Если на пересечении стоит слово "Да", то это означает что в элемент с типом, указанный в строке, может входить элемент типа, указанного в столбце.

Таблица 1

Матрица допустимой входимости

| | <i>Сб. единица</i> | <i>Деталь</i> | <i>Покупной</i> | <i>Материал</i> | <i>Заготовка</i> |
|-------------|--------------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Сб. единица | Да | Да | Да | Да | - |
| Деталь | - | | Да | Да | Да |
| Покупной | Да | Да | Да | Да | - |
| Материал | - | - | - | Да | - |
| Заготовка | - | - | - | Да | - |

Из таблицы 1 видно, что "Покупной" элемент ведёт себя подобно стандартной "Сборочной единице".

В "Материал" могут входить только другие "Материалы". Это позволяет сохранять информационной модели структуру композитных материалов [20]. При этом, как правило, количества входящих материалов указываются в массовых долях или в процентах.

В элемент типа "Деталь" может входить элемент типа "Заготовка". Она несёт информацию о свойствах заготовки, необходимой для производства данной детали. Кроме того, в деталь могут входить материалы и покупные элементы. Это необходимо для указания вспомогательных материалов для производства данной детали. Если в деталь входит несколько заготовок, то это случай вариантности. На связях, идущих к этим заготовкам, располагается информация о порядковых номерах вариантов.

В заготовку входит только один или несколько материалов. Это позволяет сохранить в модели информацию о том, из каких материалов производится деталь.

При этом может быть два случая:

- все входящие в заготовку материалы используются для производства детали;
- при производстве детали используется только один из материалов (наборов материалов), остальные материалы (наборы) являются альтернативами

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ АТРИБУТЫ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ

Атрибутивный набор составных частей большей частью повторяет наименование колонок конструкторской спецификации.

Текстовый атрибут "Формат" содержит информацию о форматах конструкторского документа (согласно спецификации). В данном атрибуте указывается полный список форматов, без переноса части списка в "Примечания". Для "Материалов" и "Покупных" данный атрибут не заполняется.

В атрибуте "Наименование" указывается наименование составной части, согласно спецификации или другому документу.

В текстовом атрибуте "Обозначение" указывается обозначение составной части согласно спецификации. Данный атрибут не заполняется для "Материалов", так как они не имеют обозначения. Для корректного ввода данных в информационную систему данный атрибут должен проходить очень жёсткие проверки на корректность. В большинстве организаций существуют регламентные процедуры для формирования обозначений. Корректный ввод данного атрибута важен в связи с тем, что он зачастую используется как ключевой атрибут сущности. Кроме того, по этому атрибуту происходит связь с другими информационными системами.

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ АТРИБУТЫ СВЯЗЕЙ

Атрибут "Количество" указывает на то, в каком количестве входит составная часть в вышестоящий компонент. Количество может быть, как целым, так и дробным числом. При этом у количества может быть единица измерения. Например, "15", "2,5 кг", "3 м".

Вместо единицы измерения могут применяться понятие массовых долей или процентов. Это находит применение при представлении составов многокомпонентных материалов. При этом на одном уровне должны указываться либо количества в процентах, либо количества в массовых долях.

В информационной модели существует понятие сложного количества, т.е. такого количества, которое указывается не на один вышестоящий компонент, а на некоторое их количество. Например, если при входимости материала стоит количество "3 кг/15 сб." - означает, что на 15 вышестоящих сборок надо взять три килограмма этого материала. Добавление в информационную модель таких количеств позволяет более гибко представлять количество. Как правило такое представление количества более привычно для технологических подразделений и производственных цехов.

Кроме того, в информационной модели существует понятие количеств с альтернативой. Например, если кабель может измеряться в погонных метрах (п.м.) или килограммах (кг), то его количество может быть записано, например, так: "0,5 кг (10 п.м.)". Это будет означать, что для производства изделия нужен кусок кабеля длиной 10 погонных метров и массой 0,5 кг. Использование количеств с указанной альтернативой позволяет совместить взгляд на количество со стороны разных подразделений. Например, технологи могут оперировать с длинами кабельной продукции, в то время как отдел снабжения для учёта тех же материалов может получать информацию о массе закупаемых для производства изделия материалов.

Находящийся на связи атрибут "Норма" позволяет технологам указывать точное количество используемых материалов. В "Норме" можно также использовать сложные количества и количества с альтернативой. Норма может как совпадать непосредственно с количеством материала, так и отличаться от него. Отличия "Количества" и "Нормы" происходит из-за расходования материала на различные технологические операции: раскрой, резка и др. Атрибут "Норма" предоставляется технологами уже после создания

технологического процесса, по которому будет идти производство детали или сборочной единицы.

Важными атрибутами связи являются "Номер варианта" и "Ссылка на вариант". Целочисленный "Номер варианта" связи задаёт порядковый номер взаимозаменяемого составной части внутри компонента. В то время как при помощи "Ссылок на вариант" задаётся разделение вариантных групп.

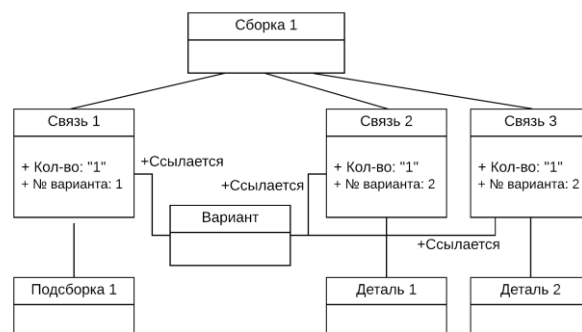


Рис 2. Взаимозаменяемые элементы

На рис. 2 приведён пример, в котором показано, что "Сборку 1" можно собрать или используя "Подсборку 1", или же используя целую группу деталей "Деталь 1", "Деталь 2". При этом все связи, соединяющие сборку верхнего уровня с её составными частями ссылаются на один и тот же элемент типа "Вариант".

Для полного представления информации, содержащейся в спецификации конструкторских изделий [1], каждая связь содержит:

- атрибут "Позиция" указывают порядковые номера составных частей, непосредственно входящих в специфицируемое изделие, в последовательности записи их в спецификации;
- атрибут "Зона", который указывают обозначение зоны, в которой находится номер позиции записываемой составной части (при разбивке поля чертежа на зоны по ГОСТ 2.104);
- атрибут "Раздел спецификации", который на указывает раздел спецификации (согласно ГОСТ 2.106-96) в которых входит составная часть (данный атрибут не заполняется при раскрытии состава многокомпонентных материалов и сложных покупных изделий).

Если связь используется для указания входимости составных частей не по спецификации ЕСКД, то атрибуты "Зона", "Позиция" не заполняются.

Кроме того, связь содержит информацию о прочих признаках составной части, необходимых для организации КТПП:

- признак "Дополнительного материала" активен, если составная часть является дополнительным материалом, напрямую не указанным в спецификации на изделие, но входящим в его состав и необходимым для производства (например, краски и прочие покрытия). Как правило, такие материалы указываются в технических требованиях на чертеже, согласно ГОСТ 2.316-2008 [21];
- признак "Вспомогательного материала" активен, если составная часть является необходимой при производстве (согласно технологическому процессу), но напрямую не

входящей в состав изделия (например, перчатки для рабочего, промывочные жидкости и др.)

Наличие данных дополнительных признаков позволяет формировать отчёты по используемым материалам и компонентам согласно ЕСКД/ЕСТД, а также отчёты для экономических подразделений, осуществляющих учёт основных и вспомогательных материалов [22]

Атрибут "Сборочный цех" позволяет технологам указывать цех, в котором будет собираться данный компонент.

ОБЩИЕ АТРИБУТЫ

Как любая составная часть, так и элемент типа "Связь" имеют атрибут "Примечание". В данный атрибут заносится неформализованная информация различного рода. При этом, если примечание занесено для составной части, то оно является общим для всех мест, куда входит данная составная часть. Если примечание указано для связи, то оно действует только для этой входимости.

Наличие атрибута "Примечание" позволяет сохранить на элементах и связях неформализованную информацию из спецификации или технологических процессов.

Примечательно то, что анализ применения конструкторами и технологами атрибутов "Примечание" на этапе эксплуатации информационной системы может выявить полезные закономерности, что впоследствии позволяет "доформализовать" информационную модель, перенеся часть введённой информации из примечаний в полностью формализованные атрибуты составных частей и связей.

Кроме примечаний и составные части, и связи содержат атрибут "Маршрут", в котором указывается маршрутная карта, согласно [23] для маршрутного или маршрутно-операционного описания технологических процессов. При этом если маршрут указан для составной части, то маршрут будет общим для всех применений, данной составной части внутри изделия. Если же маршрут указан для связи при входимости некоторой составной части, то он заменяет собой стандартный маршрут составной части, и именно маршрут с входимости будет использован при всех расчётах.

ВЫВОДЫ

Предложенная информационная модель позволяет:

- формально описать конструкторский (и частично) технологический состав машиностроительного изделия согласно ЕСКД/ЕСТД;

- исключить дублирование информации на всех уровнях;

- быстро строить выборки как по составу конкретной сборочной единицы, так и по составу вглубь;

- быстро получать информацию о входимости и применимости составных частей машиностроительного изделия.

Модель может быть использована для организации хранения информации о составе изделия в PDM/PLM/ERP системах.

Данная модель с минимальными изменениями используется с 2006 года для хранения информации в системе "Состав изделий 2.0" в АО "ОКБ "Новатор" [24]. По результатам эксплуатации опыт применения данной информационной модели в АО "ОКБ "Новатор" признан успешным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дикерсбах Й.Т. Планирование и управление производством с помощью решений SAP ERP / Й.Т. Дикерсбах, Г. Келлер. – М.: Эксперт РП, 2011. – 610 с.

2. Полномошнова О.М. Обоснование решений при стратегическом планировании с помощью экономико-математического моделирования на наукоёмком предприятии // Организатор производства. – 2017. – Т. 25, №2. – С.68–78.

3. Коблов Н.Н. Построение единого информационного пространства информационных данных // Вестник науки Сибири. – 2013. – №1(7). – С.62–68.

4. Кульга К.С. Применение интегрированной автоматизированной информационной системы для управления ресурсами авиационного предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №1(5). – С. 1448–1455.

5. Михайлов В.Г. О подходах к созданию интегрированной информационной системы PDM-ERP // Обработка информации и принятие решений. – 2016. – №2. – С. 17–24.

6. ГОСТ 2.106-96 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Текстовые документы – Введ. 01.07.1997.

7. ГОСТ 3.1123-84. Единая система технологической документации. Формы и правила оформления технологических документов, применяемых при нормировании расхода материалов – Введ. 01.01.1986.

8. Snapp Shaun The Bill of Materials in Excel, ERP, Planning and PLM/BMMS Software. / S. Snapp. – SCM Focus, 2012. – 252 p.

9. Bill of Materials for Dummies – ЕТО – URL: <https://virtualdutchman.com/2010/01/19/bill-of-materials-for-dummies-eto/> (дата обращения 20.11.2018).

10. Creating a Bill of Materials URL: <https://www.arenasolutions.com/resources/articles/creating-bill-of-materials/> (дата обращения 20.11.2018).

11. ГОСТ 2.053-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Электронная структура изделия. Общие положения – Введ. 01.06.2014.

12. Вепрев А. Формирование технологического состава изделия и разработка технологических процессов по маршруту изготовления технологических исполнений детали / А. Вепрев, С. Стреляев, С. Бушков // САПР и графика. – 2010. – №1. – С. 81-83.

13. Абросимов Д. Технологическая структура – основа технологической подготовки производства и управления производством [Электронный ресурс] / Д. Абросимов, А. Скопинцев, Г. Чернобыль // Умное производство. – 2014. – №27. URL: http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=540&group_id_4=93&m_id_4=29 (дата обращения: 20.11.2018).

14. Lee Y. T. Information modeling from design to implementation / Y.Y. Lee // Proceedings of the Second World Manufacturing Congress WMC'99. – Durham, 1999. – С. 315-321.

15. ГОСТ 2.113-75 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Групповые и базовые конструкторские документы – Введ. 01.07.1976.

16. Оре Ойстин Теория графов. – Москва: Либроком, 2009. – 354 с.

17. Столяров А.И. Особенности формирования электронной структуры комплекса в приборостроении / А.И.

Столяров, Ю.В. Донецкая, Ю.А. Гатчин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, №2. – С. 312–317.

18. Черников Б.В. Информационный анализ при формировании систем нормативно-справочной информации // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2015. – №2 (163). – С. 70–81.

19. Бородин А.М. Метод управления нормативно справочной информацией (НСИ) в автономных информационных системах / А.М. Бородин, С.Г. Мирвода, С.В. Поршнева // Инженерный вестник Дона. – 2013. – №4 (27). – С. 76.

20. Кербер М. Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.

21. ГОСТ 2.316-2008 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Правила нанесения надписей, технических требований и таблиц на графических документах. Общие положения. – Введ. 01.07.2009.

22. Вспомогательные материалы. URL: <https://prof-meter.com.ua/Encyclopedia/detail.php?ID=851> (дата обращения: 20.11.2018).

23. ГОСТ 3.1102-2011 Единая система технологической документации (ЕСТД). Стадии разработки и виды документов. Общие положения. – Введ. 01.01.2012.

24. Логинов А.Ю. Организация единого информационного пространства сбора и обработки конструкторско-технологической информации об изделиях на базе информационных систем собственной разработки / А.Ю. Логинов, Д.В. Вольман, А.Е. Розенбаум // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2012, – №3 (262). – С. 24-26.

Information Model for Machine's Electronic Structure Storage

Loginov A.Y.

Novator Design Bureau

Ekaterinburg, Russia

loginovayu@okb-novator.ru

Abstract. The article formulates the reasons for the use of a formalized electronic structure of a product at a machine-building enterprise. It is reported similarities and differences of design, technological and production structure of the engineering product. It is described in short the basic requirements for the composition of the product according to GOST ESKD and according to the practical experience. Based on the formulated requirements, a model for storing of a machine-building product's composition in the form of a directed acyclic graph is proposed. In this case, the nodes of this graph are the elements of the engineering product, and the edges are the facts of the entry of one element of the product into another. The article presents the permissible types of elements that make up a model of a machine-building product: an assembly unit, a assembly part, a material, a purchased item, a

billet. For each type, it is introduced a set of attributes required to fully describe an element of this type. It is given the matrix of available entrance occurrences of various elements types into each other. It is shown how one can imagine the variable composition of the engineering product with the help of the proposed model. The purposed model can be used at machine-building enterprises in PDM and ERP systems of its own design. The main features of the presented model are simplicity, full compliance with ESKD / ESTD requirements.

Keywords: information model, machine's electronic structure, BOM, where-used list.

Расчетно-экспериментальные исследования деформаций цилиндров дизелей с воздушным охлаждением на этапе сборки

Агуреев И.Е., Платонов К.Ю., Хмелев Р.Н.

Тульский государственный университет

Тула, Россия

agureev-igor@yandex.ru, k.j.platonov@mail.ru, aiah@yandex.ru

Аннотация. Получены закономерности деформаций рабочей поверхности цилиндров дизелей с воздушным охлаждением от действия монтажных усилий. Исследовано влияние механических свойств материала цилиндра и его конструктивных параметров на характер деформаций. Даны рекомендации по изменению конструкции и технологии изготовления цилиндров.

Ключевые слова: дизель; цилиндр; воздушное охлаждение; деформации; математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Цилиндр является одной из наиболее ответственных деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Совершенство конструкции, технологии изготовления и сборки цилиндров на начальном этапе можно оценить по деформациям цилиндра, которые существенно влияют на продолжительность обкатки ДВС, вероятность прихвата (заклинивания) в цилиндропоршневой группе на стадии обкатки и возможность достижения двигателем требуемых выходных характеристик.

Решению проблемы уменьшения деформации цилиндра ДВС посвящены работы [1-16], анализ которых позволяет сделать вывод о том, что совершенство конструкции цилиндра двигателя с воздушным охлаждением во многом зависит от технологии его производства, особенностей конструкции, свойств материала, воздействия монтажных усилий и др [17-18].

В настоящей работе для многоцелевого одноцилиндрового дизеля с воздушным охлаждением выполнены расчетно-экспериментальные исследования деформаций цилиндра на этапе сборки.

Цель исследований – уменьшение деформаций цилиндра дизеля 1С 9,5/8,0 по внутреннему диаметру на стадии его сборки.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Значительное влияние на характер деформаций оказывает такой параметр, как модуль упругости [19].

Модуль упругости цилиндрического чугуна может изменяться по объему цилиндра. Это, к сожалению, является недостатком технологии литья. Поэтому в работе производились экспериментальные исследования образцов чугуна, выполненных из различных участков одной и той же отливки.

В ходе эксперимента на разрывной машине были получены значения модуля упругости для материала цилиндра

при различных значениях температуры. Испытание образцов на статическое растяжение проводилось при температурах (°С): 20; 100; 200; 400; 600; 800. Растяжение осуществлялось при скорости деформирования 5 мм/мин. Зависимости модуля упругости от температуры, в дальнейшем, позволят исследовать температурные деформации при работе дизеля.

Эксперименты проводились на машине INSTRON серии 5982 (рис. 1) с компьютерным управлением, с тяжелой рамой и рабочей нагрузкой 100 кН, которая широко применяется для испытания высокопрочных металлов и сплавов, улучшенных композитов, аэрокосмических и автомобильных конструкций, болтов, крепежных деталей и листовой стали.



Рис. 1. Испытательная машина INSTRON

Механические характеристики определялись по методике, приведенной в ГОСТ 1497-84 [20].

Также была проведена серия экспериментов по измерению на координатно-измерительной машине диаметра цилиндров в свободном состоянии и под воздействием монтажных усилий. С этой целью была изготовлена специализированная оснастка, позволяющая симитировать сборку цилиндра с картером и головкой, не препятствующая, при

этом доступу к цилиндру измерительного устройства. На рис. 2 показаны графики перемещения стенки цилиндра для двух перпендикулярных вертикальных сечений в свободном состоянии, и в сборке. Нормативное усилие затяжки гаек крепления головки 30...35 Нм. Результаты измерений указывают на упругий характер деформаций.

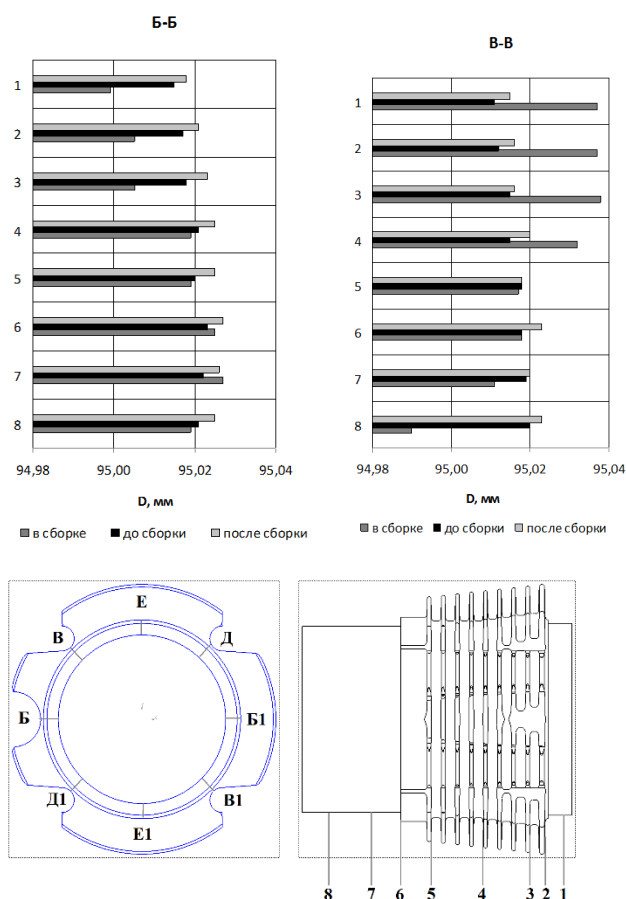


Рис. 2 Перемещение стенки цилиндра (мм) в свободном состоянии, и в сборке

Сравнение величины и характера деформаций цилиндров диаметром 95 мм и 85 мм в сборке позволяют сделать вывод о качественно идентичном характере деформаций. При этом цилиндр диаметром 95 мм при сборке во всех поясах имеет значительно большие деформации. В частности, наиболее характерным является сечение Д-Д. Максимальное изменение диаметра цилиндра диаметром 85 мм составляет 11 мкм, цилиндра 95 мм 26- мкм. Также следует отметить, что при сборке цилиндр диаметром 95 мм во всех рассматриваемых поясах выходит за допустимые значения (в среднем на 15- 20 мкм).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В настоящее время наиболее эффективным методом исследования деформаций цилиндров является математическое моделирование и вычислительный эксперимент. В данной работе для исследования деформаций внутреннего диаметра цилиндра использовался программный комплекс ANSYS [21].

В работе используется статическая изотропная постановка задачи теории термоупругости, которая решается с использованием экспериментальных данных о величине модуля упругости материала цилиндра.

Одним из основных этапов сборки двигателя является затяжка шпилек головки цилиндра, поскольку она связана с приложением к цилиндру значительного усилия. Выбор его величины и правильность его распределения может повлиять на изменение геометрии цилиндра. Расчет приложенной к крышке цилиндра осевой сжимающей силы, вызванной действием момента затяжки, осуществлялся по зависимостям, приведенным в работе [22]. Усилие на шпильку, равное 27,6 кН, рассчитывалось по формуле 1.

$$M_{\text{кл}} = F_0 \left[0.5d \left(\frac{P}{\pi d} + 1.15f \right) + f_t R_T \right] \quad (1)$$

где $M_{\text{кл}}$ - момент на ключе, F_0 - усилие затяжки, d - диаметр резьбы, P - шаг резьбы, f - приведенный коэффициент трения, f_t - коэффициент трения на торце гайки, R_T - радиус трения опорной поверхности гайки.

При моделировании операции затяжки шпилек использовались 3-х мерные модели цилиндра и сопряженных с ним деталей (головки цилиндра и картера), показанные на рис. 3.

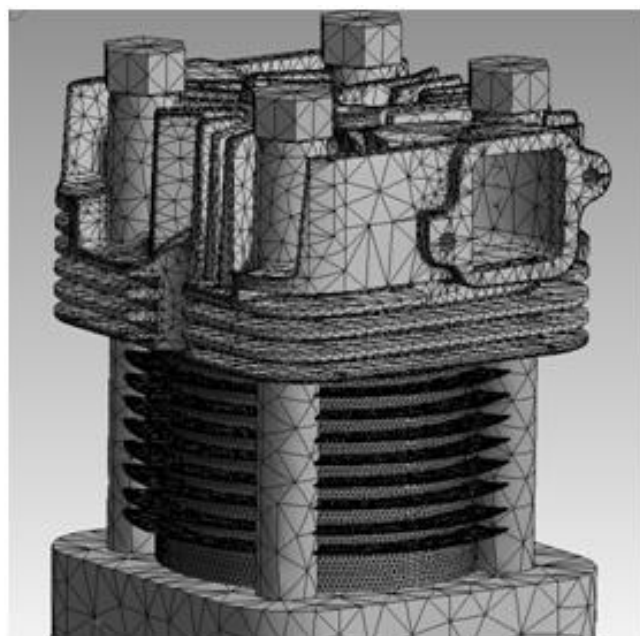


Рис. 3 Модель цилиндра в сборе с головкой и верхней частью картера

Для всех объектов в модели генерировалась сетка конечных элементов (табл. 1). Для ускорения расчета параметры сетки задавались различными для разных тел. Максимальное качество сетки применено для цилиндра, как представляющего наибольший интерес в данном исследовании. Параметры сетки были определены методом пробных расчетов (табл.2), дающие приемлемый результат в части сходимости решения. При дальнейшем уменьшении размеров конечного элемента результат расчета изменяется в пределах 5%. Таким образом, удалось значительно сократить время расчета без значительных потерь в точности моделирования. Моделирование проводилось на компьютере Asus N53S (Intel core i7-2670QM 2.2 GHz).

Таблица 2

Параметры сетки конечных элементов

| Параметр | Значение |
|--------------------------------|----------|
| Тип элементов | тетраэдр |
| Число узлов | 692122 |
| Число элементов | 410560 |
| Размер элемента (для цилиндра) | 1 мм |
| Время расчета одной задачи | 4 ч. |

Для каждого тела в сборке заданы различные материалы и свойства (табл. 3).

Таблица 3

Свойства материалов деталей дизеля

| Параметр | Цилиндр | Головка цилиндра | Картер |
|---|----------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Материал | Специальный цилиндрический чугун | АК94-К-Т6 ГОСТ 1583-03 | Специальный алюминиевый сплав |
| Плотность (кг/м ³) | 7052 | 2770 | 7850 |
| Коэффициент температурного расширения (°C ⁻¹) | 1,1·10 ⁻⁵ | 2,3·10 ⁻⁵ | 1,2·10 ⁻⁵ |
| Температура окружающей среды (°C) | 22 | 22 | 22 |
| Модуль Юнга (МПа) | 180000 | 71000 | 200000 |
| Коэффициент Пуассона | 0.25 | 0.33 | 0.3 |
| Удельная теплоемкость Дж/(кг·К) | 841 | 875 | 434 |
| Предел прочности при сжатии (МПа) | 180 | - | - |

При моделировании усилие от затяжки гаек прикладывается вдоль оси шпилек к головке цилиндра в местах приливов под шпильки. Посадочная плоскость верхней части картера принята абсолютно жесткой. В итоге моделирования были получены результаты, позволяющие выявить зависимости влияния усилий при монтаже на изменение геометрии цилиндра. Радиальные перемещения точек внутренней поверхности цилиндра имеют несимметричный характер распределения (рис. 4). Это зависит от наличия выемок в орбении, которые выполнены для установки шпилек и штанги толкателя.

Результаты расчета с использованием опытных данных сопоставлены с результатами на основе стандартных табличных значений модуля упругости чугуна. Ниже приведены диаграммы (рис. 5), показывающие радиальные перемещения для цилиндров с разными модулями упругости ($1,1 \cdot 10^{11}$ МПа и $1,8 \cdot 10^{11}$ МПа) в нескольких горизонтальных сечениях.

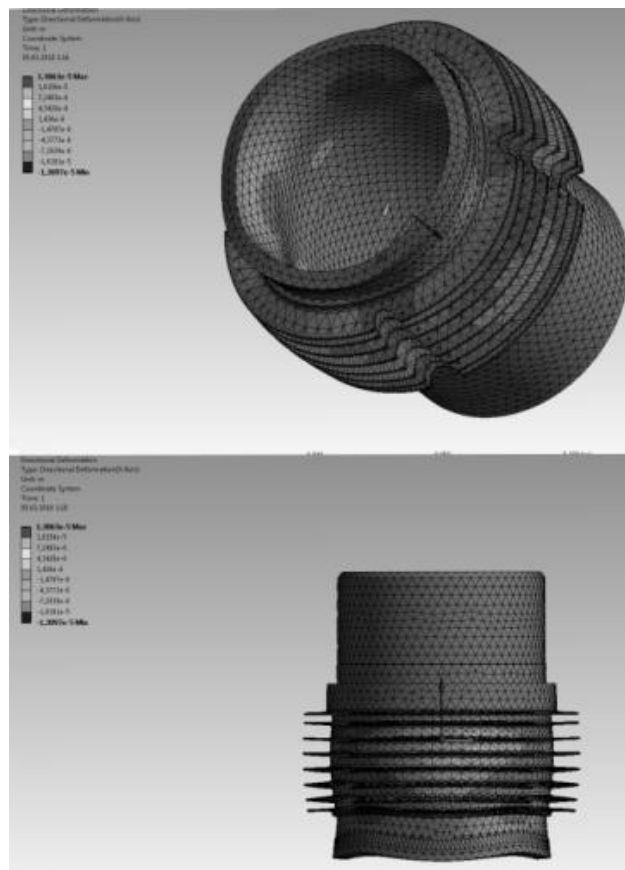


Рис. 4 Характер радиальных перемещений

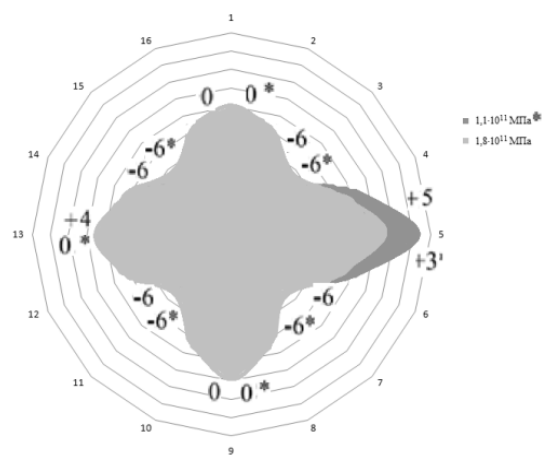


Рис.5 Перемещение стенки цилиндра (мкм) при экспериментальном (отмечено*) и табличном значениях модуля упругости

Также проведена серия расчетов, учитывающая весь диапазон экспериментально определенных значений модуля упругости. Результаты данных расчетов представлены в виде поля точек координат стенок цилиндра при различных модулях упругости (рис. 6) в сечениях 3 и 4 (сечение 4 отмечено знаком *).

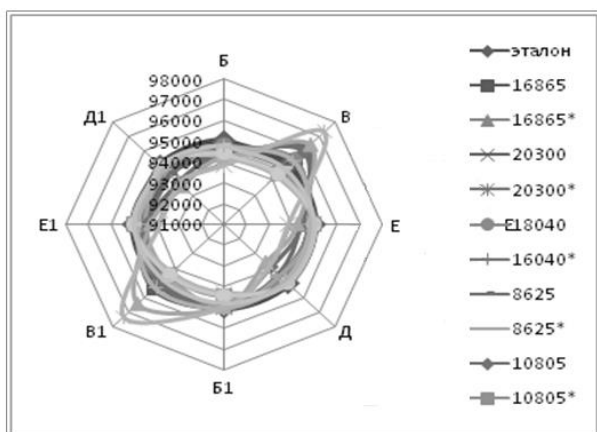


Рис. 6. Координаты стенок цилиндра при различных модулях упругости для сечения 3 и 4(*)

По результатам сравнения можно сделать вывод, что перемещения уменьшаются с увеличением модуля упругости. Кроме характеристик материала, на картину деформации влияют конструктивные особенности детали. В данной работе выполнено сравнение монтажных деформаций нескольких вариантов конструкции цилиндров, различающихся количеством ребер охлаждения и их размерами (рис. 7).

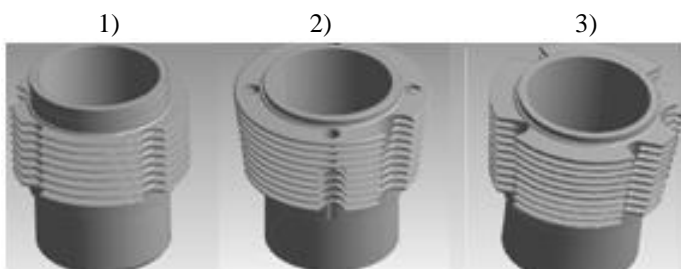


Рис. 7 Варианты конструкции цилиндра: 1) существующая, 2,3) новые конструкции

В качестве критериев оценки конструкции исследуемых цилиндров были приняты характер, уровень деформаций и технологичность конструкции. Конструкция цилиндра (2) отличается от существующей увеличенным числом ребер охлаждения и их длиной от нижней части цилиндра к головке. Верхние ребра данного цилиндра вместо выемки для шпилек имеют сверления, что придает цилиндру большую жесткость, кроме этого улучшается эффективность охлаждения, в следствие увеличения площади оребрения с 14300 мм² для существующего цилиндра (в т.ч. 4700 мм² приходится на часть головки) до 16000мм² для цилиндра нового образца (в т.ч. 3300 мм² приходится на часть головки). Данные изменения приводят к уменьшению величины перемещений на 14-16 % (рис. 8). Однако изготовление цилиндра данной конструкции технологически усложняет процесс производства.

Конструкция цилиндра (3), совмещает положительные свойства исследованных цилиндров. Данная конструкция имеет пояс оребрения с увеличением числа ребер охлаждения и увеличением их высоты от нижней части цилиндра к головке. Для размещения шпилек, используются проточки вместо сверлений. Такая конструкция имеет увеличенную

эффективность охлаждения в верхней части цилиндра, благодаря дополнительным ребрам охлаждения и более технологична.

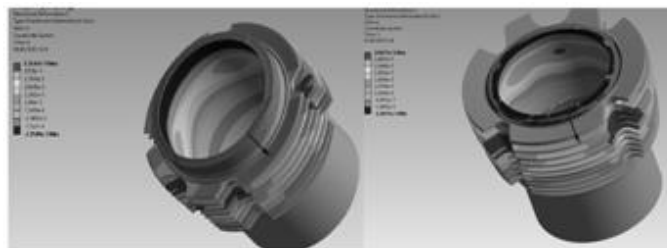


Рис. 8 Деформации существующего цилиндра (слева) цилиндра и новой конструкции

Цилиндр 3 имеет меньшие (на 14-15%) величины перемещений и, достаточно равномерное их распределение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании расчетно-экспериментальными методами решена задача анализа деформаций цилиндра дизеля 1Ч 9,5/8,0 с целью их уменьшения. Были получены температурные зависимости модуля упругости реального материала, которые использовались для расчета на этапе определения монтажных деформаций цилиндра вследствие затяжки шпилек головки. В последующих исследованиях предполагается получение суперпозиции температурных и монтажных деформаций.

Полученные деформации имеют несимметричный характер, связанный с геометрией выемок в оребрении цилиндра. Выявленный характер радиальных деформаций точек рабочей поверхности цилиндра качественно соответствует результатам аналогичных исследований для дизелей другой размерности того же производителя. Для всех исследуемых цилиндров в сборке с различными головками был получен идентичный характер деформаций, независящий от первоначальной геометрии внутреннего диаметра цилиндров. При этом максимальные значения деформаций наблюдаются в сечениях Д-Д и Б-Б, и составляют порядка 40-50 мкм.

Полученные результаты позволяют сформулировать основные направления уменьшения деформаций цилиндра дизеля с воздушным охлаждением:

- изменение схемы крепления
- изменение момента затяжки
- механическая обработка внутренней поверхности цилиндра (хонингование) в собранном виде.

Для рассматриваемой конструкции дизеля последний вариант является наиболее предпочтительным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев А.Г. Снижение механических потерь в быстрходном дизеле воздушного охлаждения совершенствованием конструкции деталей ЦПГ, дисс канд. техн. наук. – Москва, 2017. – 177 с.
2. Анализ закономерностей деформации цилиндра дизеля с воздушным охлаждением от действий монтажных усилий. // Прогресс транспортных средств и систем-2018: Материалы международной научно-практической конференции. (Волгоград, 2018 г.) – Волгоград, 2018. – 326 с.

3. Платонов К.Ю. Моделирование и анализ деформаций цилиндра дизельного одноцилиндрового двигателя на стадии сборки. / К.Ю. Платонов, Р.Н. Хмелев // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. Брянский государственный аграрный университет (Кокино), 2017. – С. 274-278.

4. Чайнов Н.Д. Расчет теплового и напряженно-деформированного состояния моноблока быстроходного судового дизеля. / Н.Д. Чайнов, Н.С. Иванова, Н.Г. Мелешенко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – №10. – С. 34-42.

5. Гутиева Н.А. Расчет деформаций опорных буртиков втулки цилиндра и блок-картера дизелей. – Вестник ДГТУ. Технические науки. 2007 №13. 62-63 с.

6. Соловьев В.Л., Корнилович С.А. Исследование влияния качества монтажа головок цилиндров на надежность двигателей внутреннего сгорания. Вестник Омского государственного аграрного университета. Технические науки. 2015. 55-61 с.

7. Kang, Q.-Y. Cao, X.-H. Guo, C.H. Hu, G.L. Xing, S.C. Yin, H.Y., Cylinder block deformation evaluation method research and its structural optimization for diesel engine, Neiranji Gongcheng/Chinese Internal Combustion Engine Engineering, Volume 36, Issue 2, 15 April 2015, Pages 93-97

8. Ma, Z. Henein, N.A. Bryzik, W. Glidewell, J. Cylinder liner surface analysis during si engine break-in, Tribology Transactions, Volume 45, Issue 3, 1 January 2002, P. 397-403

9. Lan, L.P. Xiang, J.H. He, L.G. Deformation characteristics of diesel engine cylinder liner under pretightening condition, Neiranji Xuebao/Transactions of CSICE (Chinese Society for Internal Combustion Engines), Volume 33, Issue 6, 25 December 2015, P. 555-561

10. Xiang R., Bi Y., Lei J., Song G., Shen L., Xu Y., Study on influencing factors to the cylinder liner pre-tightening deformation of turbocharged inter-cooled diesel engine, Jixie Qiangdu/Journal of Mechanical Strength, Volume 37, Issue 4, 15 August 2015, P. 682-688

11. Guan L., Zeng Q., Liu B., Hu T.G., Zhan Z.S., Simulation and test comparison for internal combustion engine cylinder liner deformation, Neiranji Xuebao/Transactions of CSICE (Chinese Society for Internal Combustion Engines), Volume 31, Issue 5, September 2013, P. 473-479

12. Ma Q.Z., Jiang, S.L., Guo C.H., Yao X.L., Gu Q., Dong B., Ye Q., Analysis of deformation of cylinder liner of YZ4DE

diesel engine based on finite element method, Neiranji Gongcheng/Chinese Internal Combustion Engine Engineering, Volume 29, Issue 4, August 2008, P. 59-62

13. Fujimoto H., Yoshihara Y., Goto T., Furuhashi S., Measurement of cylinder bore deformation during actual operating engines, SAE Technical Papers 1991 International Congress and Exposition; Detroit, MI; United States; 25 February 1991 до 1 March 1991;

14. Bulatov V.P., Bochkarev V.N., Yakhyaev N.Ya, Evaluation of assembly deformations of cylinder liners for small diesel engines, Strength of Materials, Volume 20, Issue 6, June 1988, Pages 826-831

15. Liang X., Wang Y., Huang S., Yang G., Tang L., Cui G., Investigation on Cylinder Bore Deformation under Static Condition Based on Fourier Decomposition, SAE Technical Papers, Volume 2017-March, Issue March, 28 March 2017 SAE World Congress Experience, WCX 2017; Cobo Center Detroit; United States; 4 April 2017 до 6 April 2017;

16. Bi Y.H., Xiang R., Lei J.L., Shen L.Z., Zhang N., Song G.F., Study on deformation of diesel engine cylinder liner under different loads, Neiranji Gongcheng/Chinese Internal Combustion Engine Engineering, Volume 36, Issue 3, 15 June 2015, Pages 130-1391. Smith J, Jones M Jr, Houghton L et al (1999) Future of health insurance. N Engl J Med 341, P.325-329

17. Яхьяев Н.Я. Комплексный метод анализа геометрической точности цилиндров в процессе сборки судовых малоразмерных дизелей / Н.Я. Яхьяев, Н.М. Вагабов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2009. – №1. – С. 256-261.

18. Вагабов Н.М. Способ уменьшения сборочных деформаций втулок цилиндров (вц) путем исправления погрешностей формы базовых поверхностей поясков блок-картера / Н.М. Вагабов, М.Г. Вердиев, Т.Э.Сакратов // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2011– №21. –С. 88-91.

19. Дизели с воздушным охлаждением Владимирского тракторного завода /В.В. Эфрос [и др.]. – М.: Машиностроение, 1976. – 277 с.

20. ГОСТ 1497-84 "Металлы. Методы испытаний на растяжение"

21. Engineering Simulation & 3D Design Software ANSYS. Электронный ресурс, режим доступа <https://www.ansys.com/>

22. Биргер И.А. Резьбовые и фланцевые соединения / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.

Computational and Experimental Studies of Deformations of Air-cooled diesel cylinders at its Assembling

Agureev I., Platonov K., Khmelev R.

Tula State University

Tula, Russia

agureev-igor@yandex.ru, k.j.platonov@mail.ru, aiah@yandex.ru

Abstract. The dependences of deformations of the working surface of the cylinders of diesel engines with air cooling on the action of the mounting forces are obtained. The influence of mechanical properties of the cylinder material and its design parameters on the character of deformation is studied.

Keywords: diesel; cylinder; air cooling; deformation; mathematical modeling.

Влияние термической обработки на структурные и упругие характеристики однокомпонентного абразивного инструмента

Полянчикова М.Ю.

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Волгоград, Россия

MUPolyan4ikova@yandex.ru

Аннотация. На финишных операциях обработки высокоответственных деталей (внутренние дорожки подшипников качения, гильзы цилиндров двигателей и т.п.) чаще всего применяется абразивный инструмент. По результатам многочисленных исследований доказано влияние размеров абразивных зерен на состояние поверхностного слоя ответственных деталей и, как следствие, износостойкость последних. Многочисленными исследованиями автора доказана эффективность применения абразивного инструмента без связки (ОКАИ) при обработке таких ответственных деталей, как отверстия гильз цилиндров. В настоящий момент проводятся исследования по влиянию режимов производства рассматриваемого абразивного инструмента без связки на его свойства. В статье представлены результаты исследования упругих свойств абразивного инструмента без связки после спекания, использована методика определения модуля нормальной упругости и пористости на основе теоретико-экспериментальных данных, приведены зависимости модуля нормальной упругости от пористости и экспериментальные формулы, отражающие эти зависимости. На основании экспериментальных и расчетных данных по величине модуля нормальной упругости в зависимости от температуры спекания и размера абразивных зерен исходной абразивной смеси определены эмпирические зависимости упругих характеристик в целях прогнозирования получения инструмента без связки с заранее определенными свойствами.

Ключевые слова: абразивный инструмент, модуль нормальной упругости, процесс спекания абразивного инструмента, пористость.

ВВЕДЕНИЕ

Финишные операции, по данным, приведенным в [17], оказывают значительное влияние на формирование свойств поверхностного слоя детали. В значительной мере эти свойства зависят от режима обработки и характеристик абразивного инструмента, используемого на финишных операциях, в том числе, от его зернистости и структуры [12, 13]. В большей степени структура стандартного абразивного инструмента определяется распределением размеров зерен, количеством пор и структурой связки [14].

Получение однокомпонентного абразивного инструмента (далее – ОКАИ), не содержащего в своем составе каких-либо компонентов связки и получаемого из абразивной смеси электрокорунда белого и карбида бора [1], относится к порошковой металлургии и заключается в прессовании и дальнейшем спекании при высокой температуре.

Только после спекания инструмент получает необходимую прочность, структурные и упругие характеристики –

пористость и модуль нормальной упругости, которые, считаясь структурно-нечувствительными, глубоко связаны структурно-нечувствительными, глубоко связаны с природой сил сцепления и другими структурными особенностями пористого хрупкого тела (характер связей, кристаллическое строение и др.).

Поэтому изучение упругой области деформирования имеет большое практическое значение для хрупких составов тел в условиях обработки и эксплуатации.

Важность изучения упругой деформации обусловлена еще и тем, что именно с неё начинается процесс деформирования и разрушения. [2]

В статье представлены результаты исследования упругих свойств абразивного инструмента без связки (ОКАИ) после спекания.

ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ОДНОКОМПОНЕНТНОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИИ

При изготовлении однокомпонентных абразивных инструментов [3] задача по обеспечению равномерности распределения абразивных зерен и пор является одной из главных задач при формировании их структуры на этапе приготовления абразивной смеси. Но если при создании формовочной смеси для изготовления стандартного абразивного инструмента достаточно только тщательного перемешивания всех составляющих, то изготовление ОКАИ имеет ряд особенностей. Как правило, распределение абразивных зерен по размерам не рассматривается, так как оно обычно соответствует стандарту [14]. Тем не менее, распределение по размеру абразивных зерен и соответствующее распределение по размерам пор внутри инструмента являются важными для ОКАИ, получаемого при ударно-волновом прессовании. [1]

Распределение по размеру абразивных зерен после ударно-волнового прессования соответствует асимметричному β -распределению. Неоднородность в распределении пор по размерам по объему инструмента составляет 20%. Это оказывает существенное влияние на производительность инструмента, так как на его рабочей поверхности появляются поры разного размера, что приводит к снижению режущей способности инструмента. Таким образом, на рабочей поверхности инструмента случайным образом появляются режущие и нережущие грани. Это ухудшает качество поверхности обрабатываемой детали.

Равномерный сьем металла может быть обеспечен только за счет более равномерного распределения по раз-

меру абразивных зерен и пор внутри инструмента. Исследования показывают, что это возможно, если добавить некоторое количество карбида бора в абразивный порошок электрокорунда белого, где размер зерна карбида бора составляет 30-50% от размера зерна Al_2O_3 . Поскольку микротвердость карбида бора почти в два раза выше, чем у электрокорунда белого, более крупные зерна электрокорунда подвергаются дальнейшему измельчению при динамическом нагружении ударной волной. Это приводит к более равномерному распределению по размеру зерен электрокорунда и, соответственно, к более равномерному распределению по размеру пор внутри инструмента. Поскольку температурный предел стабильности карбида бора примерно вдвое меньше, чем у электрокорунда белого, карбид бора создает поры при спекании абразива (которое проводится при температуре 1700 - 1900 °С).

Прессование смеси абразивных порошков проводили по схеме, представленной на рис. 1.

Исследования проводились на электрогидравлической установке Т-1226. После накопления электрической энергии в конденсаторах емкостью 200 мкФ при напряжении 10 кВ с помощью двух электродов 2 и 4 (корпус разрядной камеры) в водяной ванне 6 образовывалась электрическая дуга, что приводило к мгновенному формированию газового пузыря, при исчезновении которого образовывалась ударная волна. Последняя действовала на плиту 7, пуансон 1 и через ударник 8 на абразивную формовочную смесь 11, состоящую из 90% порошка окиси алюминия (Al_2O_3) и 10% карбида бора (B_4C) и используемую при изготовлении ОКАИ по способу [3].

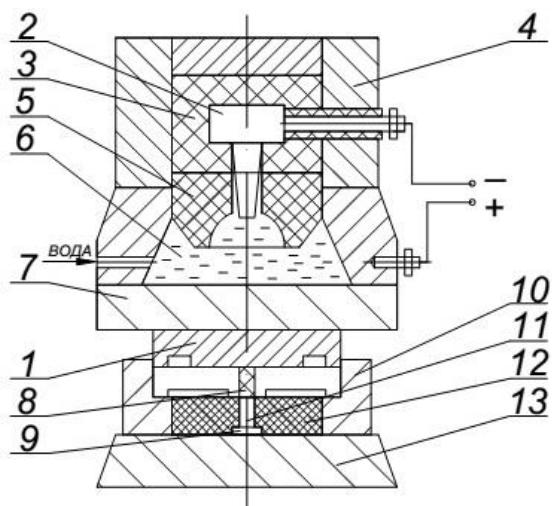


Рис. 1. Схема взрывного прессования однокомпонентного абразивного инструмента: 1 – пуансон; 2 – катод; 3, 5 – изоляторы; 4 – корпус взрывной (разрядной) камеры; 6 – вода; 7 – плита; 8 – ударник; 9 – планка опорная; 10 – корпус пресс-формы; 11 – прессуемый абразивный порошок; 12 – матрица; 13 – стол пресса

Известно, упругость – это свойство тел изменять форму и размеры под действием нагрузок и самопроизвольно восстанавливать исходную конфигурацию при прекращении воздействия внешних нагрузок. Упругость тел обусловлена силами взаимодействия атомов, из которых они построены.

Под действием внешних напряжений атомы смещаются из своих равновесных положений, что сопровождается увеличением потенциальной энергии тела на величину, равную работе внешних напряжений по изменению формы тела. После снятия внешних напряжений конфигурация упруго деформированного тела с неравновесными межатомными расстояниями оказывается неустойчивой и самопроизвольно возвращается в равновесное состояние. Запасенная в теле избыточная потенциальная энергия превращается в кинетическую энергию колеблющихся атомов т.е. в теплоту.

В настоящей работе приведены результаты исследования структурных и упругих характеристик инструмента ОКАИ, в том числе, плотности, пористости и модуля нормальной упругости в зависимости от пористости абразивного инструмента после прессования и спекания исследуемой абразивной смеси, содержащей 90% окиси алюминия (Al_2O_3) и 10% карбида бора (B_4C) для получения ОКАИ по патенту [1] и подробно описанному в материалах публикаций [20, 21].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОКОМПОНЕНТНОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Величину модуля нормальной упругости, по мнению ряда ученых [2, 18, 19], можно рассматривать как характеристику упругого сопротивления или упругой прочности материала, т.е. как характеристику интенсивности нарастания напряжения с увеличением удлинения. Чем больше модуль нормальной упругости, тем сильнее возрастают напряжения с ростом упругой деформации.

Френкель Я.И. [2] рассматривал этап спекания как слияние капель, при котором промежутки между частицами заплывают настолько, что оставшиеся поры оказываются разобщенными. Последующий этап спекания сводится к закрытию «заплыванию» остаточных, не сообщающихся друг с другом пор.

Существующие объяснения процессов соединения материалов в твердой фазе основываются или на представлениях о необходимости увеличения энергии поверхностных атомов, участвующих во взаимодействии, или на представлениях о возможности взаимодействия только по ювенильным поверхностям, образующимся после удаления окисных пленок, или на представлениях об определяющей роли диффузии [4]. Все гипотезы можно разбить на две группы: первая объясняет образование соединения разнородных материалов за счет схватывания как следствие межатомных сил взаимодействия. Схватывание - процесс бездиффузионный, после него возможны диффузионные процессы. Если при соединении в зоне контакта образуются ювенильные поверхности, то их активности достаточно, чтобы произошло схватывание. Процесс соединения сводится к «сшиванию» контактных поверхностей, образованию связей между атомами, принадлежащими различным поверхностям [5].

При исследовании процесса спекания обычно рассматривают действие следующих механизмов: а) без переноса материала (путем сцепления); б) с переносом материала на значительные расстояния путем перемещения элементов решетки (поверхностная и объемная диффузия по дефектам, через решетку и по границам зерен, испарение и конденсация) или перемещение всей решетки (пластическое

течение, скольжение по границам зерен); в) с переносом материала в пределах межзатомных расстояний (возврат и рекристаллизация).

Вследствие пластической деформации при прессовании порошков поверхности контактирующих зерен достаточно сближаются, поверхностные пленки многократно разрываются и их изолирующее действие в значительной степени устраняется. Поэтому главным становится геометрический фактор сближения.

Исследованиями Андриевского Р. А. [6] также доказано, что при спекании порошков окиси алюминия преобладающим является механизм самодиффузии. На начальной стадии спекания определяющим является рост зон контакта, на более поздней стадии формируется замкнутая пористость. Кучинский Г. С. распространил теорию объемной диффузии так же на поздние стадии спекания.

В своей работе [6] он рассмотрел влияние границ зерен на процесс спекания, особенно на конечной стадии исчезновения пор. При этом он оценивает скорость исчезновения пор из поликристаллического спеченного тела, опираясь на два механизма: только диффузии по границам зерен и объемной диффузии вакансий (по достижении границ зерен вакансии выводятся из тела на ее поверхности). Лимитирующим звеном здесь является объемная диффузия как наиболее медленная. Пора рассматривается как место скопления вакансий, механизм становится наглядным при рассмотрении вакансий как диффундирующих единиц, замещаемых атомами с учетом градиента концентраций дырок от поры в глубь материала [7].

На рис.2 представлены зависимости плотности инструмента ОКАИ от температуры спекания

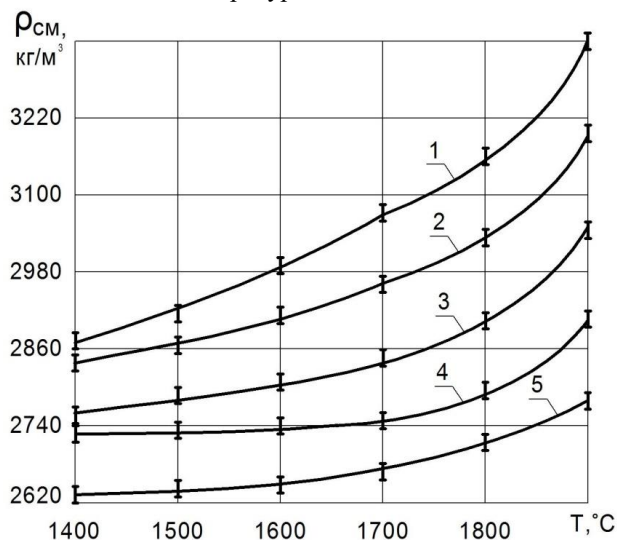


Рис. 2. Влияние температуры спекания (Т, °С) на плотность (ρ, кг/м³) инструмента ОКАИ для исходного размера Al_2O_3 : 1 – 100 мкм; 2 – 200 мкм; 3- 320 мкм; 4 – 400 мкм; 5 – 500 мкм

Полученные с использованием [8] зависимости имеют следующий вид:

исходный размер зерен Al_2O_3 – 100 мкм:

$$\rho = 46,1 \cdot T^{0,564} \quad (1)$$

исходный размер зерен Al_2O_3 – 200 мкм:

$$\rho = 180,8 \cdot T^{0,376} \quad (2)$$

исходный размер зерен Al_2O_3 – 320 мкм:

$$\rho = 217,4 \cdot T^{0,346} \quad (3)$$

исходный размер зерен Al_2O_3 – 400 мкм:

$$\rho = 547,6 \cdot T^{0,218} \quad (4)$$

исходный размер зерен Al_2O_3 – 500 мкм:

$$\rho = 716,6 \cdot T^{0,18} \quad (5)$$

В результате спекания карбида бора выгорает уже при температуре 700-800°С [6], оставляя в абразивном теле мелкие поры, которые с повышением температуры спекания «залечиваются», закрываются.

В результате пористое тело местами становится сплошным.

Следующим этапом исследований является определение пористости спеченных абразивных тел. Эту величину определяем по [9, 16], используя зависимость (6):

$$\Pi = \frac{\rho_{ч.в.} - \rho_{п.т.}}{\rho_{ч.в.}} \quad (6)$$

где $\rho_{ч.в.}$ – плотность чистого вещества Al_2O_3 , кг/м³; $\rho_{п.т.} = 3900 \frac{кг}{м^3}$; $\rho_{п.т.}$ – плотность пористого тела, кг/м³.

По формуле, представленной в [10], можно определить значение модуля нормальной упругости по значениям пористости:

$$\frac{E}{E_n} = 1 - \frac{15(1-\mu)\Pi}{(7-5\mu)+2(4-5\mu)\Pi} \quad (7)$$

где E_n – модуль нормальной упругости пористого тела, ГПа; Π – пористость; E – модуль нормальной упругости чистого вещества, ГПа; μ – коэффициент Пуассона ($\mu=0,23$).

На рис. 3. представлены зависимости модуля нормальной упругости от пористости ОКАИ.

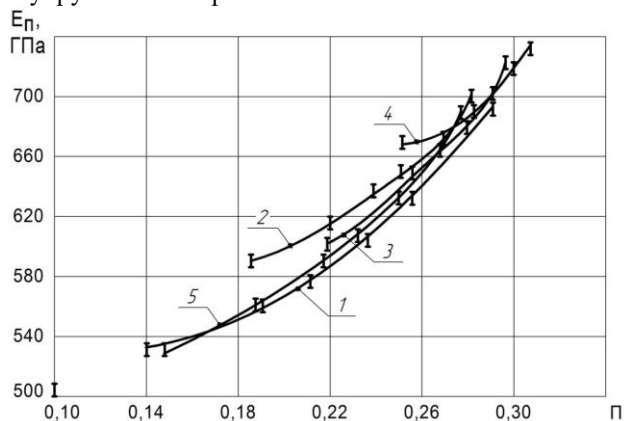


Рис. 3. Графическое выражение зависимости модуля нормальной упругости (E_n) от пористости (Π) после спекания при исходном размере зерен Al_2O_3 : 1 – 100 мкм; 2 – 200 мкм; 3- 320 мкм; 4 – 400 мкм; 5 – 500 мкм

После обработки расчетных графиков по методике [8] и с учетом положений [15] были получены аналитические зависимости:

для размера зерен Al_2O_3 100 мкм:

$$E_n = 1166 \cdot \Pi^{0,412} \quad (10)$$

для размера зерен Al_2O_3 200 мкм:

$$E_n = 1256 \cdot \Pi^{0,462} \quad (11)$$

для размера зерен Al_2O_3 320 мкм:

$$E_n = 1383 \cdot \Pi^{0,534} \quad (12)$$

для размера зерен Al_2O_3 400 мкм:

$$E_n = 1465 \cdot \Pi^{0,577} \quad (13)$$

для размера зерен Al_2O_3 500 мкм:

$$E_n = 1164 \cdot \Pi^{0,41} \quad (14)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Формирование пористого абразивного тела при спекании приводит к «залечиванию», т.е. зарастанию очень мелких пор и образованию большого количества мостиков связи между абразивными зернами Al_2O_3 , что способствует повышению упругих свойств пористого тела.

Практическое значение упругих свойств материалов велико. Для предупреждения потери устойчивости следует стремиться применять материалы с высоким значением модуля нормальной упругости. Материалы с пониженным его значением за счет накопления (при работе) большого запаса упругой энергии имеют большую скорость развития микротрещин, что является их недостатком. [11]

Прессовка имеет незначительную прочность за счет адгезионных и когезионных сил межатомного взаимодействия и поэтому на этапе спекания инструмент приобретает окончательные упругие характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полянчиков Ю.Н., Полянчикова М.Ю., Кожевникова А.А., Емельяненко А.А., Ангеловская Н.В., Крайнев Д.В. Способ изготовления абразивных изделий // Патент России № 2293013. 2007. Бюл. № 4.
2. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
3. Полянчиков Ю.Н., Полянчикова М. Ю. Способ изготовления абразивных изделий // Патент России № 2543024. 2015. Бюл. № 6.
4. Гегузин Я.Е. Физика спекания. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 312 с.
5. Полянчикова М.Ю. Повышение качества однокомпонентных абразивных и алмазных инструментов, полученных ударно-волновым прессованием: монография / М.Ю. Полянчикова, Ю.Н. Полянчиков. – Волгоград, ИУНЛ ВолгГТУ, 2016. – 228с.
6. Андриевский Р.А. Фазы внедрения / Р.А. Андриевский, Я.С. Уманский. – М.: Наука, 1977. – 240 с.
7. Kuczynski G. Phys. of Sintering – 1973., Vol.5, №2/2. – P. 41-50.
8. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1982. – 224 с.
9. ГОСТ 2409 – 95 (ИСО 5017 – 88). Межгосударственный стандарт. Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Минск, 2002. – 6 с.
10. Hashin Z. Relations Between Young's modulus and temperature. // J. Appl. Mech. – 1962. – Vol. 29. – P. 143-147.
11. Солоненко В. Г. О единой теории изнашивания режущих инструментов / Солоненко В. Г., Зарецкий Г. А., Кривонос Е. А. // СТИН. – 2007. – № 4. – С. 7–11.
12. Шумячер В.М. Физико-химические процессы при финишной абразивной обработке: монография // ВолгГАСУ. Волгоград, 2004. – 161 с.
13. Митрофанов А.П. Исследование физико-химических процессов протекающих при взаимодействии нержавеющей стали с элементами внешней среды используемой для импрегнирования абразивного инструмента / А.П. Митрофанов, А.А. Крутикова, К.А. Паршева // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т.4, №3. – С. 46-49.
14. ГОСТ Р 52381-2005. Национальный стандарт. Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава. Москва: Стандартинформ, 2006. – 15с.
15. ГОСТ Р 50779.10-2000 (ИСО 3534.1-93). Национальный стандарт. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 47 с.
16. Свойства элементов: Справ. изд. / под ред. Дрица М.Е., М.: – Металлургия, 1985. – 672с.
17. Безъязычный В.Ф. Проблемы совершенствования технологических процессов механической обработки деталей высокоточных узлов и изделий // Приложение. Справочник. Инженерный журнал. – 2003. –№ 7. – С. 2-11.
18. Shumyacher V.M. Energy Efficient Technology of Obtaining Advanced Composite Grinding Materials and Tools in "Silicon Carbide – Corundum" System from Aluminium Containing Residual Products / V.M. Shumyacher, O.I. Pushkarev, A.V. Slavin // Procedia Engineering. – 2017. –Vol. 206. – P. 228–231.
19. Kryukov, S.A. Phenomenological Model of Abrasive Tool Components Mixing Process / S.A. Kryukov, M.A. Tkach // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 200–203.
20. New single-component abrasive tool / Yu.N. Ppolyanchikov, A.L. Plotnikov, M.Yu. Polyanchikova, A.I. Jurchenko, O.A. Kursin // Russian Engineering Research. –2009. – Vol. 29, № 3. – P. 310.
21. Polyanchikov Yu.N. Particulars of Ceramic Article Fabrication by Impact Pressing / Yu.N. Ppolyanchikov, A.L. Plotnikov, M.Yu. Polyanchikova // Glass and Ceramics, 2014, Vol. 71, No. 5-6 (September). – P. 180 – 181.

The heat Treatment Effect on the Structural and Elastic Characteristics of a Single-component Abrasive Tool

Polyanchikova M. Yu.
“Volgograd State Technical University”
Volgograd, Russia
MUPolyan4ikova@yandex.ru

Abstract. At the finishing operations of processing high-quality parts (internal tracks of rolling bearings, engine cylinder liners, etc.), abrasive tools are most often used. According to the results of numerous studies, the effect of abrasive grains size on the surface layer of the critical parts state and, as a result, the wear resistance of the latter has been proved. Numerous studies of the author proved the effectiveness of abrasive tools without ligaments (SCAT) use in the processing of such critical parts as the holes of cylinder liners. Currently, research is being conducted on the effect of the under consideration bondless single-component abrasive tool production modes on its properties. The article presents the results of a research study of elastic properties of a bondless single-component abrasive tool after sintering; the method of determining the modulus of elongation and porosity based on theo-

retical and experimental data has been used; the dependency between the modulus of elongation and porosity, as well as experimental formulas indicating these dependencies are presented. Based on the experimental and calculated data on the magnitude of the modulus of elongation, depending on the sintering temperature and the size of the abrasive grains in the initial abrasive compound, empirical dependencies of the elastic characteristics have been determined in order to predict the production of a bondless tool with predetermined properties.

Keywords: abrasive tool, modulus of elongation, sintering process of an abrasive tool, porosity.

Исследование операции зубохонингования ведущих зубчатых колес с расчетно-экспериментальной оценкой характеристик

Караванова А.Г., Калашников А.С.

Московский политехнический университет

Москва, Россия

geartechniid@yandex.ru, alexandr_kalashnikov45@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрен процесс зубохонингования зубчатых колес 2 различными методами обработки. Один состоит из электрокорунда нормального, электрокорунда белого и карбида кремния зеленого зернистостью 4,6,12. Другой состоит из абразивных материалов (электрокорунда хромистого с добавкой оксида хрома с размером зерна 10мкм), полиэтиленполиамида и эпоксидной смолы в качестве связующего. Разработана технологическая модель скрещивания хона с инструментом. Выявлено качество изготовления зубчатых колес за счет определения шероховатости поверхности и накопленных погрешностей зубчатых колес. Поскольку в расчетах фактического давления в контакте деталей с шероховатыми поверхностями будут использованы характеристики топографии поверхностей, потребуется также метод преобразования данных по обработке профилей шероховатых поверхностей в направлении эвольвенты зуба и перпендикулярно ему в характеристики топографии этих шероховатых поверхностей. Для обеспечения экспериментальных исследований были выполнены и разработаны управляющие программы для станков и приборов, на которых производится обработка и анализ точности (макрогеометрических характеристик) и шероховатости (микрогеометрических характеристик) поверхности зубьев экспериментальных деталей, подготовлен правящий и обрабатывающий инструмент (хон и шевер). Смонтирована на передней и задней бабках станка оснастка для обрабатываемой детали, правящего алмазного колеса и правящего алмазного ролика, установлены правящий и обрабатывающий инструмент (хон). Выполнена предварительная правка абразивного хона, топографии этих шероховатых поверхностей.

Ключевые слова: зубохонингование, скорость резания, фланкирование, шевер и хон, шероховатость поверхности, шаговые параметры, накопленные погрешности.

ВВЕДЕНИЕ

Зубохонингование – это чистовая или суперфинишная обработка зубчатых колес. Процесс абразивной обработки, позволяющий получить повышенный класс чистоты поверхности, снижение уровня остаточных поверхностных напряжений на деталях и возможность снизить погрешности операций. Методом обката на скрещенных осях, инструментом со связкой из эпоксидных смол с зерном. За счет скрещивания осей инструмента – хона с шестерней происходит модификация фланга с помощью сферической кинематики боковой поверхности шестерни.

Введение в процесс суперфинишной операции «зубохонингование» направлено для повышения качества поверхностного слоя зубьев за счет удаления дефектного слоя, обрабатываемого при шлифовании зубьев.

Повышение контактной прочности за счет улучшения характеристик контактирующих поверхностей зубчатых передач. Микрогеометрия, зависящая от вида финишной обработки, которая влияет на такие критерии например питтингостойкость, задиростойкость, износостойкость, КПД зубчатой передачи.

ПРОЦЕСС ЗУБОХОНИГОВАНИЕ

В промышленности применяют два метода зубохонингования: инструментом который называется «шевер» с внешним зацеплением и инструмент «хон» с внутренним зацеплением зубьев[1]:

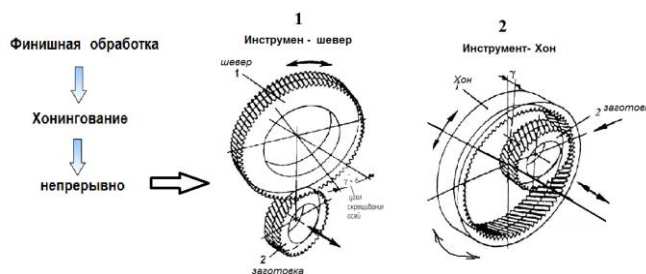
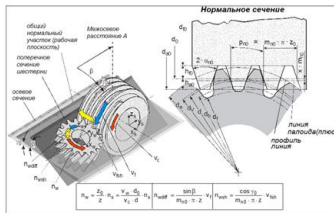


Рис.1. Методы хонингование

1) Зубохонингование шеверами с внешним зацеплением состоит из эпоксидной смолы, полиэтиленполиамид и абразивные материалы которые состоит из: электрокорунд нормальный, электрокорунд белый и карбид кремния зеленый с зернистостью 6,12,4. [2]: Имеется следующие режимы: 100-600 об/мин, скорость подачи стола 100-200 мм/мин, число ходов стола 1-6, время обработки 20-60. На 6 раз обработки зубчатых колес хон самозатачивается.

2) Зубохонингование хонами с внутренним зацеплением обладает большими технологическими возможностями, поэтому этот процесс имеет преимущественное распространение в промышленности. Хон состоит из эпоксидной смолы, полиэтиленполиамид и абразивные материалы которые состоит из [4]: электрокорунд хромистый с добавкой оксида хрома с размером зерна 10мкм. Имеется следующие режимы: 1000-5000 об/мин, скорость подачи стола 1000-2000 мм/мин, число ходов стола 1-3, время 10-30.

Хон имеет следующие геометрические параметры - $z = 95$, $\alpha = 25^\circ$, $B = 33\text{мм}$, $D=400\text{мм}$, $\beta=15^\circ$. Преимущество оборудования инструментом хон [3]: в отличие от инструмента шевера является наличие дополнительных осей скрещивания хона с заготовкой.



- > Внутренний срезание хона и заготовки геометрически неопределенной режущей кромкой используется для фланга
- > ось срезывания
- > низкие скорости резания, примерно 0,5 - 5 м / с
- > различные условия резания по высоте зуба
- > Структура поверхности в направлении профиля и линии
- > хорошее снижение шума при приложении, выходящие остаточные напряжения деталей



Рис.2. Углы скрещивания хона с заготовкой и особенности процесса зубохонингования

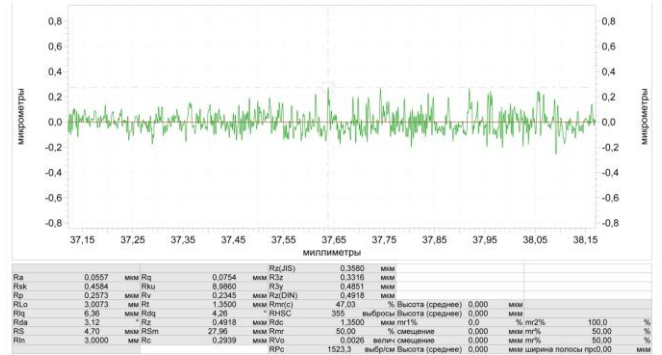


Рис. 6. Профилограмма шероховатости поверхности вдоль линии зуба при обработке детали с помощью хона

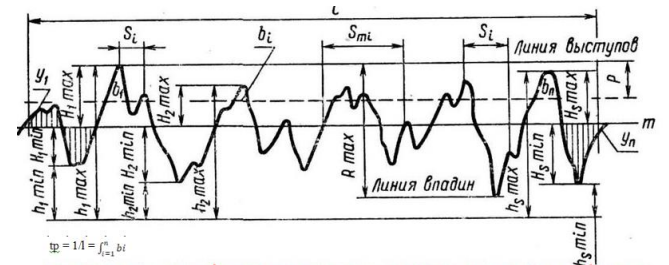
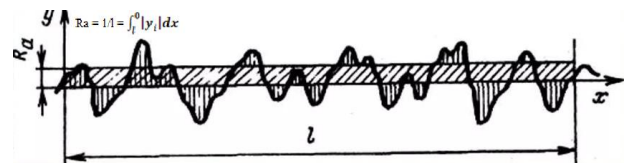


Рис.7. Точность зубчатых венцов оценивается в соответствии с ГОСТ 1643 – 82 «Передачи зубчатые. Цилиндрические. Допуски» по нормам: Кинематической точности и плавности работы

l — базовая длина = 0,08 мм; l — базовая длина = 0,25 мм; m — средняя линия профиля; S_{mi} — средний шаг неровностей профиля; S_i — средний шаг местных выступов; H_{1max} — отклонение пяти наибольших максимумов профиля; H_{1min} — отклонение пяти наибольших минимумов профиля; $h_i \max$ — расстояние от высших точек пяти наибольших максимумов до линии, параллельной средней и не пересекающей профиль; $h_i \min$ — расстояние от низших точек пяти наибольших минимумов до линии, параллельной средней и не пересекающей профиль; $R_z = R_{max}$ — наибольшая высота профиля; y_i — отклонения профиля от линии m ; p — уровень сечения профиля; b_n — длина отрезков, отсекаемых на уровне. Шаговые параметры: S_m — средний шаг неровностей; S — средний шаг местных выступов профиля; tr — относительная опорная длина профиля, где p — значения уровня сечений профиля из ряда 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 %.



Высотные параметры: ГОСТ 2789-73. 1.1 и 1.2 – шероховатость поверхности детали при зубохонинговании шевром. Определение шероховатости поверхности детали при зубохонинговании хонном.

R_a — среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины.

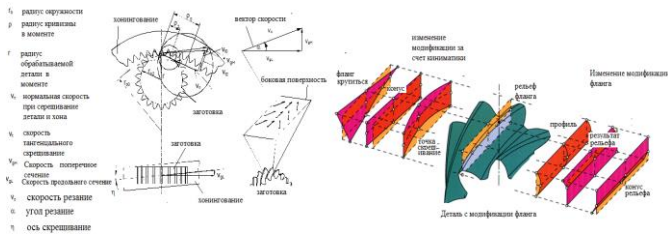


Рис. 3. Геометрия и кинематика с фланкированием и скрещивание хона с деталью при хонинговании зубчатых колес: V – скорость резания; t_f – съём; S_m – осевая подача; t – припуск; V_d – скорость вращения детали; V_h – скорость вращения хона

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОТРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

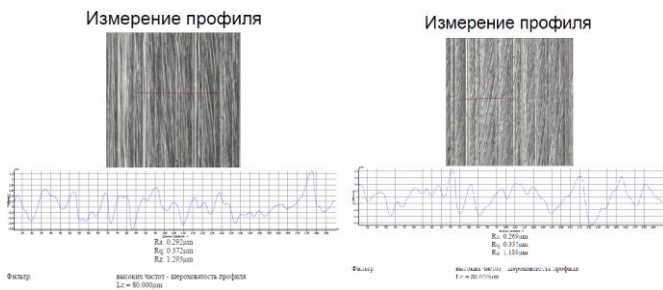


Рис.4. Шероховатость поверхности детали при зубохонинговании с помощью шевира

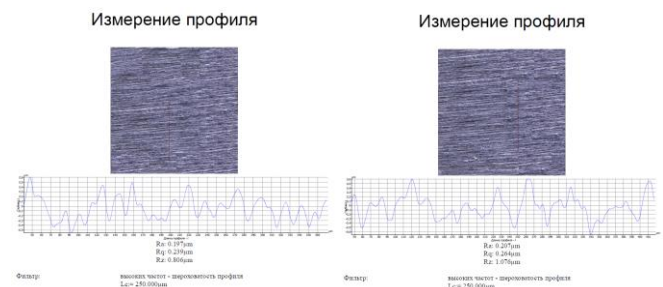


Рис.5. Шероховатость поверхности детали при зубохонинговании с помощью хона

Исходя ГОСТ 2789-73 и ИСО 3274 были рассчитаны параметры шероховатости для класса шероховатости которое нужно для производства и изготовления зубчатых колес.

Для точного измерения определяем требуемый класс шероховатости т.е округляем до максимального значения .

1.1) $Ra = 0,29 \approx 0,3$; 1.2) $Ra = 0,269 \approx 0,3$;
2.1) $Ra = 0,197 \approx 0,2$; 2.2) $Ra = 0,207 \approx 0,2$; 2.3) $Ra = 0,0557 \approx 0,1$

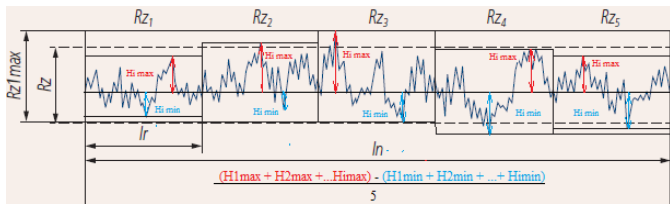


Рис. 8. Rz

Rz — сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины;

1.1) $Rz = 1,293 \approx 1,3$; 1.2) $Rz = 1,189 \approx 1,2$; 2.1) $Rz = 0,806 \approx 0,8$ 2.2) $Rz = 1,079 \approx 1$; 2.3) $Rz = 0,4918 \approx 1$;

Ra , Rz и R_{max} определяются на базовой длине l , которая может принимать значения из ряда 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; 0,80; 2,5; 8; 25 мм. Параметр Ra является предпочтительным.

Rq — средняя шероховатость (Рис. 9 – Rq)

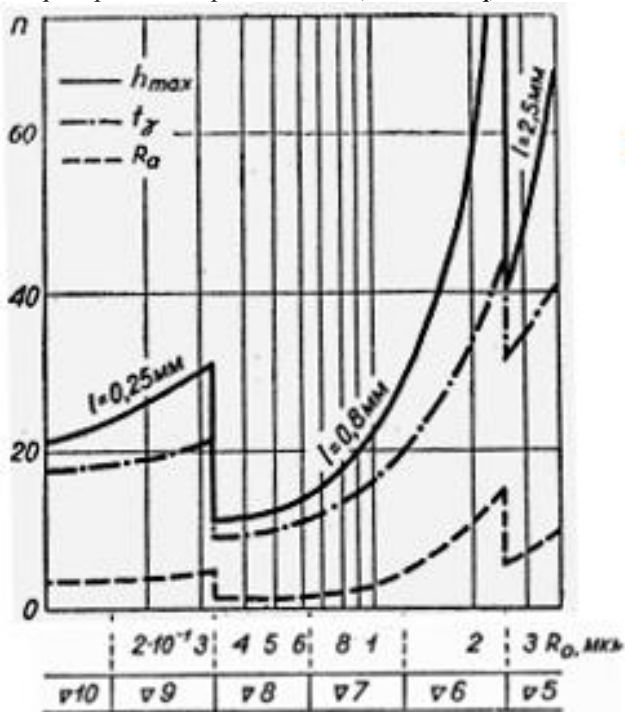


Рис. 9. Оценка точности определения параметров

Rq обычно на 11% выше, чем Ra и более чувствительны к пикам и долям, чем Ra , так как амплитуды являются квадрат. Rq используется для управления самостоятельными поверхностями в научных измерениях и статических оценках. 1.1) $Rq = 0,372 \approx 0,4$; 1.2) $Rq = 0,335 \approx 0,3$; 2.1) $Rq = 0,239 \approx 0,2$; 2.2) $Rq = 0,262 \approx 0,3$; 2.3) $Rq = 0,0754 \approx 0,1$; Швером $Rq = 0,4-0,3$; Хон $Rq = 0,2-0,3$.

Таблица 1

| Шероховатость | Инструмент | |
|---------------|------------|---------------|
| | Швер | Хон |
| Ra | 0,3 | 0,2; 0,1 |
| Rq | 0,4; 0,3 | 0,2; 0,3; 0,1 |

| Шероховатость | Инструмент | |
|---------------|------------|-----------|
| | Швер | Хон |
| Rz | 1,3; 1,2 | 0,8; 1; 1 |

РАСЧЕТ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ R_{ai} , T_{γ} , H_{MAX} .

Определяются значения R_{ai} . Если значения R_{ai} соответствуют классу шероховатости, для которого стандартом или техническими требованиями регламентирована другая базовая длина l , действия, описанные в пунктах 3 и 4, необходимо повторять снова при новой базовой длине.

Подсчитываются числа нулей (пересечений профиля со средней линией) $n_i(0)$ на единицу длины базовой линии l , числа максимумов m_i на единицу длины базовой линии l , вычисляются средний шаг неровностей профиля S_{mi} на базовой длине l и средний шаг местных выступов профиля S_i на базовой длине l .

Определяются средние значения параметров для всей трассы:

$$R_a = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R_{ai} \quad n_i(0) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k n_i(0) \quad m = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k m_i$$

$$S_m = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p S_{mij}, \quad S = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q S_{ij}$$

где R_{ai} , $n_i(0)$, m_i , $S_{mi} = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p S_{mij}$, $S_i = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q S_{ij}$ значения

R_a , $n(0)$, m , S_m и S , определенные на отдельных базовых длинах; p – число шагов при вычислении среднего шага неровностей профиля на i -той базовой длине; q – число шагов при вычислении среднего шага местных выступов профиля на i -той базовой длине, k – число базовых длин.

Данная процедура усреднения справедлива, если поверхность однородна по шероховатости, т. е. ее параметры в выбранном направлении примерно одинаковы. Если шероховатость неоднородна, то трассы длиной L проводятся на различных участках поверхности и значения параметров усредняются как по длине трассы, так и по участкам поверхности.

Оценивается точность определения параметров

а) рассчитывается $\lambda = \frac{n(0)}{m}$;

б) выбирается вид корреляционной функции; для инженерных исследований желательно придерживаться функции первого типа $\rho(\tau) = \exp(-\alpha\tau^2)$, для которой $\alpha = \pi^2 E^2(0)/2$;

в) для приведенной в п. б) корреляционной функции определяется интервал корреляции $\tau_k = \frac{1}{\sqrt{2\pi E\{n(0)\}}}$;

($\rho(\tau_k) \leq 0,05$).

з) по известным L и τ_k вычисляется величина относительной погрешности ϵ для параметров R_a , $n(0)$, m , t_{γ} , R_{max} (h_{max}) или r_{cp} по формулам и значениям таблиц 1.

Величина β и соответствующее ей значение t_{β} , принимаются или задаются в технических требованиях к измерению;

д) полученное значение ϵ сравнивается с заданным значением.

Зависимости вычислены для относительной точности $\varepsilon = 0,1$, доверительной вероятности $\beta = 0,9$, относительного уровня сближения $\gamma = 0,75$

Если найденная относительная погрешность ε слишком велика, L - длина трассы исправляется согласно зависимостям, приведенным в табл. 1 и 2, проводится добавочное снятие профилограммы с повторением действий.

Таблица 2

Основные зависимости для параметров R_a , $n(0)$, m , t_u , R_{max} (h_{max}), S_m , S и r_{cp} при корреляционной функции вида $\rho(\tau) = \exp(-\alpha\tau^2)$

| Параметр | Шероховатость поверхности | | |
|------------|--|--|---|
| | Математическое ожидание | Дисперсия | Число измерений |
| R_a | $E\{R_a\} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma$ | $D\{R_a\} = \frac{\sigma^2}{L\sqrt{2\alpha\pi}}$ | $n_{R_a} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{t_\beta^2}{\varepsilon^2} \cdot \frac{\tau_k}{L}$ |
| $n(0)$ | $E\{n(0)\} = \frac{\sqrt{2\alpha}}{\pi}$ | $D\{n(0)\} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}$ | $n_{n(0)} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{t_\beta^2}{\varepsilon^2} \cdot \frac{\tau_k}{L}$ |
| m | $E\{m\} = \frac{\sqrt{6\alpha}}{2\pi}$ | $D\{m\} = \frac{1}{5L} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}$ | $n_m = \frac{4\pi}{15} \cdot \frac{t_\beta^2}{\varepsilon^2} \cdot \frac{\tau_k}{L}$ |
| S_m | $E\{S_m\} \approx \frac{2}{E\{n(0)\}}$ | $D\{S_m\} \approx \frac{4D\{n(0)\}}{E^4\{n(0)\}}$ | $n_{S_m} = n_{n(0)}$ |
| S | $E\{S\} \approx \frac{2}{E\{m\}}$ | $D\{S\} \approx \frac{4D\{m\}}{E^4\{m\}}$ | $n_S = n_m$ |
| h_{max} | $E\{h_{max}\} = \sigma \sqrt{2 \ln \frac{LE\{n(0)\}}{2}}$ | $D\{h_{max}\} = \frac{(\sigma\sigma)^2}{12n \frac{LE\{n(0)\}}{2}}$ | $n_{h_{max}} = \frac{\pi^2 t_\beta^2}{24\varepsilon^2 \ln^2 \frac{LE\{n(0)\}}{2}}$ |
| t_γ | $E\{t_\gamma\} = 1 - \Phi(\gamma)$ | $D\{t_\gamma\} = \frac{2\tau_k}{L} \sum_{i=1}^k \frac{1}{i \sqrt{\beta}} [\Phi^{\beta i}(\gamma)]^{\frac{1}{\beta}}$ | $n_{t_\gamma} = \frac{5t_\beta^2}{\varepsilon^2} \cdot \frac{\tau_k}{L [1 - \Phi(\gamma)]^{\frac{1}{\beta}}} \times \sum_{i=1}^k \frac{1}{i \sqrt{\beta}} [\Phi^{\beta i}(\gamma)]^{\frac{1}{\beta}}$ |
| r_{cp} | $E\{r_{cp}\} = \frac{1}{2\pi^2 E\{R_a\} E\{m\} E\{n(0)\}}$ | $D\{r_{cp}\} = 5D\{R_a\} \frac{E\{r_{cp}\}}{E\{R_a\}}$ | $n_{r_{cp}} = \frac{5t_\beta^2}{\sqrt{2}\varepsilon^2} \cdot \frac{\tau_k}{L}$ |

Таблица 3

| Коэффициент | Значения коэффициента t_β | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|------|------|------|-----------|-------|-------|-------|
| | β | | | | t_β | | | |
| 1 | 0,84 | 0,85 | 0,86 | 0,87 | 1,404 | 1,439 | 1,475 | 1,513 |
| 2 | 0,88 | 0,88 | 0,88 | 0,88 | 1,554 | 1,554 | 1,554 | 1,554 |
| 3 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 1,750 | 1,750 | 1,750 | 1,750 |
| 4 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 2,053 | 2,053 | 2,053 | 2,053 |

В заключение отметим, что при исследовании нерегулярной шероховатости в инженерных задачах достаточно определить исходные параметры R_a , $n(0)$ и t . Что касается параметров h_{max} , t_u , r_{cp} , то точность их определения намного ниже при тех же трассах измерения. В целях экономии времени их значения желательно получить аналитически по соответствующим формулам, так как их нахождение по профилограммам не приводит в итоге к заметному повышению точности по сравнению с аналитическими результатами и, к тому же, трудоемко.

НЕОБХОДИМОЕ ЧИСЛО ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИСКОМЫХ ПАРАМЕТРОВ С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ.

Экспериментальные исследования шероховатости обычно связаны с вопросом о количестве и необходимой длине профилограмм (трассы измерения) для изучаемой

поверхности. Можно ожидать, что чем больше длина трассы профилографирования, тем более точные получаются значения искомым параметров. На практике, однако, количество исследований практически ограничено, поэтому необходим выбор трассы оптимальной длины, обеспечивающей достаточную точность для инженерных решений. Кроме отмеченной погрешности точность параметра зависит от качества записи профиля, обработки данных и т. п.

Для модели шероховатости, описывающей ее профиль нормальным стационарным случайным процессом $h(x)$, имеющим математическое ожидание $E\{h(x)\}$ и корреляционную функцию $K(\tau) = \sigma^2 \rho(\tau)$, в качестве исходных могут служить параметры R_a и особые точки профиля, а именно, число нулей $n(0)$ и максимумов t , как наиболее важные.

Рассмотрим задачу определения необходимого числа измерений, воспользовавшись методами теории случайных функций.

Пусть в результате n кратных независимых измерений получен параметр z . Запишем вероятность $P\{|\bar{z} - E\{z\}| \leq \Delta\} = \beta$, где \bar{z} — выборочное среднее значение параметра z ; Δ — отклонение выборочного среднего от математического ожидания $E\{z\}$ параметра z ; β - вероятность появления отклонения.

Решение зависимости приводит к выражению $|\bar{z} - E\{z\}| \leq t_\beta \sigma_{\bar{z}}$, где t_β - табулированная величина, зависящая от β ; $\sigma_{\bar{z}}$ — среднее квадратическое отклонение выборочного среднего.

Учитывая, что $\sigma_{\bar{z}} = \frac{\sigma_z}{\sqrt{n}}$, находим $n = \frac{t_\beta^2 D\{z\}}{\varepsilon^2 E^2\{z\}}$, где

$D\{z\}$ - дисперсия параметра z ; ε - относительная погрешность определения параметра z , $\varepsilon = \frac{\Delta}{E\{z\}}$.

Формула представляет собой зависимость, позволяющую при заданных точности ε и достоверности β определить число: необходимых измерений для известной длины трассы измерения L . По ней можно оценить также длину самой трассы измерения, полагая в формуле $n = 1$.

Численные значения коэффициента t_β зависят от вида распределения выборочного среднего. Если закон распределения не известен, величину t_β можно найти для некоторых распределений приводятся таблицы. На практике в первом приближении обычно можно применять нормальный закон распределения вероятностей. Дальнейшие исследования числа измерений n , связаны с нахождением $E\{z\}$ и $D\{z\}$ - вероятностных характеристик параметра z .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЛИНИИ ПРОФИЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Определение правильного положения средней линии профиля по профилограмме шероховатой поверхности обуславливает минимальную ошибку в оценке характеристик микрорельефа в соответствии с ГОСТ 2789 — 73.

Предложенные в методических указаниях формулы для аналитического расчета положения средней линии можно упростить путем алгебраических преобразований, сделав

их более доступными для ручного счета и для расчетов на ЭВМ. Для этого в отличие от схемы, приведенной в методических указаниях, следует перенести начало отсчета на середину оси абсцисс т. е. на середину базовой длины l . Для определения правильного положения средней линии τ — τ нужно найти ординату h_0 и угол наклона α .

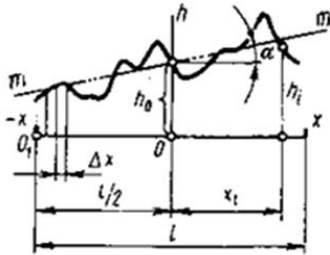


Рис.10. Схема к определению положения средней линии профиля шероховатой поверхности.

$$h_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i ; \quad \operatorname{tg} 2\alpha = 2 \frac{\Delta x \left[\sum_{i=1}^n x'_i h_i - \sum_{i=1}^n x_i \frac{\sum h_i}{n} \right]}{(\Delta x)^2 \left[\sum_{i=1}^n (x'_i)^2 - \frac{(\sum x'_i)^2}{2} \right] - \sum_{i=1}^n h_i^2 + \frac{(\sum h_i)^2}{n}}$$

Здесь обозначено: Δx - интервал разбиения оси абсцисс; n - число интервалов разбиения; h_i - ордината точки профилограммы; x_i - абсцисса этой точки; $x'_i = \frac{x_i}{\Delta x}$ - доля абсцисс, которая в целях упрощения решения выражается в числах натурального ряда. Если начало отсчета перенести в точку O , то формула (2) упростится, так как вследствие равного количества интервалов вдоль положительного и отрицательного направлений оси $x \sum_{i=1}^n x'_i = 0$.

Это выражение можно еще упростить. Преобразуем вторую часть знаменателя, умножив и разделив ее на n : $A = n \left[\sum_{i=1}^n \frac{h_i^2}{n} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{n} \right)^2 \right] = n\sigma^2$, где σ^2 - дисперсия распределения величины h . Условно полагая распределение высот неровностей равномерным выражение (4) можно записать следующим образом $A = n \frac{(h_{\max} - h_{\min})^2}{12}$.

Таким образом выражение для определения угла наклона средней линии запишется так:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = 2 \frac{\Delta x \sum_{i=1}^n x'_i h_i}{2(\Delta x)^2 \left[\sum_{i=1}^n (x'_i)^2 \right] - \frac{n(h_{\max} - h_{\min})^2}{12}}$$

В этом выражении отсутствует сумма квадратов высот микронеровностей $\sum h_i^2$, что значительно облегчает расчеты.

Проведенная проверка большого количества профилограмм шлифованных поверхностей показала, что со всеми преобразованиями позволяет найти положение средней линии с ошибкой, обуславливающей нахождение ординат относительно средней линии, не превышающей 1 мм, т. е. с погрешностью измерения высот неровностей линейкой по исследуемой профилограмме. Для дальнейших упрощений расчета приводится вспомогательная таблица

$$\text{значений суммы } \sum_{i=1}^{n-1} (x'_i)^2 .$$

Выводы

Шевером из электрокорунда нормального, электрокорунда белого и карбида кремния зеленого с определёнными связками получится только $Ra = 0,3$.

$Ra = 0,1$ получен с помощью хона электрокорунда хромистого с добавкой оксида хрома с определёнными связками. Были достигнуты высокие показатели точности зубьев по ГОСТ 1643 - 81:

Накопленная погрешность шагов зубчатого колеса (кинематическая точность) - $Fpr-6$ степени. Накопленная погрешность k шагов зубчатого колеса - $Fpkr-5$. Радиальное биение зубчатого венца - $Frr - 5$. Отклонение шага зубчатого колеса - $fit - 6$. Погрешность профиля зуба зубчатого колеса $Fa - 6$

Погрешность линии зуба зубчатого колеса - $F\beta r-6$.

1. Применение хона состоящего из электрокорунда хромистого с добавкой оксида хрома с размером зерна 10мкм для снижения напряжения в процессе зубохонингование.

2. Выявление взаимосвязей выбора инструментов при использовании финишной обработки зубчатых колес.

3. Использование больше осей скрещивания хона и инструмента для высоких показателей по производительности и качеству изготовления зубчатых колес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bausch Tomas. Innovative Zahnradfertigung. Expertverlag GmbH, D-71262, Reningen, Germany, 2006, - 778 p.

2. Калашников А.С. Современные методы обработки зубчатых колёс. / А.С. Калашников, Ю.А. Моргунов, П.А. Калашников. - М.: Издательский дом «Спектр». 2012. - 238 с.

3. Шандров Б.В. Развитие и применение наукоёмких технологий в производстве летательных аппаратов / Б.В. Шандров, Ю.А. Моргунов, Б.П. Саушкин // Журнал «Известия МГМУ (МАМИ)». - 2013, - № 2 (16), т. 2, - С. 278 - 283.

4. Старков В.К. Шлифование высокопористыми крупами. - М.: Машиностроение, 2007, - 668 с.

5. Шевченко С.В. Зубчатая муфта с модифицированными профилями зубьев / С.В. Шевченко, А.А. Муховатый, О.С. Крель // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2017. - Т.5, №3. - С. 21 - 25.

Research of the Operation of Gear Honing of Driving Gears with a Calculated-experimental Evaluation of Characteristics

Karavanova A.G., Kalashnikov A.S.

Moscow Polytechnic University

Moscow, Russia

geartechniid@yandex.ru, alexandr_kalashnikov45@rambler.ru

Abstract. The process of gear honing of gears by 2 various processing methods is considered. One consists of normal electrocorundum, white electrocorundum, and green silicon carbide with a grain size of 4,6,12. The other consists of abrasive materials (chromium electrocorundum with the addition of chromium oxide with a grain size of 10 μm), polyethylene polyamide and epoxy resin as a binder. A technological model of hone crossing with a tool is developed. The manufacturing quality of the gears was determined by determining the roughness of the surface and the accumulated errors of the gears. Since the characteristics of surface topography will be used in calculating the actual pressure in the contact of parts with rough surfaces, a method of converting data on processing profiles of rough surfaces in the direction of the tooth involute and perpendicular to the characteristics of the topography of these rough surfaces will

also be required. To ensure experimental research, control programs for machine tools and instruments were performed and developed, on which the accuracy and precision (macrogeometric characteristics) and surface roughness (microgeometric characteristics) of the teeth of the experimental parts were processed and analyzed, and a ruling and processing tool (hone and shaver) was prepared. The equipment for the workpiece, the ruling diamond wheel and the ruling diamond roller is mounted on the front and rear headstock of the machine, and a ruling and processing tool are installed. The preliminary editing of the abrasive it and the topography of these rough surfaces has been completed.

Keywords: gear honing, cutting speed, flanking, shaver and hone, surface roughness, step parameters, accumulated errors.

Механика качения эластичного колеса по жесткому барабану

Балабина Т.А., Мамаев А.Н.

Московский политехнический университет
Москва, Россия
balabinata@gmail.com, mamist-man@rambler.ru

Карелина М.Ю.

Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)
Москва, Россия
karelinamu06@gmail.com

Аннотация. В настоящее время оценка сопротивления качению автомобильных шин, как и определение коэффициента сопротивления боковому уводу, выполняется на барабанных стендах. Также все большее распространение приобретают испытания автомобилей на барабанных стендах различной конструкции. Однако в литературе отсутствуют работы рассматривающие механику взаимодействия эластичного колеса с барабаном и определяющие его кинематические и силовые характеристики, что и определило задачи данного исследования. В основу исследования положено, что при установившемся качении вступающие в зону контакта элементы поверхности колеса, не будучи еще «подготовленными» к восприятию касательной силы и в то же время прижатые к основанию нормальной силой, начинают движение без скольжения, получая при этом тангенциальные смещения. По мере перемещения сцепленных элементов колеса и опорного основания в обратном механизме в зоне контакта их тангенциальные смещения нарастают, следовательно, нарастает и действующая между сцепленными элементами касательная сила трения. В том месте контакта где возросшая сила трения достигнет предельной по сцеплению, происходит срыв и на всей части контакта, расположенной за точкой срыва, происходит скольжение. На основании этого определяется координата участков сцепления и скольжения в контакте колеса с барабаном, относительная потеря скорости колеса, тангенциальная сила, действующая в контакте, момент на колесе, мощность потерь на трение в контакте, гистерезисные потери колеса.

Ключевые слова: колесо, барабан, сопротивление, трение, контакт, мощность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопросы, связанные с механикой качения колеса по плоской поверхности рассмотрены достаточно широко [1-23]. Однако, процесс качения колеса по барабану остается малоизученным, хотя это и требует пристального изучения, так как в настоящее время широко применяются обкаточные и исследовательские испытания автомобилей на барабанных стендах, что обуславливает необходимость получения зависимостей, определяющих силы в контакте колеса с барабаном, потерь мощности на трение в контакте, проскальзывания колеса и так далее.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Механика качения эластичного колеса по барабану такая же, как и при качении колеса по плоской жесткой опорной поверхности.

При качении ведомого колеса, нагруженного только нормальной нагрузкой, вследствие несовершенной упругости материала имеют место потери на внутреннее трение в материале колеса (гистерезис), которые обуславливают возникновение момента сопротивления M_f и появление силы сопротивления качению F_f - продольной касательной силы, действующей в контакте колеса с основанием в направлении, противоположном движению колеса. Подобная сила сопротивления качению возникает и у тормозного колеса, нагруженного, в сравнении с ведомым колесом, дополнительным тормозным моментом M_t . Наличие этой силы приводит к проскальзыванию элементов его беговой дорожки относительно основания в зоне контакта и к потере угловой скорости колеса.

При качении ведущего колеса, движение которого происходит под действием крутящего момента M_k , в контакте возникает ведущая (тяговая) сила, направленная по ходу колеса. Как и в предыдущем случае, эта сила вызывает проскальзывание элементов беговой дорожки колеса в зоне контакта с основанием и к потере линейной скорости оси колеса.

Механизм возникновения скольжения элементов поверхности колеса относительно основания подробно рассмотрен в работах [1,2,3,4,5]. С использованием схемы обратного механизма «упругое колесо – жесткое основание», на основе теории предварительного смещения им показано, что при установившемся качении вступающие в зону контакта элементы поверхности колеса, не будучи ещё «подготовленными» к восприятию касательной силы и в то же время прижатые к основанию нормальной силой, начинают движение без скольжения, получая при этом тангенциальные смещения (направленные противоположно качению для тормозного и ведомого колес, и по направлению качения – для ведущего колеса). По мере перемещения сцепленных элементов колеса и основания в обратном механизме в зоне контакта их тангенциальные смещения нарастают, следовательно, нарастает и действующая между сцепленными элементами касательная сила трения. В том месте контакта, где возросшая сила трения достигает предельной по сцеплению, происходит срыв и на всей части контакта, расположенной за точкой срыва, вне зависимости от того, находится ли она в зоне убывающих или возрастающих нормальных давлений, происходит скольжение (рис.1).

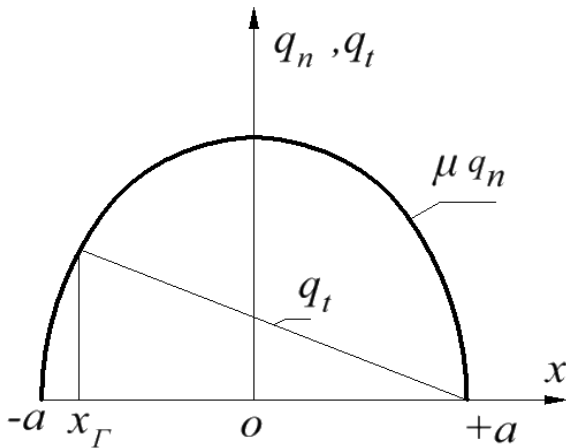


Рис.1. Нормальные q_n и тангенциальные q_t напряжения контакте колеса с барабаном. x_G – координата границы участков сцепления и скольжения

С увеличением потери скорости колеса и соответствующим увеличением действующей в контакте касательной силы, увеличивается зона скольжения, а также мощность потерь на трение в контакте, характеризующая интенсивность износа беговой дорожки и частично – сопротивление качению колеса.

Тангенциальные смещения точек беговой дорожки в зоне контакта могут быть представлены в виде суммы двух слагаемых, одно из которых обусловлено реализацией касательной силы в контакте, а второе – геометрий колеса (его круговой формы в поперечном к оси сечении).

Пренебрежение смещениями, обусловленными геометрией колеса, не приводит к существенной погрешности в определении кинематических параметров колеса в функции реализуемой касательной силы. В связи с этим при решении поставленных задач будем учитывать только тангенциальные смещения точек беговой дорожки колеса, обусловленные реализацией касательной силы [1,2,3]:

$$U = \xi(a-x) = \left(\frac{r_k^c}{r_k} - 1\right)(a-x) \quad (1)$$

В представленной формуле ξ – относительная потеря скорости, a – полудлина площадки колеса с жесткой опорной поверхностью, x – расстояние от начала площадки контакта до рассматриваемой точки колеса в зоне контакта, r_k – радиус качения колеса, r_k^c – радиус свободного качения.

Так как $\omega_k r_k = V$, где V – скорость оси колеса в обратном механизме, то

$$U = (a-x) \left(\frac{\omega_k r_k^c}{V} - 1\right) \quad (2)$$

Применительно к качению колеса по жесткому барабану $V = V_\delta = \omega_\delta r_\delta$, где ω_δ и r_δ – угловая скорость и радиус барабана. В результате тангенциальные смещения точек поверхности эластичного колеса, обусловленные реализацией в контакте с барабаном касательной силы, на участке сцепления могут быть представлены выражением:

$$U = (a-x) \left(\frac{\omega_k r_k^c}{\omega_\delta r_\delta} - 1\right) = \xi(a-x), \quad (3)$$

где

$$\xi = \frac{\omega_k r_k^c}{\omega_\delta r_\delta} - 1 \quad (4)$$

- относительная разность скоростей.

При известной величине ξ отношение угловых скоростей колеса и барабана будет равно:

$$\frac{\omega_k}{\omega_\delta} = (1 + \xi) \frac{r_\delta}{r_k^c} \quad (5)$$

Исходя из пропорциональности тангенциальных напряжений (удельных касательных сил) тангенциальным смещениям можем написать, что тангенциальные напряжения, обусловленные реализацией касательной силы в контакте, равны:

$$q_t = \lambda U = \lambda \xi (a-x), \quad (6)$$

где λ – коэффициент тангенциальной жесткости колеса, определяемый [1] как:

$$\lambda = \lambda_k \frac{r_\delta}{r_\delta + r} = \frac{1.5qr}{a^3} \frac{1}{1 + r/r_\delta} \quad (7)$$

При параболическом законе распределение нормальных давлений по длине площадки контакта координата границы участков сцепления и скольжения (рис.1), определяемая из равенства $q_t = \mu q_n$, может быть представлена зависимостью [1,2,3]:

$$x_G = -a \pm \frac{\lambda \xi}{\mu q_{n0}} \quad (8)$$

Момент на барабане, обусловленный действием касательной силы, равен:

$$M_t = 2b \int_{-a}^{x_G} r_\delta q_t dx + 2b \int_{x_G}^{+a} r_\delta q_t dx = \left[2b \int_{-a}^{x_G} q_t dx + 2b \int_{x_G}^{+a} q_t dx \right] r_\delta = F_t r_\delta \quad (9)$$

Величину в квадратных скобках, равную алгебраической сумме всех удельных касательных сил в контакте, назовем окружной силой тяги (рис. 2):

$$F_t = 2b \left[\frac{\lambda \xi}{2} (a-x_G)^2 \pm \frac{1}{3} \mu q_{n0} (2a^3 + 3a^2 x_G - x_G^3) \right] \quad (10)$$

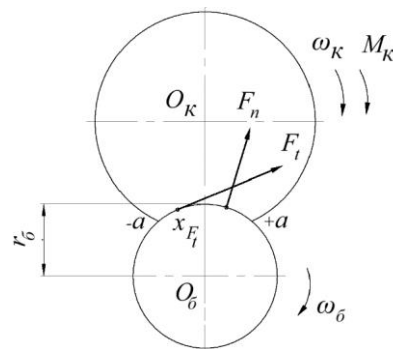


Рис. 2. Силы в контакте колеса с барабаном

Подставляя в (10) выражение $\lambda \xi = \pm \mu q_{n0} (a+x_G)$, полученное из (8), после преобразований приходим к уравнению, решение которого дает зависимость для нахождения координаты границы участков сцепления и скольжения:

$$x_G = a \left(1 - 2\sqrt[3]{1 - \frac{F_t}{\mu F_z}} \right) \quad (11)$$

В результате

$$\xi = \frac{\pm 1}{\lambda} 2\mu q_{n0} \left(1 - \sqrt[3]{1 - \frac{F_t}{\mu F_z}} \right) \quad (12)$$

или, с учетом выражений для q_{n0} (2) и (7)

$$\xi = \pm \frac{\mu a}{s} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_\delta} \right) \left(1 - \sqrt[3]{1 - \frac{F_t}{\mu F_z}} \right) \quad (13)$$

Последнее выражение, если не учитывать коэффициент насыщенности рисунка беговой дорожки s (для колеса без рисунка беговой дорожки $s=1$), совпадает с аналогичной формулой, полученной Г. Фроммом [6,7] (различие заключается лишь в степени радикала: у Г.Фромма - корень квадратный), а затем Р.В.Виравовым [1] для фрикционной передачи, состоящей из двух цилиндров.

При известной зависимости для ξ отношение угловых скоростей эластичного колеса и жесткого барабана в функции реализуемой в контакте силы тяги F_t и нормальной нагрузки в соответствии с формулами (4), (12) и (13), может быть представлено, как:

$$\frac{\omega_k}{\omega_\delta} = \frac{r_\delta}{r_k} \left[1 \pm \frac{2\mu q_{n0}}{\lambda} \left(1 - \sqrt[3]{1 - \frac{F_t}{\mu F_z}} \right) \right] = \frac{r_\delta}{r} \left[1 \pm \frac{\mu a}{s} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_\delta} \right) \left(1 - \sqrt[3]{1 - \frac{F_t}{\mu F_z}} \right) \right] \quad (14)$$

При малых (по сравнению с предельной по сцеплению $F_t^{пр\text{нб.}} = \mu F_z$) касательных силах последние формулы могут быть упрощены, если выражение $\sqrt[3]{1 - F_t / \mu F_z}$ разложить в степенной ряд, отбросив затем величины второго порядка малости:

$$x_T = a \left(-1 + \frac{2}{3} \frac{F_t}{\mu F_z} \right) \quad (15)$$

$$\xi = \frac{a}{3s} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r_\delta} \right) \frac{F_t}{F_z} \quad (16)$$

$$\frac{\omega_k}{\omega_\delta} = \frac{r_\delta}{r} \left[1 - \frac{a}{3s} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r_\delta} \right) \frac{F_t}{F_z} \right] \quad (17)$$

В выражениях (15), (16), (17) сила F_t положительна для ведущего колеса и отрицательна для ведомого и тормозного.

Потери мощности на трение в контакте эластичного колеса с жестким барабаном, обусловленные реализацией в контакте силы тяги, определяются по такой же зависимости, как и для случая качения колеса по плоской опорной поверхности:

$$P_{тр.} = F_t \xi V = F_t \xi \omega_\delta r_\delta \quad (18)$$

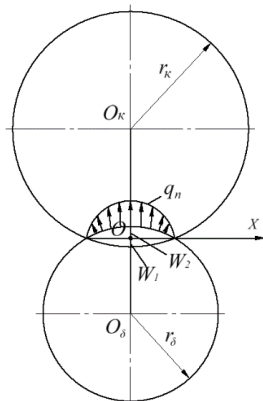


Рис.3. Нормальные напряжения q_n при прижатии колеса к барабану

Для определения мощности потерь на гистерезис в материале эластичного колеса, катящегося по жесткому барабану, как и ранее, будем учитывать лишь нормальную деформацию колеса, которую можно представить в виде суммы слагаемых (рис.3): $W = W' + W''$.

$$\text{Так как } W' = \frac{a^2 - x^2}{2r} \text{ и } W'' = \frac{a^2 - x^2}{2r_\delta},$$

то

$$W = \frac{a^2 - x^2}{2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r_\delta} \right) \quad (19)$$

Потери мощности на гистерезис можно найти, используя следующую зависимость:

$$P_\Gamma = \beta_\Gamma \int_0^a q_n \left| \frac{dW}{dt} \right| dx 2b, \quad (20)$$

где β_Γ - коэффициент гистерезисных потерь; dW/dt - скорость деформирования колеса:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dW}{dx} V_{окр.} = \frac{dW}{dx} \omega_k r \quad (21)$$

Здесь координата x лежит на оси ОХ (рис.3.); $\frac{dx}{dt} = V_{окр.} = \omega_k r$ - так как изменение нормальной деформации dW/dt по мере перемещения элемента беговой дорожки колеса вглубь контакта, происходит со скоростью, равной окружной скорости колеса. С учетом (19)

$$\frac{dW}{dt} = -x \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r_\delta} \right) \omega_k r \quad (22)$$

В результате,

$$P_\Gamma = \frac{3}{16} \beta_\Gamma F_n a \omega_k r \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r_\delta} \right) \quad (23)$$

При найденной зависимости для P_Γ момент от гистерезиса в материале шины может быть представлен в виде:

$$M_\delta = \frac{m_\delta}{\omega_b} = \frac{3}{16} \beta_\delta a F_n \left(1 + \frac{r}{r_\delta} \right) \quad (24)$$

Тогда плечо сдвига нормальной реакции барабана будет равно:

$$h_0 = \frac{M_\delta}{F_n} = \frac{3}{16} \beta_\delta a \left(1 + \frac{r}{r_\delta} \right) \quad (25)$$

Согласно [4,5],

$$3\beta_\Gamma a^{nn} / 16 = f_0 r_k^c \approx f_0 r.$$

Тогда

$$h_0 = f_0 r \left(1 + \frac{r}{r_\delta} \right) \frac{a}{a^{nn}} \quad (26)$$

Здесь a^{nn} - полудлина контакта колеса с плоской жесткой опорной поверхностью при той же нагрузке F_n . Зная плечо h_0 , можно найти [4,5] зависимость для касательной силы (она же сила сопротивления качению ведомого колеса), обусловленной гистерезисом:

$$F_{\tau_0} = F_n f_0 \left(1 + \frac{r}{r_\delta} \right) \frac{a}{a^{nn}} \quad (27)$$

Так как отношение силы сопротивления качению к нормальной силе $F_{\tau_0} / F_n = f_0$ есть коэффициент сопротивления качению колеса, то для рассматриваемого случая качения эластичного колеса по жесткому барабану

$$f_0^\delta = f_0 \left(\frac{r}{r_\delta} + 1 \right) \frac{a}{a'} \quad (28)$$

При $r_\delta \rightarrow \infty$ зависимости (24), (27), (28) приводят к выражениям, выведенным для случая качения эластичного колеса по плоской жесткой опорной поверхности. Сравнение этих выражений с вышеуказанными зависимостями приводит к заключению, что как момент от гистерезиса, так и сила, и коэффициент сопротивления качению ведомого эластичного колеса по жесткому барабану, обусловленные гистерезисом, возрастают в $a(1+r/r_\delta)/a'^{nl}$ раз по сравнению с качением того же колеса по плоской жесткой поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

На основании рассмотренной механики качения эластичного колеса по жесткому барабану получены зависимости для расчета тангенциальной силы в контакте колеса с барабаном, момента на барабане, мощности потерь на трение в контакте, величины проскальзывания (относительной потери скорости) колеса.

Увеличение сопротивления качению по барабану приводит к различию коэффициентов сопротивления боковому уводу, определяемых на барабане и при движении колеса по плоской опорной поверхности.

При использовании коэффициентов сопротивления боковому уводу и сопротивления качению, полученных экспериментально на барабанном стенде, для случая движения колеса по плоской опорной поверхности, следует вводить соответствующие поправочные коэффициенты. Далее следует определить точки приложения тангенциальной и нормальной сил в контакте, качение колеса по двум барабанам, определение коэффициента сопротивления боковому уводу при качении колеса по барабану.

Более подробно вопросы взаимодействия эластичного колеса с жесткой опорной поверхностью изложены в приводимом в конце данной статьи списке литературы [1-23].

ЛИТЕРАТУРА

1. Вирабов Р.В. Тяговые свойства фрикционных передач – Москва: Машиностроение, 1982. – 263 с.
2. Вирабов Р.В. Анализ кинематических и силовых соотношений при качении эластичного колеса по жесткому основанию / Р.В. Вирабов, А.Н. Мамаев // Механика машин. – 1980. – вып. 57. – С. 101 – 106.
3. Вирабов Р.В. Определение мощности потерь на трение в контакте фрикционной пары – колесо с пневматической шиной-жесткое основание / Р.В. Вирабов, А.Н. Мамаев // Бесступенчато-регулируемые передачи: Межвуз. сб. научн. тр. – Ярославль: Ярославский политехнический институт. – 1978. – вып. 3. – С. 61 – 67.
4. Вирабов Р.В. Общие вопросы взаимодействия эластичного колеса с жесткой опорной поверхностью / Р.В. Вирабов, А.Н. Мамаев, Т.А. Балабина // ААИ

«Автомобиле- и тракторостроение»: тезисы докл. Международной научно-практической конф. (Москва, 17 ноября 2010). – Москва, 2010. – С. 73 – 80.

5. Балабина Т.А. Механика качения эластичного колеса по жесткой опорной поверхности / Т.А. Балабина, А.Н. Мамаев // Технические науки: тенденции, перспективы и технологии развития: сб. научн. тр. по итогам междунаrodn. Научно-практической конф. (Кременчуг, 07 октября 2014). – Волгоград, 2014. – С. 20 – 25.

6. Fromm Н. Berechnungdes Schlupfesbein Rollendeformierbaren Scheiben. Z.f.Angew. Math. undMech. Bd. 7, Н.1, 1927.

7. Fromm Н. Arbeitsverlust, Formänderungenund Schlupfsein Rollenvontreibendenundgebremsten Radernoder Scheiben. Beitragzur Analyse der Reibungsgesetze. Z.f.

8. Вирабов Р.В. Влияние тороидальности эластичных колес на неравномерность износа по ширине беговой дорожки / Р.В. Вирабов, А.Н. Мамаев // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1983. – № 9. – С. 94 – 97.

9. Вирабов Р.В. К вопросу наименьшей величине коэффициента сопротивления качению эластичного колеса по жесткой горизонтальной поверхности / Р.В. Вирабов, А.Н. Мамаев // Известия Вузов. Машиностроение. – 1987. – №10. – С. 85 – 88.

10. Мамаев А.Н. Определение коэффициента тангенциальной эластичности колеса с тороидальной формой беговой дорожки // Известия Вузов. Машиностроение. – 1982. – №10. – С. 80 – 86.

11. Мамаев А.Н. Влияние вида принимаемого закона распределения нормальных давлений в контакте колеса с жестким основанием на расчетные / Г.С. Вуколова, Л.Н. Дмитриева, А.Н. Мамаев // Сборник научных трудов, посвященных 60-летию воссоздания МАМИ. – Москва: Изд. МГТУ МАМИ. – 1999. – С. 112 – 118.

12. Вирабов А.Н. Влияние режима качения эластичного колеса на величину боковой силы при боковом уводе / А.Н. Вирабов, А.Н. Мамаев, А.П. Маринкин, Ю.М. Юрьев // Вестник машиностроения. – 1986. – №1. – С. 33 – 35.

13. Вирабов Р.В. Анализ силовых соотношений при качении ведомого эластичного цилиндрического колеса по криволинейной траектории / Р.В. Вирабов, А.Н. Мамаев // Механика машин. – 1980. – вып. 57. – С. 105 – 112.

14. Вирабов Р.В. Исследование контактных явлений при криволинейном качении тороидального колеса / Р.В. Вирабов, А.Н. Мамаев // Известия Вузов. Машиностроение. – 1980. – №2. – С. 33 – 38.

15. Вирабов Р.В. Определение сил и моментов, действующих на тороидальное колесо при криволинейном качении / Р.В. Вирабов, А.Н. Мамаев А.Н. // Известия Вузов. Машиностроение. – 1980. – №3. – С. 30 – 34.

16. Мамаев А.Н. Определение силовых характеристик эластичного колеса при качении уводом по криволинейной траектории / А.Н. Мамаев, И.В. Сазанов, Ю.П. Назаров // Проблемы шин и резинокордных материалов. Прочность и долговечности: Материалы II Всесоюзного симпозиума. – Москва: НИИШП, 1990. – С. 50 – 56.

17. Мамаев А.Н. Влияние условий работы шин на износ их беговой дорожки // Грузовик. – 1999. – №9. – С. 12 – 14.

18. Мамаев А.Н. Определение силовых и кинематических характеристик эластичного колеса при качении по жесткому барабану / Р.В. Вирабов, А.Н.

Мамаев, В.М. Португальский, С.И. Чепурной // Сб. трудов международной научно-технической конференции, посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». – М.: МГТУ «МАМИ», 2010.

19. Мамаев А.Н. Сопротивление качению ведомого колеса по жесткому барабану // Сб. трудов международной научно-технической конференции, посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». – М.: МГТУ «МАМИ», 2010.

20. Мамаев А.Н. Влияние конструктивных параметров эластичных колес на величину их прогиба и размеры площадки контакта с жестким основанием // Безопасность и надежность автомобиля: Межвуз. сб. научных трудов. – М.: МАМИ, 1982. – С. 203 – 211.

21. Мамаев А.Н. Определение размеров площадки контакта и прогиба колеса с резиновой шиной при статическом прижатии колеса к жесткому основанию / А.Н. Мамаев, Е.А. Алепин // Машиноведение: сб. научных трудов. – Челябинск, 1980. – №251. – С. 82 – 85.

22. Мамаев А.Н. Об определении коэффициента гистерезисных потерь высокоэластичных тел качения. – М.: НИИНавтопром, 1982. – №779, ап – Д82.

23. Балабина Т.А. Определение соотношения углов развала и схождения эластичных колес, обеспечивающего наименьшее сопротивление качению / Т.А. Балабина, А.Н. Мамаев, С.И. Чепурной // Известия МГТУ «МАМИ», 2013. – № 1 (15), т.1.

Mechanics of Elastic Wheel Rolling on a Rigid Drum

Balabina T., Mamaev A.
Moscow Polytechnic University
Moscow, Russia

balabinata@gmail.com, mamist-man@rambler.ru

Karelina M.

Moscow Automobile and Road State Technical University
(MADI)

Moscow, Russia
karelinamu06@gmail.com

Abstract. At present, yvaluation of rolling resistance of automobile tires, as well as determination of the coefficient of resistance to lateral diversion, is carried out on drum stands. Testing cars on drum stands of various designs is also becoming increasingly common. However, there are no works in literature considering the mechanics of interaction of an elastic wheel with a drum and its kinematic and force characteristics, which has defined the tasks of this study. The research is based on the fact that with steady rolling, the wheel surface elements entering the contact zone are not yet “prepared” to perceive the tangential force and at the same time pressed to the base by normal force, start moving without slipping, while obtaining tangential displacement. As the coupled elements of the wheel and the support base move in the reversed mechanism in the contact zone,

their tangential displacements increase, and therefore the tangential friction force between the coupled elements also increases. In the place of contact, where the increased friction force reaches the ultimate in adhesion, there happens a breakdown, and on the entire part of the contact located behind the point of breakdown, a slip occurs. Based on this, the authors determine the coordinate of the areas of adhesion and slip in the contact of a wheel with a drum, relative loss of speed of the wheel, the tangential force acting in the contact, the torque on the wheel, power of friction loss in the contact, the hysteresis loss of the wheel.

Keywords: wheel, drum, resistance, friction, contact, power.

Изменение структуры дисперсного материала при воздействии динамических нагрузок

Чабуткин Е.К.

Ярославский государственный технический университет

Ярославль, Россия

chabutkin-ek@yandex.ru

Аннотация. При уплотнении различных дорожно-строительных материалов эффективность процесса во многом зависит от правильного выбора катка и назначения режимов его работы. Для повышения эффективности работы вибрационного катка требуется регулировать величину контактных напряжений под вальцем по мере нарастания плотности материала. В работе изучены физико-механические процессы формирования структуры дисперсного материала. Показана тождественность этих процессов для различных материалов и дана связь формирования структуры с коэффициентом уплотнения.

Ключевые слова: каток, уплотнение, материал дисперсный, структура материала, нагрузка, динамическое воздействие.

ВВЕДЕНИЕ

При возведении дорожного полотна, как сложного инженерного сооружения используется большое количество разнообразных материалов с широким спектром физико-механических свойств. Этим и объясняется разнообразие уплотняющей техники.

Само по себе уплотнение является весьма сложным процессом, со множеством взаимосвязанных факторов, так или иначе оказывающих влияние на конечный результат. При этом задача выбора такой комбинации параметров уплотняющей машины, при которой процесс уплотнения конкретного участка с определенными условиями будет максимально эффективным, является столь же важной, сколь и сложной. Зачастую эту задачу решают при помощи моделирования процесса уплотнения [1, 2, 3, 4]. Однако ее невозможно выполнить без учета процессов, происходящих в самом уплотняемом материале.

В дорожном строительстве широкое применение находят дисперсные многофазные материалы – грунты, асфальтобетонные смеси. Особенность таких материалов – наличие различных фаз, а также дисперсность, раздробленность твердой фазы, которая вследствие этого обладает развитой удельной поверхностью. Наряду с этим применяются и грубодисперсные материалы типа щебня и гравия, свойства которых определяются только твердой фазой. Однако, при возведении дорожных насыпей из крупнообломочных грунтов формирование плотной структуры обычно выполняют при обильном их увлажнении. Наличие в их структуре песчано-глинистого заполнителя, с учетом фактора увлажнения, также приближает их к насыпным грунтам.

Такое разнообразие материалов заставляет выделить характерные типы структур. Структура материала зависит от характера сил взаимодействия между его составляющими, а также от расположения и ориентации частиц. Эти

силы взаимодействия называют связями. Различают следующие типы структур дорожно-строительных материалов: коагуляционная, кристаллизационная и контактная [5].

Анализ процессов, происходящих в дисперсных материалах на стадии уплотнения, показывает что большинство материалов имеют коагуляционную структуру. Значит, с точки зрения физико-механических свойств любой дорожно-строительный материал можно представить как трехфазную систему, состоящую из скелета, воздуха и воды (либо битума для асфальтобетонных смесей) [5]. В зависимости от размещения воды в порах такие материалы могут находиться в состоянии либо с «защемленной водой», либо с «защемленным воздухом».

Влияние сил сцепления на прочность трехфазных материалов различно и находится в зависимости от дисперсности, формы частиц и влажности грунта. Деформации трехфазного грунта различны и находятся в зависимости от соотношения воды и воздуха в его порах.

На поверхности частиц образуется слой воды. Этот слой, который принято называть крепко связанной водой, обладает аномальными свойствами. Эта вода обладает значительной вязкостью, упругостью и прочностью на сдвиг [6]. Поверх прочносвязанной воды располагается рыхлосвязанная вода, которая удерживается вблизи поверхности твердых частиц меньшими силами. Свойство этой воды близки к свойствам воды в свободном состоянии. Вместе с тем она передвигается значительно медленнее свободной, скорость ее передвижения зависит от температуры. Количество связанной воды в грунтах зависит от их минералогического состава. Схематично состав трехфазного дисперсного материала можно представить в виде схемы, изображенной на рис.1.

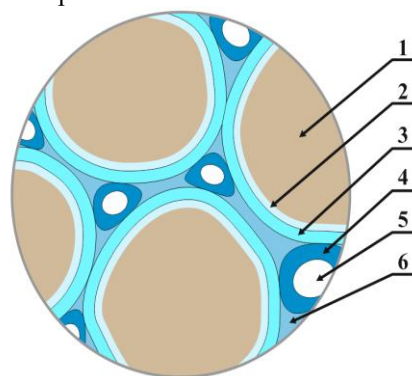


Рис. 1. Схема структуры насыпного грунта: 1 – минеральные частицы; 2 – прочносвязанная вода; 3 – слабосвязанная пленочная вода; 4 – свободная вода; 5 – «защемленный» воздух; 6 – капиллярная вода

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представляет интерес выявление изменений структуры материала, происходящих на различных стадиях деформирования. С этой целью автором были проведены механические испытания образцов грунта и асфальтобетона в соответствии с [7, 8] с одновременным исследованием их структуры. Структура материала изучалась с помощью микроскопа МИН-7, при этом подсчитывалось процентное содержание зерен различного диаметра в пределах исследуемого участка. Результаты исследования приведены на рис. 2 и 3.

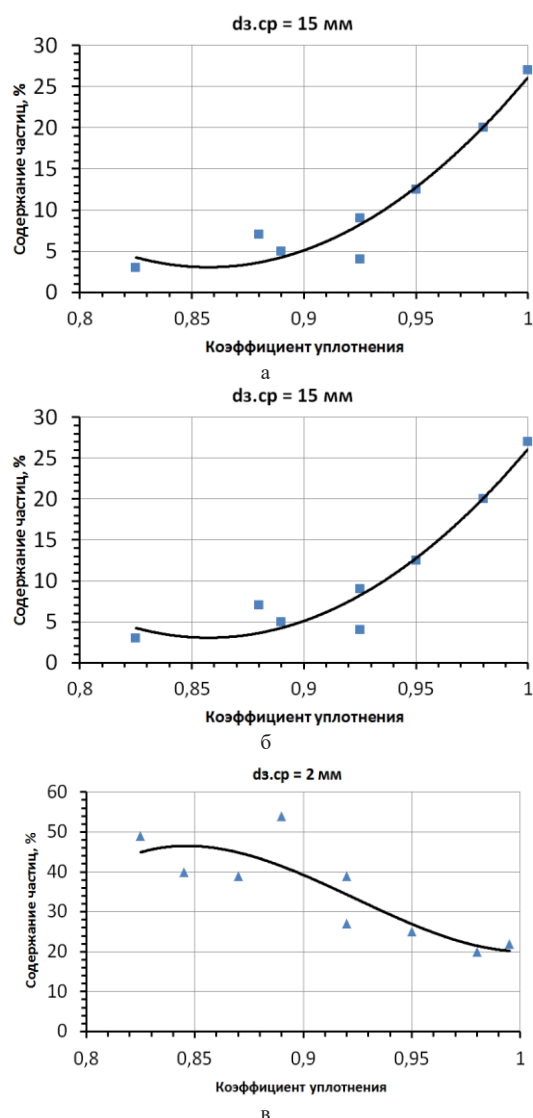


Рис. 2. Графики зависимости изменения среднего диаметра зерен от коэффициента уплотнения для грунта

Структура материала в исходном состоянии носила поблочно-ориентированный характер. Около 50 % материала состояли из микроблоков. Пространство между блоками заполнено хаотически ориентированной массой глинистых частиц и мелкой песчаной фракции, с хорошо видимыми пустотами и полостями, образовавшимися в ре-

зультате неплотного прилегания блоков. При деформировании происходят изменения, заключающиеся в уменьшении количества и размера полостей и пор, которые местами оказывались сжатыми и вытянутыми в направлении сдвига. Это свидетельствует о локальных смещениях частиц и микроагрегатов и об их более компактной упаковке. Чем продолжительнее процесс деформирования, тем в большей степени происходило уменьшение полостей.

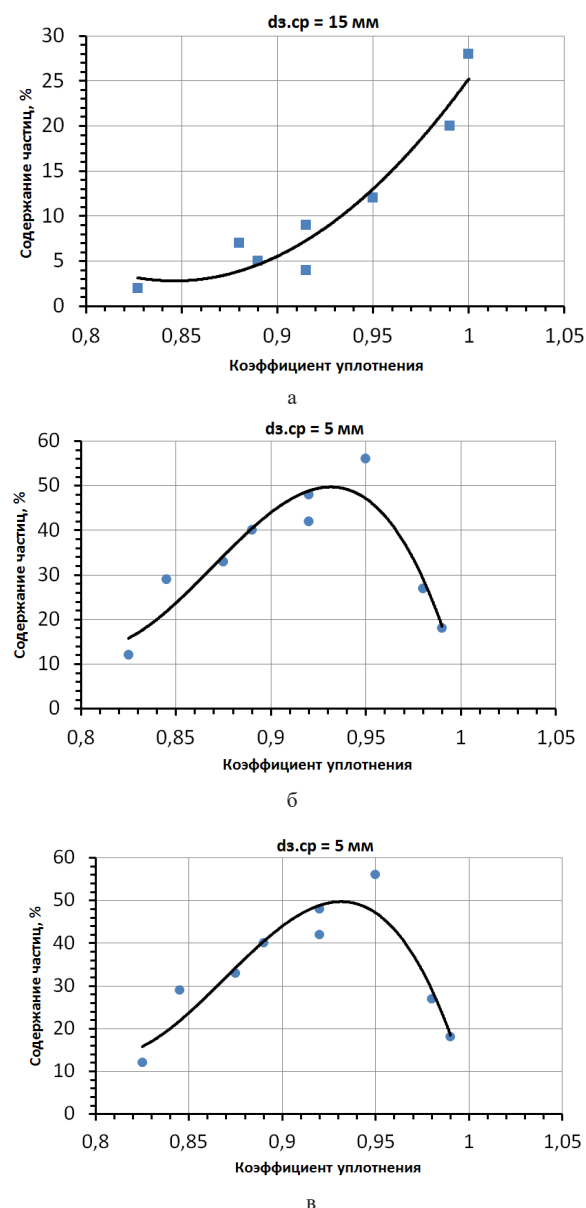


Рис. 3. График зависимости изменения среднего диаметра зерен от коэффициента уплотнения для асфальтобетона

Анализ зависимостей изменения структуры дисперсного материала при деформировании показывает, что при уплотнении происходит интенсивный рост крупных блоков (рис.2а, 3а) за счет уменьшения расстояния между зернами, взаимного перемещения мелких частиц по зонам

скольжения, которые, плотно прилегая друг к другу, заполняют все возможные пустоты и образуют единый крупный блок.

Наряду с ростом крупных зерен происходит рост и средних зерен (рис.2б, 3б). Однако рост этих блоков идет до определенной плотности, оцениваемой коэффициентом уплотнения K_u , для любого дисперсного материала в диапазоне от 0,92 до 0,94. Это обусловлено тем, что при этой плотности количество и размер полостей снижается до критического, практически прекращается перемещение мелких частиц и начинается интенсивное сближение блоков среднего размера с образованием крупных блоков. Очевидно, что до плотности, соответствующей $K_u=0,94$ трехфазный дисперсный материал находится в состоянии «защемленная вода». При этом воздушная фаза имеет возможность свободного выхода из уплотняемого материала.

Интенсивный рост мелких зерен (рис.2в, 3в) характерен только на начальной стадии деформирования до достижения K_u в пределах от 0,85 до 0,88 за счет перемещения мелких частиц по, имеющимся в большом количестве, пустотам. Постепенно, количество пустот и зон скольжения значительно снижается, при этом происходит интенсивный спад роста мелких зерен и, за счет сближения, их переход в блоки среднего размера. При этом плотность возрастает до $K_u=0,97$ и трехфазный дисперсный материал переходит в состояние «защемленный воздух».

Дальнейший процесс деформирования дисперсного материала осуществляется за счет сближения и внедрения друг в друга средних и крупных блоков. При этом значительные напряжения в местах контакта блоков вызывают появление микротрещин и изломов с образованием мелких частиц. При быстром нагружении переориентация частиц не успевает произойти и трещины возникают в основном на контактах микроблоков.

В процессе формирования плотной структуры дисперсного материала перекрываются поры, по которым могла бы мигрировать капиллярная вода из ниже лежащих слоев и перекрывается возможность поступления воды, выпадающей на поверхность уплотненного материала в виде осадков.

Появление дополнительных микротрещин при уплотнении выше $K_u=0,98...0,99$ может привести к дополнительным деформациям слоя уплотненного материала в осенне-зимний и зимне-весенний периоды. Поэтому необходимо очень осторожно относиться к назначению режимов работы уплотняющей техники, особенно на грунтовых основаниях. Для асфальтобетонных покрытий это не так критично, так как битумная составляющая материала имеет способность к «залечиванию» появляющихся микротрещин при переуплотнении.

Косвенное подтверждение фактору появления микротрещин при переуплотнении дает зависимость величины морозного пучения в зависимости от коэффициента уплотнения [9], показанная на рис.4.

Вторая стадия, образование мелких блоков и переход в блоки среднего размера, очевидно, требует и больших энергетических затрат. На этом этапе идет уже перемещение отдельных блоков по границе их контактов. Происходит вытеснение слабосвязанной воды и «защемленного» воздуха с внедрением пленок прочносвязанной воды друг

в друга, с образованием блоков минеральной части, окруженных вновь образованной пленкой прочносвязанной воды.

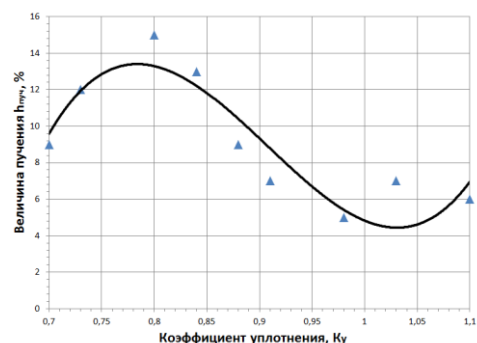


Рис.4. Зависимость величины морозного пучения мелкой супеси от плотности материала

Третья стадия самая энергозатратная, что связано с разрывом пленок прочносвязанной воды и внедрением отдельных блоков друг в друга.

Трехстадийный процесс формирования структуры дисперсного материала тесно связан с воздействием уплотняющей машины на материал. Очевидно, что и воздействие машины должно быть ступенчатым, разделенным на три стадии – с переходом от более легкой машины к более тяжелой (для машин статического действия) либо с использованием механизмов, позволяющих регулировать динамическое воздействие в процессе уплотнения [9, 10, 11, 12].

Однако, при использовании соответствующей спецтехники, первую стадию уплотнения можно исключить и применять только двухстадийное уплотнение дорожно-строительных материалов, что даст значительное сокращение по времени процесса формирования готового покрытия. Например, при использовании асфальтоукладчиков с вибрационной выглаживающей плитой и трамбующим бруском, возможно получить коэффициент уплотнения после укладочной машины равный 0,89-0,90 [13, 14], что уже соответствует второй стадии формирования структуры материала. При этом нет необходимости проводить первые проходы без вибрации, а можно сразу включать вибрационный режим работы уплотняющей машины, с выходом на пониженную вынуждающую силу вибратора [11, 15, 16]. Включение максимальной вынуждающей силы необходимо выполнить только в конце цикла уплотнения.

Выводы

1. Близкие в количественном отношении показатели для различных дисперсных материалов говорят о тождественности происходящих в них процессов. Вследствие этого, и модели, описывающие процесс деформирования различных дисперсных материалов, могут быть одними и теми же, с учетом характеристик уплотняемого материала. Этот вывод подтверждается работами других авторов [9, 17].

2. В процессе деформирования дисперсного материала четко прослеживаются три этапа изменения структуры: сближение разрозненных зерен материала и формирование блоков мелких зерен (соответствует $K_u=0,85-0,88$); сближение мелких блоков и переход в блоки среднего

размера (до $K_u = 0,97$); сближение и внедрение друг в друга средних и крупных блоков (K_u более 0,97).

3. Процесс формирования плотной и прочной структуры уплотняемого материала должен быть трехстадийным по регулированию динамического воздействия с учетом достигнутых коэффициентов уплотнения на каждой стадии. Например, без включения вибрации до достижения $K_u = 0,88$, с пониженной вынуждающей силой до достижения $K_u = 0,96$ и максимальной вынуждающей силой вибратора на последней стадии уплотнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чабуткин Е.К. Методика расчета режима работы вибрационного катка при уплотнении горячих асфальтобетонных смесей / Е.К. Чабуткин, И.С. Тюремнов, Ю.Г. Попов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012, – № 5(95), – С. 19-24.

2. Тюремнов И.С. Обзор реологических моделей взаимодействия виброролка с уплотняемым грунтом / И.С. Тюремнов, И.С. Филатов, А.С. Морев // Математика и математическое образование. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2012. – Вып. 8, – С. 234-241.

3. Филатов И.С., Морев А.С., Тюремнов И.С. К вопросу обоснования значений коэффициентов жесткости и вязкости грунта при реологическом моделировании процесса уплотнения / И.С. Филатов, А.С. Морев, И.С. Тюремнов // Шестидесят седьмая региональная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: тез. докл. (Ярославль, 23 апреля 2014) – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2014. – 429 с.

4. Guillo, E., Gautier, M., Boyer, F. Dynamic Modelling and Simulation of Compactor / 14th IFAC World Congress, Beijing, 1999.

5. Булычев В.Г. Механика дисперсных грунтов. – М.: Стройиздат, 1974. – 227 с.

6. Бабков В. Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. – М.: высш. шк., 1986. – 230 с.

7. ГОСТ 12801-98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. // Госстрой России, ГУП ЦПП. – М., 1999. – 28 с.

8. ГОСТ 9128-2009. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. – М., Стандартинформ, 2010. – 20 с.

9. Хархута Н.Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. / Н.Я. Хархута, Ю.М. Васильев – М.: Транспорт, 1975. – 288 с.

10. Согласование работы нескольких катков при уплотнении различных дорожно-строительных материалов: сборник ст.ФГУП РОСДОРНИИ ДОРОГИ И МОСТЫ / Гросс А.Р., Петухов В.Н., Чабуткин Е.К., Прусов А.Ю. – М.: 2007, – вып.17/1. – С. 82-89.

11. Чабуткин Е.К. Повышение эффективности применения вибрационных катков путем оптимизации их режимов работы. / Е.К. Чабуткин, И.С. Тюремнов, Ю.Г. Попов // Строительные и дорожные машины. – 2011. – №8, – С. 19-24.

12. Чабуткин Е.К. Эффективное использование катков. // Мир дорог. – 2018, – № 108. – С. 82-84.

13. Шестопалов К.К. Строительные и дорожные машины –М.: Издат. Центр «Академия», 2008. – 384с.

14. Технология и организация строительства автомобильных дорог. Дорожные покрытия: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В. П. Подольский, П. И. Поспелов, А. В. Глагольев, А. В. Смирнов; под ред. В. П. Подольского. — М.: Издат. центр «Академия», 2012. – 304 с.

15. Попов Ю.Г. Регулирование вынуждающей силы виброролка при уплотнении асфальтобетонных покрытий / Ю.Г. Попов, Н.Е. Тарасова, Е.К. Чабуткин // Международный семинар «Проблемы совершенствования конструкции строительных, дорожных, коммунальных и аэродромных машин»: материалы семинара. –М.: МАДИ, 2011. – С. 80-83.

16. Шумаков Д.О. Эффективное применение вибрационных катков. / Д.О. Шумаков, Е.К. Чабуткин // 63 региональная научн.техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов вузов с международным участием, посвященная 1000-летию Ярославля. – Ярославль, 2010, – 340 с.

17. Уплотняющие машины в строительстве и производстве строительных работ. / под ред. Ширковича С. В. – Куйбышев, 1962. – 197 с.

The Change of Structure of Dispersion Material under Dynamic Loads

Chabutkin E.K.

Yaroslavl State Technical University

Yaroslavl, Russia

chabutkin-ek@yandex.ru

Abstract. During the compaction of various road-building materials the efficiency of the process largely depends on the correct choice of the roller and the purpose of its operating modes. To increase the efficiency of the vibrating roller it is required to adjust the magnitude of the surface stresses under the roller with the growth of density of the material. The physical-mechanical processes of dispersion material structure for-

mation is studied in this paper. The paper also shows the similarity of these processes for various materials and shows the connection between the structure formation and the compaction rate.

Keywords: roller, compaction, dispersion material, material structure, load, dynamic effect.

Новый показатель для систем непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками

Тюремнов И.С., Морев А.С.
Ярославский государственный технический университет
Ярославль, Россия
tyuremnovis@yandex.ru, asmorev@bk.ru.

Аннотация. В данной статье обоснована необходимость совершенствования методов контроля качества уплотнения дорожно-строительных материалов и применения систем непрерывного контроля качества уплотнения в составе вибрационных катков для обеспечения документирования и контроля качества 100 % площади уплотняемой поверхности. Рассмотрены показатели уплотнения грунта, на расчете которых основана работа современных систем непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками AMMANN/CASE, BOMAG, CATERPILLAR, DYNAPAC, SAKAI и VOLVO. Указана важность учета различных режимов работы вибрационного катка: постоянный контакт, частичный отрыв и двойной прыжок и других, а также индикации перехода вальца в нежелательный режим колебаний двойной прыжок. Проанализированы особенности показателей уплотнения, расчет которых основан на анализе спектра ускорений вибрационного вальца, а также показателей, учитывающих прочностные характеристики уплотняемого материала. Обоснована необходимость создания отечественной системы непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками. Представлен новый перспективный показатель уплотнения для такой системы. Использование предложенного показателя CV позволяет более тонко настраивать систему непрерывного контроля уплотнения вибрационного катка на определенный вид материала. Также это позволяет повысить чувствительность системы непрерывного контроля к изменению характеристик уплотняемого грунта.

Ключевые слова: грунт, уплотнение, вибрация, каток, вибрационный, контроль уплотнения непрерывный, показатель уплотнения грунта.

ВВЕДЕНИЕ

В современном дорожном строительстве применяется вибрационная уплотняющая техника высокого технического уровня. При этом значительное внимание уделяется и контролю качества выполнения работ по уплотнению грунта. Недоуплотнение грунта и каменных материалов является одной из возможных причин нарушения ровности и преждевременного разрушения автодорог. Прочность и устойчивость слоев автомобильных дорог обеспечивается как правильным выбором дорожно-строительных материалов, так и обеспечением нормативного (или выше) качества уплотнения их слоев. В связи с этим, уплотнение в дорожном строительстве – одна из ключевых операций.

В настоящее время в России проверка качества уплотнения грунта в дорожном строительстве проводится в соответствии с СП 78.13330.2012 «Свод правил. Автомобильные дороги». При этом проверка носит выборочный характер, затрагивая всего лишь около 0,02% от всей площади

уплотненного участка [1]. У операторов вибрационных грунтовых катков отечественного производства отсутствует информация о состоянии уплотняемого материала в процессе производства работ (уплотнении грунта), что, в свою очередь, не позволяет своевременно обнаруживать и устранять недоуплотненные участки и обеспечивать длительную прочность и ровность автомобильных дорог. Особенно актуален вопрос контроля качества уплотнения каменных материалов, так как в нормативных документах Российской Федерации отсутствуют объективные критерии, по которым можно оценить качество их уплотнения.

Данную задачу решают системы, устанавливаемые на вибрационный каток и в реальном времени измеряющие изменение состояния уплотняемых материалов. Непрерывное измерение характеристик грунта в процессе уплотнения его вибрационным катком за рубежом получило определение «непрерывный контроль уплотнения» (Continues Compaction Control).

Ведущие зарубежные производители вибрационных катков, такие как, AMMANN, BOMAG, CATERPILLAR, DYNAPAC, SAKAI, уже достаточно давно включают в базовую комплектацию своих машин системы, позволяющие непрерывно контролировать состояние уплотняемого грунта во время производства работ и документировать результат уплотнения (табл. 1).

Таблица 1
Системы непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков различных производителей

| Производитель | Наименование системы | Показатель уплотнения |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------|
| AMMANN/CASE | ACE (Ammann Compaction Expert) | k_s |
| BOMAG | Terrameter | Omega |
| | VarioControl | E_{vib} |
| CATERPILLAR | AccuGrade Compaction | CMV, RMV, MDP |
| DYNAPAC | DCA (Dynamac Compaction Analyzer) | CMV, RMV |
| HAMM | HCQ (Hamm Compaction Quality) | HMV (аналогично CMV) |
| SAKAI | Sakai | CCV |
| VOLVO | CompAnalyzer, CompGauge | CMV, RMV |

В России же такие системы не производятся. Это не только не позволяет на должном уровне конкурировать отечественным производителям на рынке уплотняющей техники, но и является одним из факторов, приводящих к низкому качеству и сроку службы автомобильных дорог в РФ.

При уплотнении грунтов вибрационными катками в широких пределах могут изменяться свойства уплотняемого грунта (вид грунта, его плотность и влажность), а также режим работы катка (частота колебаний, вынуждающее усилие вибровозбудителя, характер колебаний, скорость движения вибрационного катка). На работу систем непрерывного контроля уплотнения оказывают влияние неравномерность распределения характеристик уплотняемого грунта и наличие переходных процессов при изменении режима работы вибровозбудителя катка.

Исследователи и производители вибрационных катков выделяют следующие режимы колебаний вибрационного вальца вибрационного катка при уплотнении грунта [2]: безотрывный режим колебаний (Continuous contact), частичный отрыв (Partial uplift), двойной прыжок (Double jump), раскачивание вибрационного вальца (Rocking motion) и хаотический режим колебаний (Chaotic motion).

При работе вибрационного катка в режиме постоянного контакта с уплотняемым грунтом, колебания вибрационного вальца и грунта носят синусоидальный характер с равными амплитудами смежных колебаний рабочего органа (вибрационного вальца) [3].

Режим частичного отрыва вибрационного вальца от уплотняемого грунта – основной режим работы вибрационного катка. В каждом цикле колебаний рабочий орган отрывается от грунта, но при этом сохраняется синусоидальный характер колебаний и равенство амплитуд смежных колебаний вальца. Во время отрыва вибрационного вальца от грунта грунт восстанавливается с затухающей скоростью.

При переходе из режима частичного отрыва в режим двойного прыжка характер колебаний вибрационного вальца изменяется на субгармонический. Амплитуды смежных колебаний вибрационного вальца не одинаковы, что приводит к ухудшению управляемости вибрационного катка, увеличению нагрузки на подшипниковые узлы вибрационного вальца и крепления вальца к раме, а также негативно сказывается на эффективности процесса уплотнения. Поэтому, важно отслеживать переход в нежелательный режим работы вибрационного вальца (режим двойного прыжка).

При изменении режима работы вибрационного катка изменяется характер колебаний и, следовательно, спектр вертикальных ускорений вибрационного вальца. При увеличении степени уплотнения грунта увеличивается амплитуда колебаний вибрационного вальца и в спектре ускорения появляются дополнительные гармоники и субгармоники. В 1975 году доктор Heinz Thurner с партнером Oke Sandström основал фирму GEODYNAMIK, чтобы продолжить развитие устанавливаемых на вибрационные грунтовые катки систем непрерывного контроля уплотнения грунта (а в дальнейшем и не только для грунтовых, но и для асфальтовых вибрационных катков). В сотрудничестве с доктором Lars Forssblad из фирмы DYNAPAC, фирма GEODYNAMIK разработала и внедрила показатель уплотнения *Compaction Meter Value* (далее *CMV*) в 1978 году [4, 5].

Определение *CMV* основано на анализе спектра вертикальных ускорений (данные с акселерометра) вибрационного вальца вибрационного катка за два цикла вибрации. Показатель уплотнения *CMV* рассчитывается [4, 6]:

$$CMV = C \cdot A_{2f} / A_f, \quad (1)$$

где: A_f - амплитуда гармоники спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца на частоте изменения вынуждающего усилия f (номинальная частота колебаний вальца вибрационного катка) (рис. 1), м/с²; A_{2f} - амплитуда гармоники спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца на частоте $2f$ (амплитуда второй гармоники спектра вертикального ускорения вибрационного вальца) (рис. 1), м/с²; C – коэффициент калибровки (согласно источнику [6] чаще всего равный 300).

Анализ спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца вибрационного катка положен также в основу расчета резонансного показателя уплотнения грунта *Resonance Meter Value* (далее *RMV*), называемого еще также *Bouncing Value* (далее *BV*) [4]:

$$RMV = BV = C \cdot A_{0.5f} / A_f, \quad (2)$$

где: $A_{0.5f}$ – амплитуда субгармоники спектра вертикального ускорения вибрационного вальца вибрационного катка на частоте $0.5f$ (рис. 1), м/с².

Показатель уплотнения *RMV* позволяет индцировать переход вибрационного вальца вибрационного катка из режима частичного отрыва (partial uplift) в нежелательный режим двойного прыжка (double jump).

Системы непрерывного контроля уплотнения грунта, работа которых основана на расчете показателей *CMV* и *RMV*, применяются на вибрационных катках фирм CATERPILLAR, DYNAPAC и VOLVO.

Североамериканская фирма TRIMBLE, специализирующаяся на производстве различного геодезического оборудования, предлагает систему непрерывного контроля CCSFlex, работа которой также основана на расчете показателя *CMV* [7].

На осцилляторных катках HAMM используются системы непрерывного контроля уплотнения грунта, работа которых основана на расчете показателя уплотнения *Oscillo Meter Value* (далее *OMV*), который является аналогом показателя уплотнения *CMV*. Для расчета показателя *OMV* производится анализ ускорений оси вибрационного вальца в горизонтальной плоскости [6]. Причем алгоритм расчета *OMV* изменяется в зависимости от наличия проскальзывания между вибрационным вальцом и грунтом [8].

В 2004 году японский производитель строительной техники SAKAI предложил свой показатель уплотнения грунта для систем непрерывного контроля - *Compaction Control Value* (далее *CCV*) [9, 10]. Данный показатель уплотнения грунта используется в настоящее время в системах непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационных катков SAKAI.

Расчет показателя уплотнения *CCV* также основан на анализе спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца вибрационного катка. При определении *CCV* в дополнение к амплитудам гармоник спектра вертикального ускорения вибрационного вальца с частотами изменения вынуждающего усилия f и $2f$ (рис. 1), учитываются амплитуда гармоники спектра вертикального ускорения на частоте $3f$, а также субгармоники на частотах $0,5f$, $1,5f$, $2,5f$ [9, 10]:

$$CCV = (A_{0.5f} + A_{1.5f} + A_{2f} + A_{2.5f} + A_{3f} / A_{0.5f} + A_f) \cdot 100\%,$$

где: $A_{1,5f}$ - амплитуда субгармоники спектра вертикального ускорения вибрационного вальца на частоте $1,5f$, м/с²; $A_{2,5f}$ - амплитуда субгармоники спектра вертикального ускорения вибрационного вальца на частоте $2,5f$, м/с²; A_{3f} - амплитуда гармоники спектра вертикального ускорения вибрационного вальца на частоте $3f$, м/с².

В настоящее время, системы непрерывного контроля уплотнения, работа которых основана на расчете показателей уплотнения грунта *CMV* и *RMV*. Одними из самых распространенных. Однако системы на базе расчета *CMV* и *RMV* определяют не прочностные свойства грунта, а косвенные показатели, основанные на анализе спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца катка. Основной же целью уплотнения грунта является обеспечение прочности грунта, т.е. способности выдерживать динамические и статические нагрузки от транспорта, вышележащих слоев грунта и дорожных одежд. Поэтому ведущие производители вибрационных катков не стали ограничиваться показателями уплотнения *CMV* и *RMV* и разрабатывали альтернативные подходы к реализации непрерывного контроля уплотнения грунта [11].

Показатель уплотнения *Machine Drive Power* (далее), который используется в системах непрерывного контроля уплотнения на вибрационных катках фирмы *CATERPILLAR* совместно с показателями уплотнения *CMV* и *RMV* [7], является одной из альтернатив показателей, расчет которых основан на анализе спектра ускорений вибрационного вальца. Применение показателя уплотнения *MDP* для контроля процесса уплотнения грунта основано на уменьшении глубины погружения вибрационного вальца в грунт и снижении сопротивления передвижению катка при увеличении плотности грунта в процессе уплотнения его вибрационным катком [12]:

$$MDP = P_g - W \cdot V \cdot (\sin \theta + a/g) - (b_1 \cdot V + b_2), \quad (4)$$

где: P_g - мощность, требуемая для движения вибрационного катка, Вт; W - вес вибрационного катка, Н; V - скорость движения вибрационного катка, м/с; θ - преодолеваемый продольный уклон, рад; a - ускорение движения вибрационного катка, м/с²; g - ускорение свободного падения, м/с²; b_1, b_2 - коэффициенты внутренних потерь (у каждого катка различное значение коэффициентов); $(b_1 \cdot V + b_2)$ - слагаемое, характеризующее затраты мощности, связанные с внутренними потерями; $W \cdot V \cdot (\sin \theta + a/g)$ - слагаемое, характеризующее затраты мощности, связанные с продольным уклоном.

Известный немецкий производитель уплотняющей техники фирма *BOMAG* в 1982 году предложила показатель уплотнения *Omega* для обеспечения работы системы непрерывного контроля уплотнения грунта *Terrameter*. Показатель уплотнения *Omega* характеризует энергию, передаваемую в грунт при работе вибрационного катка на уплотняемом участке. Сила реакции грунта F_s , возникающая при деформировании грунта, изменяется в процессе уплотнения в зависимости от глубины погружения вибрационного вальца в грунт (вертикального перемещения вибрационного вальца z_d), режима работы дебалансного узла и характеристик грунта: типа, плотности и влажности.

Акселерометр, установленный на раме вибрационного вальца, производит постоянную регистрацию ускорений вибрационного вальца в процессе колебаний. Показатель

уплотнения *Omega* рассчитывается путем интегрирования кривой $F_s - z_d$ (реакция грунта относительно перемещения вибрационного вальца) во время уплотнения грунта вибрационным катком за два последовательных цикла вибрации [2]:

$$Omega = \oint_{2T} (-m_d \cdot \ddot{z}_d + (m_d + m_f) \cdot g + m_0 e_0 \cdot \omega^2) \dot{z}_d dt,$$

где: z_d - скорость перемещения вальца, м; \ddot{z}_d - вертикальное ускорение вальца, м/с²; $m_0 e_0$ - момент эксцентриковых масс, кг·м; ω - круговая частота колебаний, рад/с; m_d - масса вибрационного вальца, кг; m_f - масса рамы вибрационного вальца, кг.

В конце 1990-х годов компания *BOMAG* представила показатель уплотнения грунта *Вибрационный модуль E_{vib}* . Расчет разности фаз колебаний эксцентриков дебалансного модуля и вальца катка, а также реакции грунта F_s , осуществляется на основании двухмассной реологической модели. После расчета перемещения вибрационного вальца z_d составляются диаграммы $F_s - z_d$ для каждого цикла колебаний и измеряется тангенс угла наклона определенного участка полученной кривой $F_s - z_d$ к оси z_d .

Значения F_s, z_d и угла наклона касательной сравниваются с теоретическими, рассчитываемыми по зависимостям, которые предложил D. Lundberg в 1939 году при исследовании статического взаимодействия жесткого цилиндра с упругим изотропным полупространством с модулем упругости E (рис. 2) [4]:

$$z_d = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot F_s}{\pi \cdot E \cdot L} \left(1,8864 + \ln \frac{L}{b} \right), \quad (6)$$

где: ν - коэффициент Пуассона; F_s - сила реакции грунта, Н; b - длина хорды, стягивающей погруженную в грунт часть окружности вибрационного вальца, м; L - ширина вибрационного вальца, м.

Для определения показателя уплотнения вибрационного модуля *E_{vib}* используется номограмма зависимости реакции грунта от перемещения вибрационного вальца [4].

В 1990 году компания *AMMANN* представила показатель уплотнения *Коэффициент жесткости (k_s)*. Значение коэффициента k_s определяется на основании анализа диаграммы отношения силы реакции грунта и перемещения вибрационного вальца $F_s - z_d$ [13]:

$$k_s = \omega^2 \cdot (m_d + m_0 e_0 \cdot \cos \varphi / z_d), \quad (7)$$

где: ω - круговая частота колебаний вибровозбудителя, рад/с; m_d - масса вибрационного вальца, кг; $m_0 e_0$ - момент эксцентриковых масс, кг·м; φ - разность фаз колебаний вибровозбудителя и вибрационного вальца, град.

Коэффициент k_s рассчитывается как тангенс угла наклона прямой, проходящей через точки максимального погружения вибрационного вальца в уплотняемый грунт (значение $z_{d \max}$) и статического веса вибрационного вальца (F_{static}). Значения перемещений вибрационного вальца $z_{d \max}$ рассчитывается через интегрирование значений ускорений вальца (данные с акселерометра, устанавливаемого на раму вибрационного вальца).

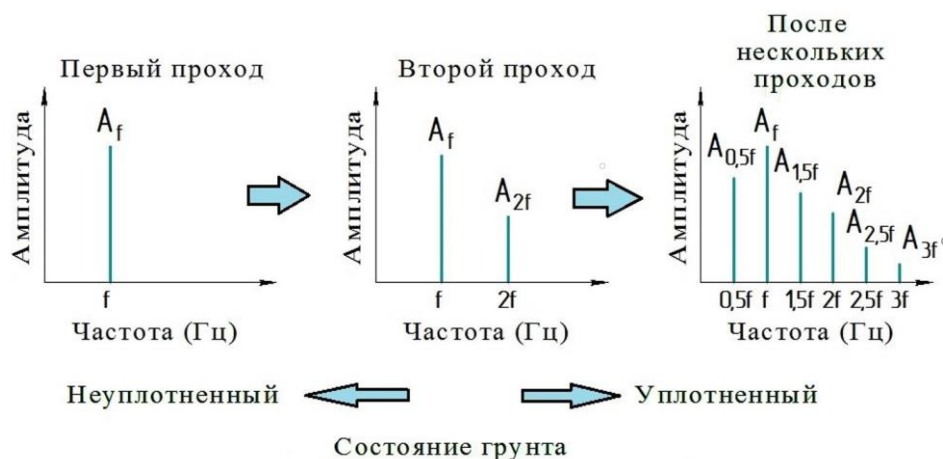


Рис. 1. Изменение спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца вибрационного катка в процессе уплотнения [8, 9, 10]

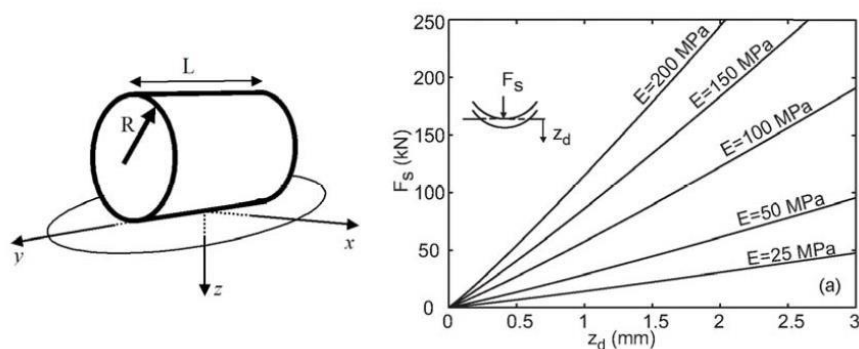


Рис. 2. Вибрационный валец на упругом полупространстве и связь между жесткостью k и модулем E [4]

Работа наиболее совершенных систем непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками ведущих мировых производителей основана на моделировании взаимодействия вибровальца вибрационного катка с уплотняемым грунтом реологическими моделями различной сложности и использовании показаний акселерометра, установленного на вибрационном вальце вибрационного катка для расчета характеристик плотности (прочности) уплотняемого материала [14].

Анализ показателей, на основе которых функционируют системы непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками ведущих мировых производителей, показывает, что большинство производителей используют системы, основанные на анализе спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца.

На основании анализа вышеперечисленных показателей, на кафедре «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета разработан новый показатель для функционирования системы непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков *Compaction Value (CV)* [15]:

$$CV = \left(\frac{K_{0,5f} \cdot A_{0,5f} + K_{1,5f} \cdot A_{1,5f} + K_{2f} \cdot A_{2f} + K_{2,5f} \cdot A_{2,5f} + K_{3f} \cdot A_{3f}}{K_{0,5f} \cdot A_{0,5f} + K_f \cdot A_f} \right) \cdot K,$$

где: K – общий тарифовочный коэффициент; $K_{0,5f}$, K_f , $K_{1,5f}$, K_{2f} , $K_{2,5f}$, K_{3f} – коэффициенты значимости амплитуд гармоник спектра ускорения вибрационного вальца на частотах $0,5f$, f , $1,5f$, $2f$, $2,5f$, $3f$ соответственно.

Использование коэффициентов значимости амплитуд гармоник спектра ускорений вибрационного вальца при расчете значений показателя CV позволяет более тонко настраивать системы непрерывного контроля уплотнения на определенный вид материала. Также это позволяет повысить чувствительность данного показателя к изменению характеристик уплотняемого грунта. На основе показателя CV возможна разработка отечественной системы непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков, что актуально для решения задач повышения качества автомобильных дорог и реализации программы импортозамещения в дорожно-строительном машиностроении Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тюремнов И.С. Современное состояние и конструктивные особенности вибрационных катков // Мир дорог. – 2009. – №42 (сентябрь). – С. 64 – 69.
2. Adam D. Standardization, Design, Quality Assurance and Monitoring of Earth Works in Road Engineering in Austria // Vienna University of Technology Institute for Ground Engineering and Soil Mechanics Budapest. – 2007. – P. 33.

3. Тюремнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и «интеллектуальное уплотнение» // Вестник ТОГУ. – 2016, – №2(41). – С. 115-122.

4. Mooney M. A. Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork Compaction: An Overview / M. Mooney, D. Adam // Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 2004. – p. 1-12.

5. Compactometer, compaction meter for vibratory rollers. ALFA-022R [Электронный ресурс] / Geodynamik. The company on safe ground service. [Официальный сайт] URL: <http://www.geodynamik.com/languages/pdf/malgb010.pdf> (дата обращения: 05.12.16).

6. Sandström, A. J. Intelligent Systems for QA/QC in soil compaction / A. J. Sandström, C. B. Pettersson // GEODYNAMIK HT AB Box 7454 SE-103 92. - Stockholm, Sweden. – p. 1-17.

7. Trimble CCSFlex and GCS900/AccuGrade Compaction Control System for Soil and Asphalt Compactors [Электронный ресурс] / URL: http://www.webpages.uidaho.edu/bayomy/IAC/52nd/Presentations_52nd/9.%20GPS%20Controls%20for%20Construction%20Equipment_Hasslbauer.pdf (дата обращения: 05.11.18).

8. Тюремнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 1 / И.С. Тюремнов, А.С. Морев // Вестник ТОГУ. – 2015, – №4(39). – С. 99-108.

9. Scherocman, J. A. Intelligent Compaction, Does It Exist? [Электронный ресурс] / J. A. Scherocman, S. Rakowski, K.

Uchiyama. // Intelligent Compaction. [Официальный сайт] URL: http://www.intelligentcompaction.com/downloads/PapersReports/Saikai_Jim%20Sherocman_IC%20Does%20it%20Exist_CTAA_2007.pdf (дата обращения: 05.12.16).

10. Chang, G. K. Accelerated implementation of intelligent compaction technology for embankment subgrade soils, aggregate base, and asphalt pavement materials // G.K. Chang, Q. Xu, R. Rasmussen, D. Merritt, L. Michael, D. White, B. Horan // IC Data Management, Federal Highway Administration Office of Pavement Technology, 2010, P. 118. [Электронный ресурс]. URL:

http://www.intelligentcompaction.com/downloads/Reports/FHWA-TPF_IC_Final_Report.pdf (дата обращения 15.04.2014).

11. Тюремнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 2 / И. С. Тюремнов, А. С. Морев // Вестник ТОГУ. - 2015. №1(40) - с. 69-76.

12. White, D. J. A review of roller-integrated compaction monitoring technologies for earthworks / D. J. White, P. KR. Vennapusa // Earthworks Engineering Research Center (EERC). Final Report ER10-04. – April 2010. – P. 31.

13. Mooney M.A. Intelligent Soil Compaction Systems / M.A. Mooney, R.V. Rinehart, N.W. Facas, O.M. Musimbi // National cooperative Highway Research Program 676.

14. Морев А.С. Обоснование показателя уплотнения грунта для системы непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками: автореф. дис. канд. техн. наук. – Ярославль, 2017. – 9 с.

New Criterion for Continuous Compaction Control Systems by Soil Vibratory Rollers

Tyuremnov I.S., Morev A.S.

Yaroslavl State Technical University

Yaroslavl, Russia

tyuremnovis@yandex.ru, asmorev@bk.ru

Abstract. This article substantiates the need to improve methods for monitoring the quality of compaction of road-building materials and the use of continuous compaction control systems in the composition of vibratory rollers to ensure documentation and quality control of 100% of the compaction surface. The criteria of soil compaction are considered, based on which the work of modern systems for the continuous compaction control by Ammann/Case, Bomag, Caterpillar, Dynapac, Sakai and Volvo rollers is based. The importance of considering the different modes of operation of the vibration roller: constant contact, partial separation and double jump and others, as well as indications of the transition of the drum to the undesired mode of oscillations double jump is indicated. The characteristics of compaction indicators are ana-

lyzed, the calculation of which is based on the analysis of the acceleration spectrum of the vibration roller, as well as indicators considering the strength characteristics of the material to be compacted. The necessity of creating a domestic continuous compaction control system by vibratory rollers has been substantiated. A new promising compaction criterion for such a system is presented. The use of the proposed CV index makes it possible to fine-tune the continuous compaction control systems of the vibratory roller to a specific type of material. It also allows to improve the sensitivity of the continuous control system to changes in the characteristics of the soil being compacted.

Keywords: soil, compaction, vibration, vibratory roller, continuous compaction control, soil compaction criterion.

Оценка тепловой нагруженности пар трения автоматизированной тормозной системы автомобиля

Дыгало В.Г., Жуков И.С.

Волгоградский государственный технический университет
Волгоград, Россия
dygalo@vstu.ru

Аннотация. Изложен подход к предпроектной оценке тепловой нагруженности элементов тормозного механизма у автомобилей с АБС. Основная суть которого состоит в том, что большая часть кинетической энергии автомобиля с АБС гасится за счет работы трения в тормозном механизме. Перегрев тормозного механизма, а именно его пар трения приводит к возникновению явления критического фединга, сопровождающегося резким снижением тормозного момента. Предлагается методика определения энергии погашенной в тормозном механизме с АБС с помощью трех подходов. Основным из которых является соотношение продольной реакции и тормозного момента связанные динамическим радиусом колеса. Так как скорость вращения колеса от времени, автомобиля с АБС при торможении меняется по сложному закону, нахождение пути трения как составляющего энергетического баланса строится на линеаризации функции скорости. Нахождение погашенной энергии необходимо для проведения теплового расчета деталей тормозной системы в том числе с использованием метода конечных элементов. Исследование явилось основой для создания компьютерной модели температурного поля тормозного механизма, что в целом дает возможность говорить о системе расчета тепловой нагруженности тормозных механизмов с АБС.

Ключевые слова: автомобиль, антиблокировочная система, тормозной механизм, термическая нагруженность, фединг.

ВВЕДЕНИЕ

Все более широкое оснащение автомобилей автоматизированными тормозными системами, такими как – антиблокировочные системы (АБС), помимо очевидных преимуществ в части активной безопасности, порождает и ряд проблем, обусловленных изменением рабочего процесса. В частности, это относится к получившим популярность в последние годы скоростным автомобилям J-класса – кроссоверами и внедорожниками, которые, как правило, при сохранении скоростного режима обладают повышенной массой по сравнению с обычными легковыми автомобилями. При этом возрастает величина кинетической энергии, которую необходимо погасить в процессе торможения.[1]

Вместе с тем, в отличие от традиционного способа торможения юзом, основная часть кинетической энергии автомобиля с АБС гасится за счет работы трения в тормозном механизме[2], что неизбежно приводит к увеличению их тепловой нагруженности, особенно при использовании производителями тормозных систем автомобилей, традиционных элементов базовых моделей.

При этом из литературных источников известно, что перегрев пар трения тормозов способствует возникновению критического фединга, сопровождающегося резким

снижением (до 50%) коэффициента трения тормозных накладок, а так же повышенным изнашиванием контртел, с образованием макросколов [2-5]. Поэтому необходима оценка тепловой нагруженности пар трения тормозных механизмов автомобилей оснащенных автоматизированными системами.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В ПРОЦЕССЕ ТОРМОЖЕНИЯ

Проведенный анализ влияния принципиального изменения рабочего процесса затормаживания колеса автомобиля с АБС на распределение работы, необходимой для гашения кинетической энергии автомобиля в качестве примера представлен на рисунке 1. На графике обозначено: изменение кинетической энергии автомобиля с АБС при торможении с начальной скорости 60 км/ч на сухом асфальтобетоне в процессе торможения (W_k), работа, затрачиваемая на трение в контакте шины с дорогой (ATR) и на гистерезисные потери в шине (AFF), а также поглощаемую в тормозном механизме (ATM).[6]

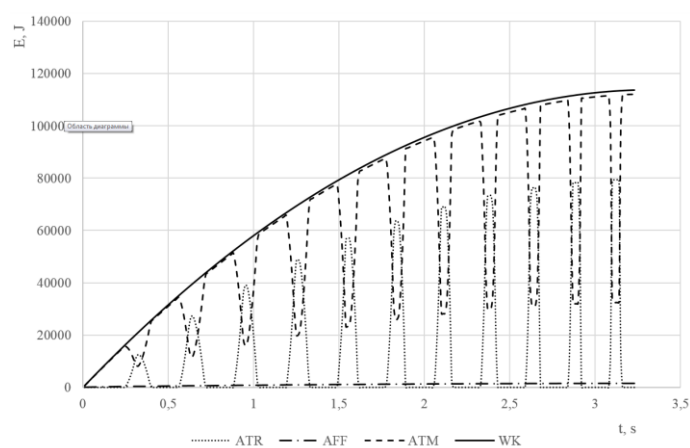


Рис. 1. Распределение работ, затрачиваемых на гашение кинетической энергии автомобиля с АБС в процессе торможения

Из графика видно, что торможении автомобиля с АБС в отличие от торможения юзом основная часть кинетической энергии гасится за счет работы трения в парах трения тормозного механизма. Поэтому несмотря на развитие технологий проектирования и расчета, оценка вероятности возможного отказа тормозов автомобиля в процессе эксплуатации по причине фединга является актуальной задачей. Важно, чтобы при проектировании тормозных меха-

низмов автомобилей с АБС производители имели возможность оценивать эффективность их работы еще на стадии предпроектного расчета. Расчет средней температуры фрикционных элементов в процессе торможения представляет большой интерес при оценке температурного режима работы тормоза и может быть особенно полезен в случаях, когда непосредственный замер температур в реальных точках контакта и поверхности трения в целом затруднен.

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ТЕПЛОАГРУЖЕННОСТИ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Для решения этой задачи необходимо иметь расчетные методики, позволяющие анализировать такие рабочие характеристики как изменение в процессе торможения момента трения, температуры поверхности тормозных дисков, скорости и продолжительности торможения, а также совершаемой работы в зависимости от физико-механических и теплофизических свойств материалов фрикционной пары, а также конструктивных, силовых и кинематических параметров тормоза.

Величину средней температуры пар трения, учитывая кратковременность торможения, без учета теплоотдачи в окружающую среду, можно определить по зависимости, полученной профессором А.В. Чичинадзе [7-10]

$$g^* = \frac{W_{w.B.} (1 - \alpha_{w.B.}^*) b_1}{\lambda_1 A_{a1} t_T} \left[\frac{1}{3} \tau_N + \tau_W F_{01} \right] \quad (1)$$

где: $W_{w.B.}$ – полная работа торможения; $\alpha_{w.B.}^*$ – коэффициент распределения тепловых потоков; A_{a1} – номинальная площадь трения; t_T – продолжительность торможения; $\lambda_{1,2}$ – коэффициент теплопроводности; τ_N, τ_W – временные характеристики мощности и работы; F_{01} – числа Фурье фрикционных элементов.

В свою очередь, коэффициент распределения тепловых потоков, необходимый для расчета тепловых полей, может быть найден из выражения

$$\alpha_{w.B.}^* = 1 / \left[1 + \frac{b_1 \lambda_2}{b_2 \lambda_1} \left(\frac{\frac{1}{3} \tau_N + F_{02} \tau_W}{\frac{1}{3} \tau_N + F_{01} \tau_W} \right) \right] \quad (2)$$

где $b_{1,2}$ – толщина фрикционных элементов.

Приведенные зависимости позволяют выполнить расчет средней температуры тормозных дисков с помощью конечно-элементных программных комплексов [11-15] при известной полной работе торможения. Исходными параметрами в них служат детали и сборка тормозных механизмов, величины тепловых потоков, коэффициентов теплоотдачи. Так, в качестве примера на рисунке 2 показана модель распределения температуры тормозного диска автомобиля с АБС при коэффициенте конвективной теплоотдачи 35 Вт/м²·К и температуре окружающей среды 294 К [16], полученная при использовании конечно-элементного программного комплекса.

Как было указано выше, для применения полученных А.В. Чичинадзе [7-10] зависимостей необходимо нахождения полной работы торможения на основе величины тормозной силы на диске и длины пути трения тормозного диска. На стадии предпроектного анализа для определения

тормозной силы возможны несколько подходов. Наиболее перспективным является подход, основанный на определении приведенной к тормозному диску работы торможения, которую с достаточной точностью можно найти через соотношение продольной реакции и тормозного момента. [17]

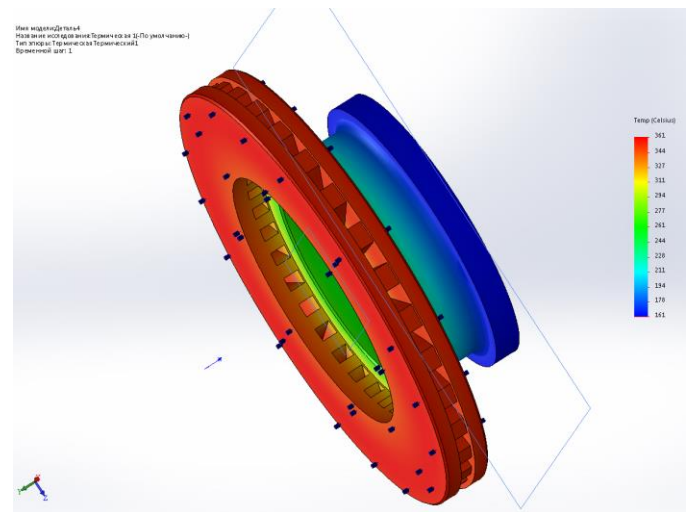


Рис. 2. Модель распределения температуры тормозного диска транспортного средства с АБС

Для этого свяжем их величиной динамического радиуса. Несмотря на условность такого соотношения этого достаточно для оценки величины необходимой работы. Тормозной момент на колесе определяется по известной зависимости [18]

$$M_{te} = R_x \cdot r_0 \quad (3)$$

Для определения величины продольной реакции воспользуемся степенью использования максимального коэффициента сцепления ξ_{abs} при функционировании антиблокировочной тормозной системы. Тогда выражение для продольной реакции колеса примет вид

$$R_x = R_z \cdot \varphi_{max} \cdot \xi_{abs} \quad (4)$$

Величина ξ_{abs} определится из требований, предъявляемых стандартами к эффективности торможения автомобиля с АБС. Так, для сухого асфальтобетона она должна быть не ниже уровня торможения юзом $\xi_{abs} = 0,9$, для мокрого и укатанного снега $\xi_{abs} = 0,85$ [19]. Введение в расчет данного показателя существенно упрощает процесс расчета и позволяет исключить рассмотрение зависимостей работы алгоритма конкретно взятой антиблокировочной системы, поскольку сам алгоритм и матрица значений блока управления антиблокировочной системы часто являются коммерческой тайной производителей тормозных систем.

Значение тормозной силы по средней окружности тормозного диска найдется из выражения:

$$P_b = 2 \frac{M_{te}}{r_{disc}} \quad (5)$$

где r_{disc} – радиус тормозного диска.

С учетом зависимости (4) получим выражение для тормозной силы в виде

$$P_b = 2 \frac{R_z \cdot \varphi_{\max} \cdot \xi_{abs} \cdot r_{din}}{r_{disc}} \quad (6)$$

ПУТЬ ТРЕНИЯ

Для нахождения полной работы трения в тормозном механизме необходимо знать путь трения в паре «тормозной диск – колодка». Теоретические предпосылки для определения пути трения отдельного колеса автомобиля в режиме торможения изложены в работе [20].

Вращение каждого отдельного колеса автомобиля с АБС при торможении характеризуется различным сочетанием скоростных режимов, обусловленных функционированием тормозной системы и контактом шины с дорожным покрытием, что представлено на приведенной на рис. 3 схеме.

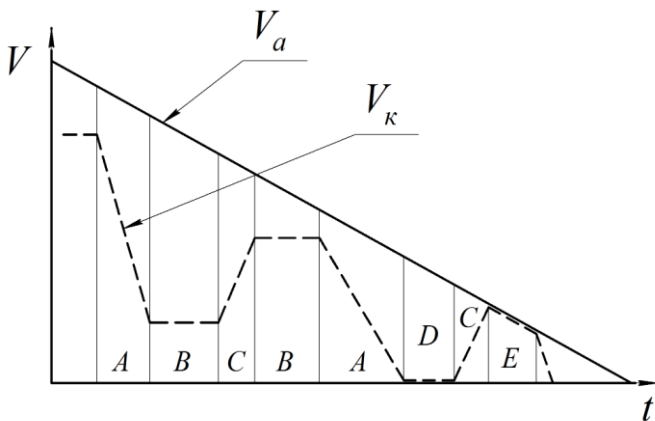


Рис. 3. Варианты периодов при торможении:

А – затормаживание, В – квазиравномерное вращение, С – растормаживание, D – юз, Е – свободное вращение (полное растормаживание), V_a – скорость автомобиля, V_k – приведенная радиальная скорость вращения колеса.

При этом, можно выделить следующие характерные периоды: затормаживание, растормаживание, блокировка или юз колеса, свободное качение и квазиравномерное движение в области $\dot{\omega}_k \approx 0$.

Каждый период характеризуется различным сочетанием скоростных и нагрузочных показателей. Учитывая кратковременность протекания цикла работы АБС примем допущение, что каждый период характеризуется установившимся замедлением (ускорением) $j_{уст}$ и средней скоростью.

При одних и тех же значениях тормозного пути автомобиля с АБС и без неё могут быть реализованы различные характеристики для пар трения «барабан (диск)–накладку» и «шина–дорога». Для расчета пути трения в каждом сопряжении тормозных механизмов «диск–накладку» воспользуемся зависимостью

$$L_{Tp} = (V_{hk} + V_{kk})(t_{kk} - t_{hk})(r_d / r_k) / 2 \quad (7)$$

или

$$L_{Tp} = (V_{H,K}^2 - V_{K,K}^2) / 2j_{const,K} \quad (8)$$

где: $V_{H,K}$, $V_{K,K}$ – радиальная скорость вращения колеса в начале и в конце промежутка времени; $t_{H,K}$, $t_{K,K}$ – моменты времени в начале и в конце промежутка времени; r_d – радиус тормозного барабана; r_k – радиус колеса.

Пути трения для каждого из периодов определяется из приведенных ниже зависимостей.

Период затормаживания и растормаживания

$$L_{Tp} = (V_{H,K}^2 - V_{K,K}^2) / 2j_{const,K} \quad (9)$$

где: $V_{H,K}$, $V_{K,K}$ – скорость вращения колеса в начале и в конце периода, $j_{уст,K}$ – установившееся ускорение вращения колеса, r_k – радиус колеса, r_o – средний радиус тормозного диска.

Свободное качение колеса $L_{Tp} = 0$,

Блокирование колеса $L_{Tp} = 0$,

Постоянное (квазиравномерное) вращение колеса

$$L_{Tp} = V_{H,K} \cdot t_r \quad (10)$$

где: t_r – длительность периода равномерного вращения колеса.

Для нахождения общего пути трения на всех участках просуммируем полученные выше зависимости

$$L_{Tp,pf} = \sum_{i=0}^I L_{TpTi} + \sum_{i=0}^J L_{TpPj} + \sum_{i=0}^N L_{TpDn} \quad (11)$$

где: $L_{mp,pf}$ – путь трения накладку о барабан; I – количество участков торможения; J – количество участков растормаживания; N – количество участков постоянного качения колеса; L_{TpTi} – путь трения для пары «диск – накладку» на i -ом участке торможения; L_{TpPj} – путь трения для пары «диск – накладку» на j -ом участке растормаживания; L_{TpDn} – путь трения для пары «диск – накладку» на n -ом участке торможения постоянного качения колеса.

Окончательно приведенная к тормозному диску работа трения определяется из выражения:

$$W_{W.B.} = L_{Tp} P_m \quad (12)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вследствие явления несинхронного вращения колес автомобиля в процессе торможения, что обусловлено различными факторами как при наличии АБС, так и без нее, тормозные механизмы даже одной оси автомобиля могут иметь различные показатели работы по пути трения.

Необходимо отметить, что определение полной работы торможения и как следствие определение энергии, погашенной в тормозном механизме явилось основой для создания компьютерной модели температурного поля тормозного механизма, что в целом дает возможность говорить о системе расчета тепловой нагруженности тормозных механизмов с АБС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ревин А.А. Методология контроля технического состояния тормозной системы автомобиля с АБС в процессе эксплуатации / А.А. Ревин, И.С. Жуков, В.С. Шкарупелов // Известия ВолГТУ, серия: наземные транспортные системы. – 2012. – № 2 (89). – Т. 5 – С. 90-93.
2. Автомобильный справочник Bosch. Пер. с англ. ООО «СтарСПб» – 3-е., перераб. и доп. – М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2012. – 1280 с.
3. Влияние коэффициента трения на триботехнические характеристики пар трения дискового тормоза / И.В. Турбин, В.Е. Епишкин, Н.С. Соломатин // Материалы конфе-

ренции: «Перспективные направления развития автотранспортного комплекса : сборник статей VIII Международной научно-производственной конференции.» - Пенза : Пензенская ГСХА – 2014 – С. 124-128.

4. Коконин С.С. Высоконагруженные многодисковые тормоза и факторы, определяющие эффективность и плавность их работы/ С.С. Коконин, Г.Я. Обижаев, Б.С. Окулов и др. // Тяжелое машиностроение. – 2001. – № 4. – С. 19-26.

5. Безъязычный В.Ф. Экспериментальное изучение процессов разрушения поверхностных слоев металла при установившемся процессе фреттинг-изнашивания/ В.Ф. Безъязычный, Р.В. Любимов, А.Р. Тимофеев // Сб. научн. трудов Тверского гос. техн. ун-та. Механика и физика фрикционных контактов. – Тверь, 2000. – вып. 7. – С. 24-28.

6. Ревин А.А. Формирование основных эксплуатационных свойств автотранспортных средств в режиме торможения / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 11. – С. 3-5.

7. Чичинадзе А.В. Тепловая динамика трения. – М.: Наука, 1970. – 171 с.

8. Чичинадзе А.В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. – М.: Наука, 1967. – 232 с.

9. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т.2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. – Машиностроение, 1990. – 416 с.

10. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т.1. Теоретические основы. – Машиностроение, 1989. – 400 с.

11. S. Voloaca. Concerns regarding temperature distribution obtained by experiments and finite element analyses for types of brake discs/ S. Voloaca, G. Fratila// U.P.B. Sci, Bull., Series D. – 2012. – vol. 74, is. 3, – P. 33

12. Гудз Г.С. Исследование температурного режима тормозных механизмов методами моделирования / Г.С. Гудз, П.И. Еременко// Автомобильная промышленность. – 1979. – №10. – С. 20-22

13. Першин В.К. Моделирование тепловых режимов при фрикционном взаимодействии колеса и тормозной колодки / Першин В.К., Фишбейн Л.А.// Транспорт Урала. – 2005. – №1 (4). – С. 34-44.

14. Старостин И.П. Численное решение задачи теплопроводности в парах трения с малым коэффициентом перекрытия// Математическое моделирование. – 2005. – Т. 17. – № 7. – С. 23-30.

15. Гудз Г.С. Новый подход к моделированию температурных режимов автомобильных вентилируемых дисков тормозов при циклических торможениях/ Г.С. Гудз, И.Я. Захара, О.Г. Тарапон // Сб. науч. Тр. Ин-та проблем моделирования в энергетике НАНУ им. Г.Е. Пухова: Моделирование и информ. Технологии. – Киев, 2009. – Вып. 51. – С. 37-42.

16. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника. – М.: Высш. шк., 2005. – 552 с.

17. Ревин А.А. Способы определения полной работы торможения, осуществляемой тормозным механизмом автомобиля с абс/ А.А. Ревин, И.С. Жуков, В.С. Шкарупелов// Известия ВолГТУ, серия: наземные транспортные системы. – 2013. – № 21 (124). – Т. 7 – С. 21-24.

18. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля: учебник для вузов/ В.П. Тарасик. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.

19. Исследование свойств активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования / А.В. Тумасов, А.М. Грошев, С.Ю. Костин, М.И. Саунин, Ю.П. Трусов, В.Г. Дыгало // Журнал автомобильных инженеров. – 2011. – № 2. – С. 34-37.

20. Ревин А.А. Влияние рабочего процесса АБС на долговечность элементов шасси автомобиля: монография / А.А. Ревин, М.В. Полуэктов, М.Г. Радченко, Р.В. Заболотный; под ред. А.А. Ревина. – М.: Машиностроение, 2013. – 224 с.

The Thermal Loading Estimation of the Friction Pairs of Avehicle Automated Brake System

Dygalov V., Zhukov I.

Volgograd State Technical University
Volgograd, Russia
dygalov@vstu.ru

Abstract. The paper describes the approach for the evaluation of predesign-thermal load of the braking mechanism for vehicles with ABS. A method is proposed for determining the energy quenched in a braking mechanism with ABS using three approaches. The study was the basis for creating a computer model of the temperature field of the braking mechanism, which,

on the whole, makes it possible to talk about a system for calculating the thermal loading of braking mechanisms with ABS.

Keywords: car, ABS, brake mechanism, thermal load.

Исследование характеристик работы двигателя в режиме стресс-тестирования электрического бензинового насоса

Возмилов А.Г., Глемба К.В.

Южно-Уральский государственный университет (НИУ)
Челябинск, Россия
vozmilov1944@mail.ru, glemba77@mail.ru

Власов Д.Б.

Южно-Уральский государственный
аграрный университет
Челябинск, Россия
vlasov.db@mail.ru

Аннотация. Целью настоящей работы является исследование выходных параметров электрических насосов автомобилей при моделировании изменения их технического состояния без разборки системы топливоподачи с применением новых методов диагностирования. Для обоснования диагностических режимов и параметров проводился анализ возможных комплексных выходных параметров автомобильных электрических бензонасосов. Теоретически определена расчетная модель для системы топливоподачи, позволяющую исследовать взаимосвязь максимальной частоты вращения коленчатого вала двигателя с изменением технического состояния отдельных элементов топливной системы. Изменение давления и пропускной способности топливной системы связаны с изменением расходных характеристик электромагнитных форсунок, сопротивлением фильтров, техническим состоянием насоса. В связи с различными механизмами действия неисправностей элементов топливной системы и изменением их технического состояния рассмотрена имитационная модель системы топливоподачи. Представлены результаты исследований выходных характеристик электрических бензиновых насосов системы топливоподачи автомобилей. Для определения технического состояния насоса рассматриваются два способа диагностирования: динамический и статический. Для контроля технического состояния элементов системы топливоподачи авторами разработан метод тестового диагностирования, основанный на нагрузочном и стресс тестировании. Для насоса, используемого на автомобиле, большое значение имеет изменение его характеристик при типичных для этих условий изменения напряжения питания. Приводится исследование взаимосвязи технического состояния бензинового электрического насоса с его качественными показателями функционирования системы топливоподачи. Определено, что контроль технического состояния насосов возможен по измерению разности величин частоты вращения коленчатого вала при отключении искрообразования и топливоподачи. Представлены результаты эксперимента динамическим способом, который обладает наибольшей информативной и информационной емкостью.

Ключевые слова: система топливоподачи, тестовое диагностирование, электрический бензиновый насос, тестирование, техническое состояние, диагностический параметр.

ВВЕДЕНИЕ

Современная система топливоподачи (СТ) насыщена электронными, механическими и гидравлическими элементами. Доля отказов системы топливоподачи составляет 15–40% от общего числа отказов двигателя. Возможными причинами отказа СТ могут быть: неисправности электрического бензонасоса (ЭБН), отказ реле включения ЭБН, неисправность

электропроводки цепи управления или включения ЭБН, засорение топливных фильтров и др. Нарушение работоспособности топливной системы в подавляющем большинстве случаев объясняется следующим: использованием некондиционного топлива; низкой квалификацией персонала, производящего ремонт, эксплуатацию и техническое обслуживание автомобилей; применением запасных частей низкого качества. Как правило, внешне отказы СТ проявляются следующим образом: двигатель не развивает мощности; рывки, провалы, подергивание; неустойчивая работа ДВС на холостом ходу; двигатель резко набирает обороты (газует); невозможно настроить значение СО. Значительную сложность представляет отыскание неисправного элемента в СТ, в частности ЭБН [1-16]. В то же время, совершенствование системы питания двигателей с впрыском бензина направлено на обеспечение высоких экологических показателей, но это возможно лишь за счет точного дозирования подачи топлива на всех режимах работы двигателя. Заводами изготовителями автомобилей ЭБН выполнены по шестой категории контролепригодности, что создает значительные проблемы при оценке их технического состояния: требуется разборка топливных магистралей и элементов топливного бака [17-28]. Возникает необходимость разработки новых методов и средств диагностирования ЭБН, осуществляемого без разборки самого насоса и топливных магистралей, достаточно быстро и с высокой достоверностью диагностирования.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящей работы является исследование выходных параметров электрических насосов автомобилей при моделировании изменения их технического состояния без разборки СТ с применением новых методов диагностирования. Для определения технического состояния ЭБН рассматриваются два способа диагностирования – динамический и статический. Для контроля технического состояния элементов системы топливоподачи авторами разработан метод тестового диагностирования, основанный на нагрузочном тестировании и стресс-тестировании [1-4, 12-17]. Для ЭБН, используемого на автомобиле, большое значение имеет изменение его характеристик при типичных для этих условий изменения напряжения питания [1-14, 24-26].

Для обоснования диагностических режимов и параметров проводился анализ возможных комплексных выходных параметров автомобильных ЭБН. Расчетная (теоретическая) производительность насоса за один оборот (рабочий

объем) q (см³/об) равна объему, описываемому его поршнями [1, 7-9, 27]:

$$q = \frac{\pi d^2 h \cdot z}{4}, \quad (1)$$

где d – диаметр цилиндра, см; h – ход поршня, см; z – число поршней.

Учитывая, что ход поршня равен двойному эксцентриситету ($h=2e$), получим выражение для объема, описываемого поршнями насоса [1, 7-9, 27]:

$$q = \frac{2\pi d^2 e \cdot z}{4}, \quad (2)$$

Минутная теоретическая производительность Q (см³/мин) будет равна [1, 7-9, 27]:

$$Q = qn = \frac{\pi d^2 e \cdot z \cdot n}{2}, \quad (3)$$

где n – число оборотов вращения вала насоса, мин⁻¹.

Определяем расчетную теоретическую модель для СТ, позволяющую исследовать взаимосвязь максимальной частоты вращения коленчатого вала двигателя с изменением технического состояния отдельных элементов топливной системы [1, 7-9, 27]:

$$n_{\max} = \frac{10^3 T_{\min}}{\tau_{\max} Q_{\text{цmax}} i} \left(\frac{10^6 \left(\mu_{\phi} f_{\phi} \sqrt{\frac{2}{\rho_{\tau}} (P_{\text{т.р.}} - P_{\text{п.в.}})} \right) t_{\text{р}}}{8,3K \cdot t_3} - 1 \right), \quad (4)$$

где K – коэффициент запаса производительности; i – число цилиндров двигателя, шт; $Q_{\text{цmax}}$ – максимальная цикловая подача при максимальной частоте вращения двигателя, см³; τ_{\max} – длительность импульса при максимальной цикловой подаче, с; T_{\min} – минимальный период следования цикловых подач, с; n_{\max} – максимальная частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹; $t_{\text{р}}$ – время выработки форсункой топлива, с; t_3 – время заполнения рампы и топливных магистралей топливом, с; μ_{ϕ} – коэффициент расхода топлива через форсунку; f_{ϕ} – площадь сечения форсунки, м²; ρ_{τ} – плотность топлива, кг/м³; $P_{\text{т.р.}}$ – давление топлива в рампе, МПа; $P_{\text{п.в.}}$ – противодавление впрыску, МПа.

Изменение давления и пропускной способности СТ связаны с изменением расходных характеристик электромагнитных форсунок, сопротивлением фильтров, техническим состоянием насоса. В связи с различными механизмами действия неисправностей элементов топливной системы и изменением их технического состояния рассмотрим имитационную модель СТ. Так, например, засорение топливного фильтра можно представить последовательным сопротивлением потоку жидкости в топливной магистрали, а износ ЭБН – параллельным сопротивлением. Запишем данное условие для системы топливоподачи, где общая динамическая пропускная способность ($\mu_{\text{общ.}} \cdot f_{\text{общ.}}$) всех элементов СТ будет иметь следующее соотношение [1, 7-9, 27]:

$$\frac{1}{\mu_{\text{общ.}} \cdot f_{\text{общ.}}} = \frac{1}{\mu_{\text{н.}} \cdot f_{\text{н.}}} + \frac{1}{\mu_{\text{посл.}} \cdot f_{\text{посл.}}}, \quad (5)$$

где $\mu_{\text{посл.}} \cdot f_{\text{посл.}}$ – динамическая пропускная способность последовательных элементов, м²; $\mu_{\text{н.}} \cdot f_{\text{н.}}$ – динамическая пропускная способность насоса, м².

В свою очередь, динамическая пропускная способность последовательных элементов системы топливоподачи определится из выражения [1, 7-9, 27]:

$$\mu_{\text{посл.}} \cdot f_{\text{посл.}} = \mu_{\phi} \cdot f_{\phi} + \mu_{i\text{ЭМФ}} \cdot f_{i\text{ЭМФ}}, \quad (6)$$

где $\mu_{\phi} \cdot f_{\phi}$ – динамическая пропускная способность фильтра, м²; $\mu_{i\text{ЭМФ}} \cdot f_{i\text{ЭМФ}}$ – динамическая пропускная способность i -ых электромагнитных форсунок, м².

Величина давления $P_{\text{т.м.}}$ (МПа) в топливной магистрали определится по формуле [1, 7-9, 27]:

$$P_{\text{т.м.}} = \frac{Q^2 \rho_{\tau}}{2(\mu_{\text{общ.}} \cdot f_{\text{общ.}})^2}. \quad (7)$$

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Контроль технического состояния электрических бензиновых насосов возможен по измерению разности величин частоты вращения коленчатого вала двигателя при отключении искрообразования и топливоподачи. Техническое состояние исследуемого элемента топливной системы определялось по отношению частоты вращения ДВС при работе с новым и реальным (диагностируемым) ЭБН. Данное отношение позволяет определить уровень уменьшения подачи диагностируемым ЭБН, и как следствие – степень его износа [1]. Для исследования качества функционирования ЭБН с помощью динамического способом был проведен эксперимент, в котором проверялась работа двигателя на каждом из цилиндров ДВС при отключении искрообразования в остальных трех. Также для повышения чувствительности диагностируемого параметра уменьшалась степень подачи топлива.

При проведении экспериментальных исследований использовался исследовательский стенд (рис. 1, а) на базе двигателя ЗМЗ-4062 с подключением разработанного устройства в виде «электронно-управляемой нагрузки» двигателя (рис. 1, б). Стенд позволяет в реальном времени фиксировать значения выходных экспериментальных данных в виде значений процесса работы двигателя в режиме отключения одного, двух и трех цилиндров. В результате исследований получена характеристика изменения частоты n вращения коленчатого вала (КВ) ДВС (рис. 2, 3) [1, 7-9, 20].

Рассмотрим первый раздел исследований, когда при отключении искрообразования все четыре форсунки еще работают, быстро опустошая топливную рампу, что приводит к снижению частоты вращения КВ ДВС. Пределы изменения частоты вращения КВ при 80, 60 и 40%-й степени открытия дроссельной заслонки с исправным ЭБН (напряжение питания $U=14$ В) составили 2750-3000 об/мин, но при 20%-й степени открытия заслонки – уже 2400-2500 об/мин. При закрытии заслонки ниже 20% ЭБН уже не способен обеспечить необходимую подачу топлива для работающих форсунок, в результате чего двигатель глохнет (см. рис. 2) [1, 7-9, 20]. Данная характеристика отображает работу двигателя только с новым исправным ЭБН.



а)



б)

Рис. 1. Исследовательский стенд для испытаний систем двигателя ЗМЗ-4062 (а) и разработанное устройство – «электронно-управляемая нагрузка» двигателя (б)

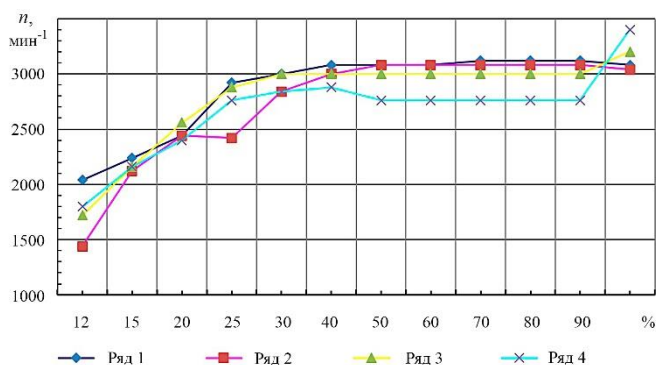


Рис. 2. Изменение частоты вращения n (мин^{-1}) коленчатого вала ДВС на каждом из 4-х цилиндров с исправным ЭБН в зависимости от степени открытия дроссельной заслонки (%) при напряжении питания ЭБН $U=14$ В: ряды 1-4 – параметры каждого из 4-х цилиндров

Во втором разделе исследований проводился аналогичный эксперимент с исправным ЭБН, но с понижением напряжения его питания до уровня 8 В. Характеристика работы ДВС в этом режиме представлена на рис. 3. Пределы изменения частоты вращения КВ с исправным ЭБН (напряжение питания $U=8$ В) при 80 и 60%-й степени открытия дроссельной заслонки составили 3100-3750 об/мин, при 40%-й – 2800-2900 об/мин, при 20%-й – 800-900 об/мин, далее уже двигатель глохнет [1, 7-9, 20].

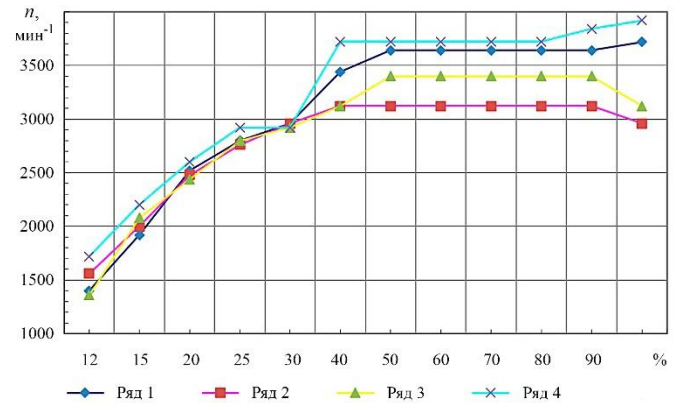


Рис. 3. Изменение частоты вращения n (мин^{-1}) коленчатого вала ДВС на одном из 4-х цилиндров с исправным ЭБН в зависимости от степени открытия дроссельной заслонки (%) при напряжении питания ЭБН $U=8$ В: ряды 1-4 – параметры каждого из 4-х цилиндров

При анализе экспериментальных данных можно сделать вывод, что под нагрузкой двигателя снижение (падение) частоты вращения КВ наблюдается уже при 30% открытия дроссельной заслонки при напряжении питания ЭБН $U=14$ В (см. рис. 2), и при 40% открытия заслонки в случае снижения напряжения питания ЭБН до 8 В (см. рис. 3). Полученные данные исследований подтверждают взаимосвязь изменения максимальной частоты вращения коленчатого вала двигателя с изменением технического состояния отдельных элементов топливной системы (в частности, состояния ЭБН со сниженным уровнем питания), что показывает на адекватность применения расчетной теоретической модели (4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные способы позволяют определять техническое состояние ЭБН. Во-первых, в динамическом режиме отслеживается работа ЭБН благодаря изменению максимально возможной частоты вращения коленчатого вала двигателя при отключении искрообразования в режиме регулирования напряжения питания ЭБН. Во-вторых, в статическом режиме рассматривается работа ЭБН по развиваемому давлению при неработающем ДВС. Данные способы характеризуются значительной эффективностью процесса диагностирования системы топливоподачи.

ВЫВОДЫ

Теоретически определена и подтверждена экспериментальными исследованиями расчетная теоретическая модель для СТ, позволяющая исследовать взаимосвязь максимальной частоты вращения коленчатого вала двигателя с изменением технического состояния отдельных элементов топливной системы.

Для определения технического состояния ЭБН предлагается использовать такой диагностический признак, как предел изменения частоты вращения ДВС. Установлено, что чем ниже уровень подачи топлива в СТ, зависящий от эксплуатационных характеристик ЭБН, тем ниже пределы изменения частоты вращения ДВС. Экспериментальные

исследования показали, что применяемый динамический способ проверки работоспособности ЭБН обладает наибольшей информативной и информационной емкостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гриценко А.В. Разработка методов тестового диагностирования работоспособности систем питания и смазки двигателей внутреннего сгорания: дис. ... докт. техн. наук. – Челябинск, 2014. – 397 с.
2. Гриценко А.В. Способ диагностирования системы топливоподачи двигателей внутреннего сгорания легковых автомобилей / А.В. Гриценко, Д.Д. Бакайкин, С.С. Куков // Вестник ЧГАА. – 2011. – Т. 59. – С. 30-32.
3. Гриценко А.В. Диагностирование электрических бензонасосов автомобилей / А.В. Гриценко, К.А. Цыганов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2013. – № 4. – С. 22–23.
4. Гриценко А.В. Диагностирование системы питания ДВС / А.В. Гриценко, А.М. Плаксин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2014. – №1. – С. 24–26.
5. Бакайкин Д.Д. Диагностирование электромагнитных форсунок бензиновых двигателей автомобилей, эксплуатируемых в сельском хозяйстве: дис... канд. техн. наук. Челябинск, 2013. – 124 с.
6. Гриценко А.В. Оптимизация процесса диагностирования автотракторной техники минимизацией затрат / А.В. Гриценко, А.М. Плаксин // Вестник ЧГАА. – 2013. – Т. 63. – С. 42-46.
7. Stola, F., Paolino, D., Parotto, M., and Troina, F., "Electric Fuel Pump Simulation and Control for Fuel Saving and System Cost Reduction," SAE Technical Paper 2015-24-2421, 2015.
8. Ferreira, A., Galhardo, A., Busani, R., and de Souza, R., "Development of 1D Simulation Model of Electric Fuel Pump for Flex-Fuel Application," SAE Technical Paper 2016-36-0135, 2016.
9. Edward, R., Radu, R., and Mircea, Z., "Simulation of the Behavior of a Flow Control Device for the High Pressure Fuel Injection Pump of a Spark Ignition Engine," SAE Technical Paper 1999-01-0562, 1999.
10. Гриценко А.В. Разработка метода и средства диагностирования электробензонасосов системы топливоподачи ДВС // Транспорт: наука, техника, управление. – 2015. – №1. – С. 40-44.
11. Плаксин А.М. Разработка методов тестового диагностирования работоспособности систем топливоподачи и смазки двигателей внутреннего сгорания / А.М. Плаксин, А.В. Гриценко, К.И. Лукомский, В.В. Волынкин // Аграрный вестник Урала. – 2014. – № 7 (125). – С. 51-58.
12. Плаксин А.М. Диагностирование электрических бензиновых насосов по комплексным выходным параметрам // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11 (часть 12). – С. 2610-2614.
13. Гриценко А.В. Новый метод, средство и программная среда для тестирования ЭМФ автомобиля // Известия ВолгГТУ, серия «Процессы преобразования энергии и

энергетические установки». – 2014. – №6 (145). –Т. 18. – С. 53-56.

14. Плаксин А.М. Диагностирование электромагнитных форсунок по изменению качественного состава топливной смеси // Фундаментальные исследования. – 2014. –№11 (часть 11). – С. 2380-2384.

15. Гриценко А.В., Бакайкин Д.Д., Куков С.С. Способ диагностирования системы топливоподачи двигателя // Патент РФ №2418190. Оpubл. 10.05.11. Бюл. №13.

16. Гриценко А.В., Куков С.С., Цыганов К.А., Горбунов А.В. Способ диагностирования электробензонасосов системы топливоподачи автомобиля // Патент РФ №2477384. Оpubл. 10.03.13. Бюл. № 7.

17. Гриценко А.В. Диагностирование систем ДВС на тестовых статических режимах / А.В. Гриценко, С.С. Куков // Вестник ЧГАА. – 2012. – Т. 61. – С. 31-38.

18. Гриценко А.В. Определение эффективности использования средств технического диагностирования с учетом частоты отказов систем ДВС / А.В. Гриценко, С.С. Куков // Вестник ЧГАА. – 2012. – Т. 60. – С. 45-48.

19. Гриценко А.В. Разработка эффективных средств и методов диагностирования двигателей внутреннего сгорания автомобилей / А.В. Гриценко, С.С. Куков // Вестник ЧГАА. – 2011. – Т. 58. – С. 111-117.

20. Гриценко А.В. Диагностирование систем двигателя внутреннего сгорания бестормозным методом с перераспределением цилиндрических нагрузок // Вестник ЧГАА. – 2011. – Т. 58. – С. 108-110.

21. Гриценко А.В. Обоснование и разработка средств и методов диагностирования двигателей внутреннего сгорания автомобилей / А.В. Гриценко, С.С. Куков // Междунауч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАА. – 2011. – С. 6-11.

22. De Cesare, M., Parotto, M., Covassin, F., and Sgatti, S., "Electric Low Pressure Fuel Pump Control for Fuel Saving," SAE Technical Paper 2013-01-0339, 2013.

23. Fávero C., de Souza L., Pacheco F., and Pereira M., "Corrosion on Electric Fuel Pump Housing at Durability Test in Test Bench," SAE Technical Paper 2013-36-0622, 2013.

24. Häntsche J., Krause G., Velji, A. and Spicher U., "High Pressure Fuel Pump for Gasoline Direct Injection based on Ceramic Components," SAE Technical Paper 2005-01-2103, 2005.

25. Sarkar S., Kumar S., Singhal A., Kohli S. et al., "Common Design of Jet Pump for Gasoline and Diesel Based Vehicles," SAE Technical Paper 2015-01-0458, 2015.

26. Rovai F., Ferrarese A. and Sinatora A., "Electrical Automotive Fuel Pump Resistance Against E60 Gasoline-Ethanol Blend," SAE Technical Paper 2004-01-3277, 2004.

27. Kunkel R., "New Fuel Pump Technology," SAE Technical Paper 1999-01-0331, 1999.

28. Felton G., "Compact Rotary Spill Pump with Electronic Control for High Speed Direct Injection Engines," SAE Technical Paper 960865, 1996.

Study of the Characteristics of the Engine Operation in the Stress-Testing Mode of the Electric Gasoline Pump

Vozmilov A., Glemba K.

South Ural State University (National research University)
Chelyabinsk, Russia
vozmilov1944@mail.ru, glemba77@mail.ru

Vlasov D.

South Ural State agrarian University
Chelyabinsk, Russia
vlasov.db@mail.ru

Abstract. The purpose of this work is to study the output parameters of electric pumps in vehicles when simulating changes in their technical condition without dismantling the fuel system using new diagnostic methods. To justify the diagnostic modes and indicators, we analyzed possible complex output parameters of automobile gasoline pumps. We theoretically determined the estimated model for the fuel supply system, which allows us to investigate the relationship of the maximum engine crankshaft speed with the change in the technical condition of individual elements of the fuel system. The change in the pressure and capacity of the fuel system is associated with the change in the flow characteristics of the electromagnetic injectors, filter resistance, and technical condition of the pump. In connection with various mechanisms of failures of the fuel system elements and changes in their technical condition, we considered a simulation model of the fuel system. We presented results of studying the output characteristics of electric gasoline pumps of the vehicles' fuel system. We considered two diagnostic

methods to determine the technical condition of the pump: dynamic and static. To control the technical condition of the fuel system elements, we developed a testing method based on load and stress testing. For a pump used in a vehicle, the change in its characteristics with the change in the supply voltage typical for these conditions is of a great importance. The paper presents a study of the relationship between the technical condition of the gasoline electric pump with its quality indicators of the fuel system operation. We determined that it is possible to monitor the technical condition of the pump by measuring the difference of the values of the crankshaft speed when the sparking and fuel supply are off. We presented experimental results by the dynamic method, which has the most informative and information capacity.

Keywords: fuel system; diagnostics; electric gasoline pump; testing, technical condition; diagnostic parameter.

Разработка двусторонней летне-зимней пневматической шины

Войку И.П., Комиссаров И.А.
ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет»
Псков, Россия
voiku-ivan@yandex.ru

Аннотация. В статье обоснована актуальность совершенствования конструкции автомобильной пневматической шины. Описаны основные параметры полезной модели «Двусторонняя летне-зимняя пневматическая шина» (Патент на полезную модель №182679), разработанной сотрудниками ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет». Представлены особенности и основные недостатки наиболее близкого аналога (Патент на изобретение RU 2028953): отсутствие возможности использовать её круглогодично, увеличение дисбаланса и риска прокола при эксплуатации второй протекторной части в связи с неравномерным износом первой и второй протекторных частей. Техническая задача, решаемая предлагаемой полезной моделью, заключается в обеспечении возможности круглогодичного использования пневматической шины. Задача решается особенностями конструкции: внутренняя часть шины представляет собой зеркальное отражение внешней; одна из частей шины оборудована шипами; при необходимости шину можно вывернуть. Научная новизна разработанной двусторонней пневматической шины заключается в совмещении двух традиционных изделий, дающем значительный синергетический эффект: экономия затрат на приобретение и использование, сокращение экологического ущерба.

Ключевые слова: шип, корд, брекер, зимняя шина, летняя шина, боковина, рисунок протектора.

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильная шина – основное комплектующее, обеспечивающее сцепление любого автомобиля с дорогой.

Рост стоимости автомобильных шин стимулирует разработку инноваций, имеющих существенные функциональные преимущества и призванных сократить издержки потребления.

Отечественные и зарубежные производители пневматических шин ведут работу над решением задачи повышения срока их эксплуатации. Основным препятствием на пути решения этой задачи является сезонность использования автомобильной шины.

Это обуславливает актуальность разработки конструкции пневматической шины, сочетающей преимущества летних и зимних шин, минимизирующей недостатки их сезонного использования.

Сотрудниками ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет» разработана «Двусторонняя летне-зимняя пневматическая шина» (Патент на полезную модель №182679).

Техническая задача, решаемая предлагаемой полезной моделью, заключается в обеспечении возможности круглогодичного использования пневматической шины. Задача решается особенностями конструкции: внутренняя часть шины представляет собой зеркальное отражение внешней;

одна из частей шины оборудована шипами; при необходимости шину можно вывернуть.

АКТУАЛЬНОСТЬ

К настоящему моменту автомобильный транспорт стал неотъемлемой частью жизни современного общества. С момента появления автомобиль непрерывно развивается и изменяется. Меняются и требования к автомобильным комплектующим.

Рост стоимости автокомплектующих, без которых невозможно использование транспортных средств, происходящий на фоне снижения уровня доходов населения, стимулирует разработку инноваций, имеющих существенные функциональные преимущества и призванных сократить издержки потребления.

Автомобильная шина – упругая оболочка, расположенная на ободе колеса – одно из основных комплектующих любого автомобиля. Она предназначена для реализации и восприятия сил, возникающих в пятне контакта с дорогой, поглощения колебаний, вызываемых неровностями дорожного покрытия, а также для обеспечения высокого коэффициента сцепления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Производители пневматических шин постоянно ведут работу над решением задачи повышения срока их эксплуатации. Основным препятствием на пути решения этой задачи является сезонность использования автомобильной шины:

1. Использование по-сезонно летних и зимних автомобильных шин увеличивает стоимость их приобретения и хранения, требует наличия мест хранения, увеличивает объем загрязнения окружающей среды;

2. Использование всесезонных автомобильных шин не способно обеспечить высокие показатели коэффициента сцепления в зимний период;

3. Цепи противоскольжения используются на шинах любого размера, но ограничивают скорость передвижения, представляют опасность в случае разрыва или неправильного крепления, повреждают шину, не предполагают длительное использование.

4. Выдвигающиеся шипы. Уникальная технология, используемая исключительно на высокотехнологичных транспортных средствах. Обладает высокой стоимостью, сложна в обслуживании, имеет узкий сегмент потребителей.

Это обуславливает актуальность разработки конструкции пневматической шины, сочетающей преимущества летних и зимних шин, минимизирующей недостатки их сезонного использования.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Разработка двусторонней летне-зимней пневматической шины – это комбинирование двух видов разносезонных автомобильных шин с целью сокращения затрат потребителя на их приобретение и хранение, сокращения экологического ущерба при их производстве и утилизации.

Известен съёмный протектор [Патент на изобретение RU 2245797 от 10.02.2005 “Съёмный протектор для пневматических шин” Тхазеплов Хасан Миседович (RU)], включающая профилированный обод из эластичного материала с рисунком на наружной поверхности. Внутренняя поверхность протектора имеет ворсяной покров, внутренний диаметр которого меньше наружного диаметра основной шины на 1-2% и выполнен таким образом, что охватывает наружную и большую часть боковой поверхности основной шины. В результате повышается надежность шины.

Также известна пневматическая шина [Патент на изобретение RU 2028953 от 20.02.1995 “Пневматическая шина” Харитонашвили В.А. (RU)], которая содержит переворачиваемую протекторную часть с рисунком на двух противоположных поверхностях, выполненную за одно целое с боковинами. Одна из поверхностей в рабочем состоянии обращена в пневматическую камеру.

При эксплуатации изнашивается наружная протекторная часть. После износа наружной протекторной части до предельного значения снимают шину с диска колеса и шину переворачивают так, чтобы наружная протекторная часть оказалась внутренней, а внутренняя протекторная часть – наружной, то есть рабочей протекторной частью.

Недостатком данного устройства является то, что использование устройства предполагает следующую последовательность эксплуатации:

1. эксплуатация первой (наружной) протекторной части до предельного значения износа;
2. переворачивание, при котором первая протекторная часть оказывается внутренней, а вторая – наружной рабочей частью;
3. эксплуатация второй протекторной части до предельного значения.

Недостатком известной конструкции пневматической шины является отсутствие возможности использовать её круглогодично. Кроме того, недостатком является увеличение дисбаланса и риска прокола при эксплуатации второй протекторной части в связи с неравномерным износом первой и второй протекторных частей (так как эксплуатация второй протекторной части начинается после того, как первая протекторная часть становится изношенной до предельного значения).

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ. ПРЕДЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЙ

Сотрудниками ФГБОУ ВО “Псковский государственный университет” разработана двусторонняя летне-зимняя пневматическая шина (Патент на полезную модель №182679).

Полезная модель относится к шинной промышленности, в частности, к конструкциям пневматических шин для колесных транспортных средств, и может быть использована для различных видов шин.

Технической задачей, решаемой полезной моделью, является обеспечение возможности круглогодичного использования пневматической шины.

Техническая задача достигается тем, что предлагаемое устройство содержит переворачиваемую протекторную часть с рисунком на двух противоположных подобных поверхностях, соединённых слоем адгезивного материала, одна из которых содержит шипы противоскольжения и выполнена из зимнего состава резиновой смеси, сохраняющего эластичность при отрицательной температуре, другая – выполнена из летнего состава резиновой смеси, сохраняющего эластичность при высоких положительных температурах. Периодичность переворачивания пневматической шины определяется в первую очередь временем года, а не износом наружной протекторной части до предельного значения.

Техническая сущность предложенного устройства поясняется следующим рисунком.

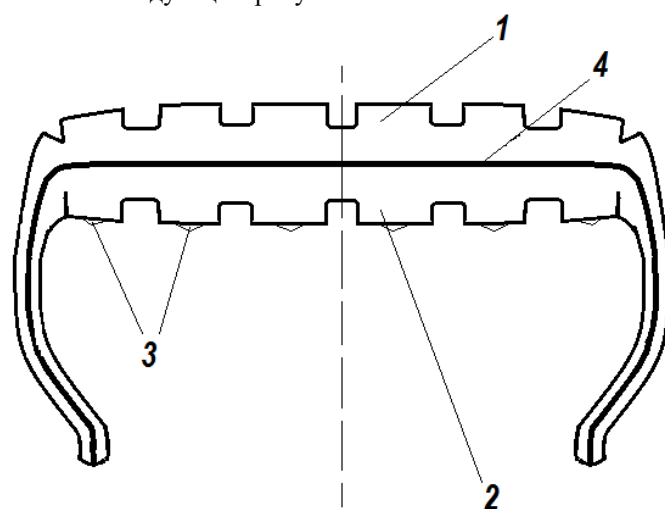


Рис. 1. Поперечный срез шины в летний период эксплуатации

Принципиально, конструкция шины состоит из первой протекторной поверхности 1, выполненной из летнего состава резиновой смеси, второй протекторной поверхности 2, выполненной из зимнего состава резиновой смеси и оборудованной шипами противоскольжения 3, а первая и вторая протекторные поверхности связаны между собой слоем адгезивного материала 4.

Каждая из противоположных подобных протекторных поверхностей 1 и 2 представляет собой стандартную конструкцию наружной поверхности шины. Поверхность 1 выполнена из летнего состава резиновой смеси, сохраняющего эластичность при высоких положительных температурах. Поверхность 2 содержит шипы противоскольжения 3 и выполнена из зимнего состава резиновой смеси, сохраняющего эластичность при отрицательной температуре.

Адгезивный слой 4 обеспечивает сцепление поверхности 1 и поверхности 2 с двумя степенями свободы. Габаритные размеры предлагаемого устройства принимаются соответственно существующим стандартам для подобных конструкций.

Принцип действия предлагаемого устройства: в летний период времени эксплуатируется наружная протекторная

поверхность 1. Перед наступлением зимнего периода времени производится переворачивание, при котором наружная протекторная поверхность 1 оказывается внутренней, а внутренняя поверхность 2 наружной – рабочей частью. Дальнейшая смена времен года сопровождается повторным переворачиванием. Количество переворачиваний определяется пользователем устройства. Эксплуатация каждой протекторной части осуществляется до предельного значения износа.

Техническим результатом заявляемой полезной модели является повышение безопасности эксплуатации двусторонней шины, снижение расхода материалов на создание шин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

К настоящему моменту автомобильный транспорт стал неотъемлемой частью жизни современного общества. С момента появления автомобиль непрерывно развивается и изменяется. Меняются и требования к автомобильным комплекующим.

Автомобильная шина – упругая оболочка, расположенная на ободе колеса – одно из основных комплектующих любого автомобиля.

Производители пневматических шин постоянно ведут работу над решением задачи повышения срока их эксплуатации. Основным препятствием на пути решения этой задачи является сезонность использования автомобильной шины.

В ходе научно-исследовательской работы выявлены запатентованные научно-технические разработки, направленные на решение этой проблемы, имеющие как свои преимущества, так и недостатки.

Сотрудниками ФГБОУ ВО “Псковский государственный университет” разработана двусторонняя летне-зимняя пневматическая шина (Патент на полезную модель №182679). Полезная модель относится к шинной промышленности, в частности, к конструкциям пневматических шин для колесных транспортных средств, и может быть использована для различных видов шин.

Принципиально, конструкция инновационной разработки включает первую протекторную поверхность, выполненную из летнего состава резиновой смеси, вторую протекторную поверхность, выполненную из зимнего состава резиновой смеси и оборудованную шипами противоскольжения.

Принцип действия предлагаемого устройства: в летний период времени эксплуатируется наружная протекторная поверхность. Перед наступлением зимнего периода времени производится переворачивание, при котором наружная протекторная поверхность оказывается внутренней, а внутренняя поверхность наружной – рабочей частью. Дальнейшая смена времен года сопровождается повторным переворачиванием. Количество переворачиваний определяется пользователем устройства. Эксплуатация каждой протекторной части осуществляется до предельного значения износа.

Разработка двусторонней летне-зимней пневматической шины позволяет сократить затраты потребителя на приобретение и хранение этого автокомплектующего, сократить экологический ущерб при его производстве и утилизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войку И.П., Комиссаров И.А., Шманай И.А. Двусторонняя летне-зимняя пневматическая шина // Патент на полезную модель RUS №182679 28.08.2018
2. Чемеринский В.Б. Процедура совершенствования шин и их производства // Транспортное дело России. – 2012. - № 6-2. - С. 253-256.
3. Воронин В.В. Механические характеристики автомобильных шин / В.В. Воронин, В.Н. Кондрашов, Д.М. Тимаев // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2010. - № 2. – С. 20-23.
4. Ломакин В.В. Перспективные направления развития автомобильных шин / В.В. Ломакин, Е.К. Карпухин, В.В. Воронин, В.Н. Кондрашов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2008. - №2. – С. 64-67.
5. Кнороз В.И. Работа автомобильной шины / под ред. В.И. Кнороза. – М.: Транспорт, 1976. – 238 с.
6. Тарковский В.Н. Автомобильные шины / В.Н. Тарковский, В.А. Гудков, О.Б. Третьяков. – М.: Транспорт, 1990. – 217с.
7. Ходес И.В. Методология прогнозирования управляемости колесной машины: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. – Волгоград, 2007. – 33 с.
8. ГОСТ 4754-97. Шины пневматические для легковых автомобилей, прицепов к ним, легких грузовых автомобилей и автобусов особо малой вместимости. Технические условия. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200017825> (дата обращения: 29.12.2018).
9. Колбасов А.Ф. Некоторые актуальные вопросы работы автомобильной шины // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 8-1. – С. 128-130.
10. Бидерман В.Л. Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на износ, сцепление и сопротивление качению автомобильных шин / В. Л. Бидерман, Л. Д. Слюдинов, Ю. С. Левин и др. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1970. - 106 с.
11. ГОСТ 22374-77 Шины пневматические. Конструкция. Термины и определения. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-22374-77> (дата обращения: 29.12.2018).
12. Кваша Э.Н. Методика расчета температурных полей пневматических шин / Э.Н. Кваша, В.В. Ткачева // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2009. - № 1 (132). – С. 27-31.
13. Belkin A.E. Some models and methods of pneumatic tire mechanics / A.E. Belkin, B.L. Bukhin, O.N. Mukhin., N.L. Narskaya / Vehicle System Dynamics Proceedings of the 1997 2nd International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamic Analysis. editors: F. Bohm; editors: H.P. Willumeit. Berlin, Ger, - 1997.
14. Sokolov S.L. Prediction of the fatigue life of pneumatic tires / Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2010. - Т. 39, № 5. - p. 459-465.
15. Shifrin B.M. An analytic model of a rolling pneumatic tire / International Applied Mechanics. - 2006. - Т. 42, № 4. - p. 479-485.
16. Kulikov G.M. Design of pneumatic tires on the basis of generalized broken-line hypothesis // Strength of Materials. - 1990. - Т. 22, № 2. - p. 272-277.

17. Tarasov V.N. Method of sections in analytical calculations of pneumatic tires / V.N. Tarasov, I.V. Boyarkina // Journal of Physics: Conference Series - 2018. - T. 944, p. 012116.

18. Grigolyuk E.I. Contact problem for a pneumatic tire interacting with a rigid foundation / E.I. Grigolyuk, G.M. Kulikov, S.V. Plotnikova // Mechanics of Composite Materials. - 2004. - T. 40, № 5. - p. 427-436.

19. Vantsevich V.V. Interaction between autonomous vehicles and road surface / V.V. Vantsevich, G. Lomako, A. Opeiko

// International Journal of Vehicle Autonomous Systems. – 2003. - T. 1, № 3-4. - p. 291-308.

20. Kvasova A. Forecasting of a thermal condition of pneumatic tires of dump trucks / A. Kvasova, B. Gerike, E. Murko, D. Skudarnov // Forecasting of a thermal condition of pneumatic tires of dump trucks / E3S Web of Conferences The Second International Innovative Mining Symposium. - 2017.

Development of Double-sided Summer-winter Pneumatic Tires

Voiku I., Komissarov I.

Pskov State University

Pskov, Russia

voiku-ivan@yandex.ru

Abstract. The article substantiates the relevance of improving the design of automobile pneumatic tires. The basic parameters of the utility model "Double-sided summer-winter pneumatic tire" (Patent for utility model №182679), developed by the fellow workers of the FSBEI of Higher Education Pskov State University, are described. The features and main disadvantages of the closest analogue (patent for the invention RU 2028953) are presented: the inability to use it year-round, an increase in the imbalance and the risk of puncture during the operation of the second tread part due to uneven wear of the first and second tread parts. The technical goal, solved by the proposed useful model, is to ensure the possibility of year-round use of pneumatic tires. The goal is achieved by

the unique features: the inner part of the tire is a mirror image of the external part; one part of the tire is equipped with spikes; if necessary, the tire can be turned out. Scientific novelty of the developed double-sided pneumatic tires is consists of combining two traditional products, which gives a significant synergistic effect: savings of the cost of acquisition and use, reduction of environmental damage.

Keywords: spike, cord, breaker, winter tire, summer tire, sidewall, tread pattern.

Асфальтобетон – как объект разрушения рабочими органами фрезерных машин

Фурманов Д.В., Николаев В.А., Ключко Н.Н.

Ярославский государственный технический университет
Ярославль, Россия
denisfurmanoff@yandex.ru

Аннотация. В статье приводится анализ методов определения прочности дорожных асфальтобетонов с точки зрения сопротивления резанию. Приведены результаты прочностных испытаний некоторых видов асфальтобетонов методом статической пенетрации, приведено описание указанного метода. Дана сравнительная оценка результатов, полученных методом статической пенетрации со стандартным методом.

Ключевые слова: фреза дорожная, асфальтобетон, фрезерование асфальтобетона, статическая пенетрация, предел контактной прочности, проектирование фрезерных машин, одноосное сжатие.

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление дорожного покрытия автомобильных дорог требует удаление старого, изношенного асфальтобетона. В настоящее время для этих целей широко используется холодное фрезерование. Существующие фрезерные машины и оборудование, предназначенные для удаления старого покрытия, являются сложным, дорогостоящим и энергозатратным оборудованием. Вместе с тем, непрерывно разрабатываются новые типы дорожных асфальтобетонов повышенной прочности, что требует систематизацию материала, в зависимости от прочности и ответов на вопрос о прогнозируемой производительности и, может быть, о работоспособности фрезерных машин работать с этим материалом.

Фрезерование асфальтобетона сопровождается разрушением его структуры, причем, разрушаются не только связи между отдельными зернами, но и сами зерна. Учитывая это, разрушение асфальтобетона – задача противоположная той, для решения которой он создавался, а именно – сохранять высокую прочность в независимости от нагрузок и воздействия факторов окружающей среды. Разрушению асфальтобетона препятствуют все его положительные качества – высокие показатели прочности, плотность, вязкость, упругость и пластичность в сочетании с большим разнообразием физико-механических свойств в зависимости от температуры и гранулометрического состава.

Определение прочности дорожных асфальтобетонов как показателя сопротивляемости разрушению при фрезеровании, является одной из важных задач на пути к созданию новых фрезерных и других типов машин для разработки асфальтобетона, а так же совершенствованию существующих фрезерных машин и оборудования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методы и средства оценки прочности асфальтобетона совершенствовались непрерывно, вместе с развитием транспортной инфраструктуры, увеличением требований

по надежности и долговечности дорожных покрытий, увеличением нагрузок на дорожные сети и так далее. Появились методы оценки прочности асфальтобетонных покрытий, сдвигоустойчивости, старения, трещиностойкости и истирания.

Появившись в 1920 году, первый метод оценки прочностных показателей асфальтобетона (метод Хаббарда-Филда) положил начало механическим испытаниям в системе контроля качества. Метод заключался в определении необходимой силы для продавливания стандартного образца асфальтобетона через отверстие определенной величины (рис. 1в).

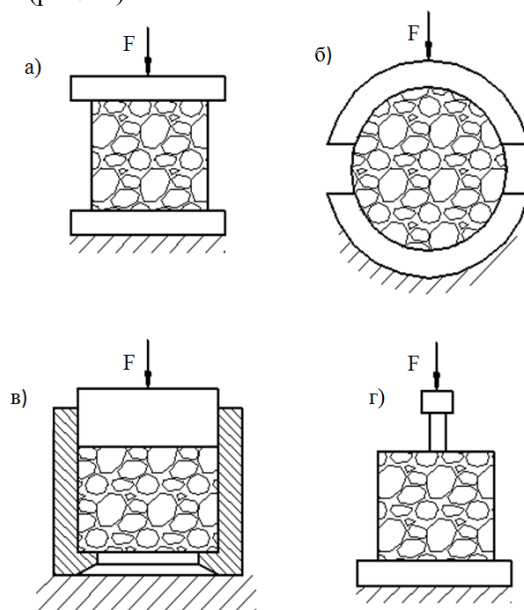


Рис. 1. Схемы испытания образцов асфальтобетона: а – при одноосном сжатии (по Дюрьеzu), б – по Маршалу, в – по Хаббарду - Филду, г – вдавливанием штампа

Определенную популярность получили комплексные подходы Хвима [1, 2, 3], в которых подобранную по специальной методике асфальтобетонную смесь, в виде цилиндрических образцов, испытывали на одноосное сжатие по схеме Дюрьеzu (рис. 1а). Метод Маршала [4, 5] позволил получить коэффициент внутреннего трения при расколе (рис. 1б) с использованием зависимостей:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{3 \cdot \left(A_M - A_C \right)}{3 \cdot A_M - 2 \cdot A_C}; \quad (1)$$

где A_m и A_c – работа сил при деформации образца по схеме Маршала и при одноосном сжатии соответственно. A_m и A_c определяют по формуле:

$$A_{m(c)} = \frac{F \cdot l}{2}; \quad (2)$$

где F – разрушающее усилие, кН; l – предельная деформация, мм;

Показатель сцепления c находят в зависимости от полученного угла внутреннего трения и предела прочности асфальтобетона на сжатие:

$$c = \frac{1}{6} (3 - 2 \operatorname{tg} \phi) \cdot R_{сж}; \quad (3)$$

где $R_{сж}$ – предел прочности образца асфальтобетона на одноосное сжатие, МПа.

Прогрессивный подход, основанный на комплексе испытаний, реализован в методе Супервейв [6, 7], который постепенно вытесняет предыдущие методы.

Определенное место занимают пенетрационные методы (рисунок 1г), основанные на анализе деформационных свойств асфальтобетона под действием нагрузки [8, 9, 10].

Описанные выше методы специально разрабатывались для анализа длительной прочности и устойчивости асфальтобетонных покрытий. Однако, для силового и энергетического анализа процесса фрезерования такой показатель неприемлем. Известно, что при основной причине потери эксплуатационной прочности является нарушение связей между отдельными структурообразующими компонентами материала. Это вызывает появление дефектов в виде трещин, сколов и выбоин в покрытии. Процесс фрезерования сопровождается так же активным дроблением каменной фракции, что на порядок увеличивает затраты энергии.

Именно поэтому, метод определения показателя прочности дорожного асфальтобетона должен учитывать как прочность связей между зёрнами, так и прочность самих зёрен.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее близким с этой точки зрения является метод статической пенетрации, так как при использовании этого метода проявляется разрушение каменной фракции материала наряду с разрушением связей между зёрнами. Такие явления характерны и для процесса фрезерования асфальтобетона.

На прочность асфальтобетона существенное влияние оказывает его температура. Независимо от способа испытания, при изменении температуры от нуля до пятидесяти градусов по Цельсию, прочность изменяется в несколько раз. Поэтому, полученное значение показателя прочности асфальтобетона необходимо всегда привязывать к температуре.

В рамках работ по исследованию нахождения показателя прочности дорожных асфальтобетонов различных марок была проведена серия экспериментов, позволившая оценить влияние различных факторов на показатель прочности. Сравнивались показатели прочности, которые получены методом разрушения на одноосное сжатие образца цилиндрической формы стандартных размеров по методике ГОСТ 12801-98 [11] и показатели прочности этих же

образцов асфальтобетона, полученные методом статической пенетрации. Последний метод не является стандартным и реализован на гидравлическом прессе (рис. 2) при использовании штампов цилиндрической и линейной форм, с отображением и записью значений на персональный компьютер.

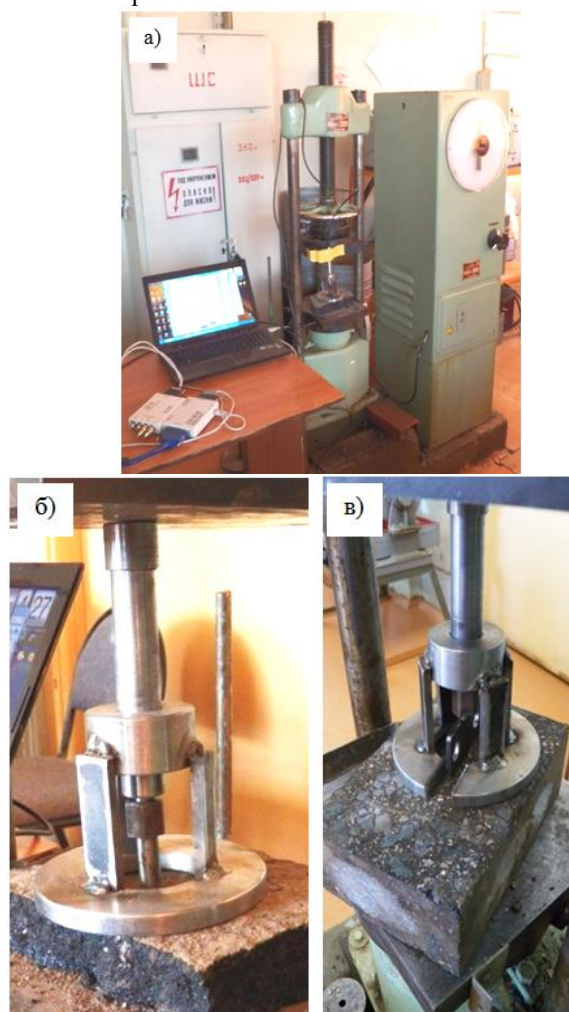


Рис 2. Лабораторный стенд для определения показателя прочности асфальтобетона методом статической пенетрации: а – общий вид; б – пенетрация цилиндрическим профилем, в – пенетрация линейным профилем

В ходе исследования использовались образцы с температурами 0, 20 и 50 градусов по Цельсию, предварительно подвергшиеся термостатированию. Выбраны следующие марки дорожных асфальтобетонов А1, Б1 и Д3 по ГОСТ 9128-2009[12] а так же ЩМА -15 по ГОСТ 31015-2002[13]. В таблице 1 приведен состав этих асфальтобетонов.

Для метода статической пенетрации определялись предельные контактные напряжения, характеризующиеся максимальной силой вдавливания цилиндрического и линейного профиля. Значения предельных контактных напряжений σ (МПа) определялись по формулам:

- для цилиндрического профиля:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi \cdot d^2}; \quad (4)$$

где F – сила вдавливания штампа, Н; d – диаметр штампа, мм; - для линейного профиля:

$$\sigma = \frac{F}{\delta \cdot a}; \quad (5)$$

где a – длина профиля, мм; δ – ширина профиля, мм.

Ниже представлены результаты испытаний четырех типов асфальтовых бетонов, широко используемых для решения различных задач строительства дорог и аэродромов, отличающиеся по назначению, прочностным показателям и составу.

Таблица 1
Состав образцов асфальтобетона, принятых для проведения исследований

| Параметр | Марка асфальтобетона | | | |
|---------------|------------------------|--|---|---|
| | ДЗ | ЩМА-15 | А1 | Б1 |
| Классификация | Песчаный асфальтобетон | Зернистый асфальтобетон с содержанием щебня до 80% | Зернистый асфальтобетон с содержанием щебня 50-60 % | Зернистый асфальтобетон с содержанием щебня 40-50 % |
| Щебень | Не используется | Гранитный щебень марки М1200[14] | | |
| Битум | БНД 60/90[15] | БНД 60/90, модифицированный | БНД 60/90 | БНД 60/90 |

На рисунке 3 представлены графики зависимости показателя прочности в зависимости от температуры при испытании на одноосное сжатие и, полученное при вдавливании цилиндрического профиля, диаметром 13 мм для песчаного асфальтобетона, марки ДЗ. Существенное различие показателя прочности указывает на недопустимость опираться на стандартный метод при определении сопротивляемости фрезерованию.

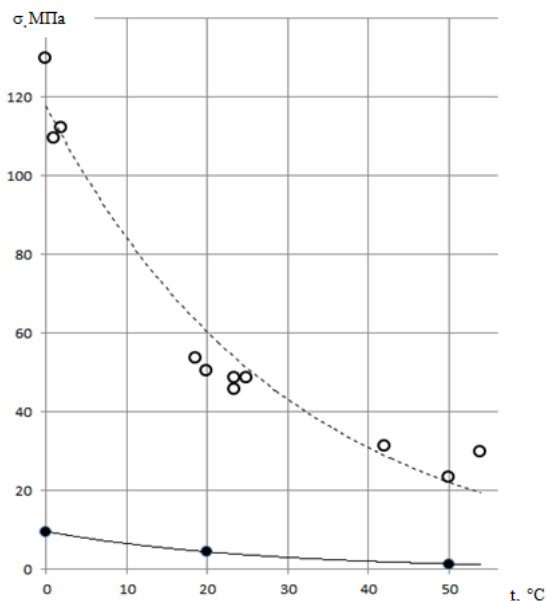


Рис. 3. График зависимости предела прочности асфальтобетона марки ДЗ от температуры: о - предел контактной прочности при вдавливании цилиндрического профиля, диаметром 13 мм; • - предел прочности стандартных образцов при испытании на одноосное сжатие

На рисунке 4 показаны графики, полученные при испытании образцов зернистых асфальтобетонов марок А1 и Б1, для которых получены значения показателя прочности не только цилиндрическим штампом, но и линейным профилем. Так как определенная зернистость асфальтобетона вызывает неравномерное сопротивление вдавливанию цилиндрического профиля, результаты такого исследования имеют существенный разброс. Линейный профиль воздействует одновременно на несколько зерен, обеспечивая более стабильный результат. Для зернистых асфальтовых бетонов так же характерно существенное отличие показателя прочности на одноосное сжатие стандартных образцов и показателя прочности, полученного методом статической пенетрации.

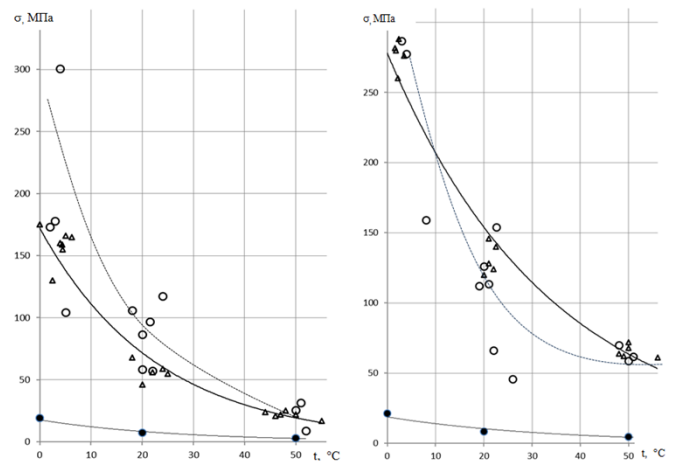


Рис. 4. Графики зависимости показателей прочности асфальтобетона марки Б1 (а) и А1 (б) от температуры: о - предел контактной прочности при вдавливании цилиндрического профиля, диаметром 13 мм; • - предел прочности при испытании на одноосное сжатие; Δ - предел контактной прочности при вдавливании прямоугольного профиля, толщиной 3 мм и длиной 60 мм;

Выводы

На основании экспериментальных работ можно сделать следующие выводы:

- стандартные методы, применяемые для оценки качества дорожного покрытия, не подходят для оценки показателя его сопротивляемости резанию;
- наиболее близким методом для оценки показателя сопротивляемости фрезерованию асфальтобетона, с точки зрения подобия процессов разрушения материала, является метод статической пенетрации;
- численные значения предельных контактных напряжений, полученных методом статической пенетрации в несколько раз превышают значения предела прочности, полученного методом разрушения образцов стандартных размеров на одноосное сжатие;
- определение показателя прочности методом статической пенетрации зернистых асфальтобетонов с более высокой повторяемостью результатов реализуемо при использовании линейного профиля.
- как для пенетрационных методов так и для метода разрушения стандартных образцов на одноосное сжатие, характерно существенное увеличение показателя прочности

при уменьшении температуры. Особенно это характерно для низких температур. Это однозначно указывает на то, что силы резания асфальтобетона, сосредоточенные на зубьях фрезерного рабочего органа, и, соответственно, энергоёмкость процесса фрезерования, существенно зависят от температуры асфальтобетона.

Таким образом, рациональное проектирование фрезерных рабочих органов и фрезерных машин в целом неизбежно зависит от прочности материалов. Для оперативного прогнозирования нагрузок на фрезерный рабочий орган возможно установить подобие между силами резания на резах фрезерного барабана и предельными контактными напряжениями, определенными методом статической пенетрации.

Данный метод так же позволяет обозначить подходы для определения рациональных областей использования фрезерного оборудования, учитывая погодные условия, время года и время суток для проведения фрезерных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радовский Б.С. Методы проектирования состава асфальтобетонных смесей в США / Б.С. Радовский // Дорожная техника – 2006 - №6 – С. 68-81.
2. Кирюхин Г.Н. Проектирование состава асфальтобетона и методы его испытаний. Обзорная информация // Автомобильные дороги и мосты. –М.: 2005. – Вып. 6. – 96 с.
3. Радовский Б.С. Современное состояние разработки американского метода проектирования асфальтобетонных смесей суперпейв / Б. С. Радовский // Дорожная техника – 2008 - №6 – С. 12-22.
4. The Asphalt Handbook: MS-4 // Asphalt Institute. - 1989
5. Asphalt cold mix manual // Manual series № 14 // Asphalt institute. – Lexington, KY, 1997.
6. Радовский Б.С. Проектирование состава асфальтобетонных смесей по методу Суперпейв. // Дорожная Техника. Санкт-Петербург: 2007, – С. 86 – 99.
7. Superpave. Final Report of the TRB Superpave Committee. TRB, 2005, pp.1 – 56.
8. Еремин В.Г. Результаты исследования деформационно-прочностных свойств асфальтобетона методом вдавливания сферического штампа / В.Г. Еремин, А.В. Еремин, В.П. Волокитин // Науч. Вестник Воронеж, гос. архит.-строит, ун-та. Сер. Дор.-трансп. стр.-во. - 2003. - № 1.
9. Ладыгин Б.И. Прочность и долговечность асфальтобетона. / под ред. Б. И. Ладыгина и И. К. Яцевича. – Минск, «Наука и техника», 1972. – 288 с.
10. Еремин В.Г. Результаты исследования деформационно-прочностных свойств асфальтобетона методом вдавливания сферического штампа / В.Г. Еремин, А.В. Еремин, В.П. Волокитин // Науч. Вестник Воронеж, гос. архит.-строит, ун-та. Сер. Дор.-трансп. стр.-во. - 2003. - № 1.
11. ГОСТ 12801 – 98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – М.: изд. МНТКС, 1999.
12. ГОСТ 9128-2009 Смеси асфальтобетонные, дорожные и аэродромные и асфальтобетон. Технические условия. Введены с 1.01.2009 – М.: Стандартиформ, 2010.
13. ГОСТ 31015-2002 Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия. Введены с 1.05.2003 – М.: Стандартиформ, 2003.
14. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Введены с 10.11.1993 – М.:Стандартиформ, 1994.
15. ГОСТ 22245-90 Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. Введены с 1.01.1991, – М.: ИПК Издательство стандартов, 2005.

Asphalt Concrete as an Object of Destruction by the Operating units of Milling Machines

Furmanov D.V., Nikolayev V.A., Klochko N.N.
Yaroslavl State Technical University
Yaroslavl, Russia
denisfurmanoff@yandex.ru

Abstract. The article contains the analysis of methods to determine the durability of road asphalt concrete in regards to the resistance to cutting. The article also contains the results of durability tests of several types of asphalt concrete done by static penetration, as well as the description of the method specified. It also provides the comparative evaluation of the results obtained by using static penetration and with the standard method.

Keywords: rotary hoes, asphalt concrete, asphalt concrete milling, static penetration, contact durability limit, milling machine designing, linear compression.

К обоснованию влияния количества амортизаторов на характеристики колебаний вальца и рамы вибрационного катка

Тюремнов И.С., Федорова Д.В., Морев А.С.
Ярославский государственный технический университет
Ярославль, Россия
tyuremnovis@yandex.ru, asmorev@bk.ru

Аннотация. В статье представлены результаты математического моделирования колебаний вальца и рамы вальца вибрационного катка при изменении характеристик уплотняемого грунта и количества амортизаторов. Используемая реологическая модель позволяет анализировать особенности взаимодействия вибрационного вальца катка с уплотняемым материалом в режимах постоянный контакт, частичный отрыв и двойной прыжок. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по исследованию влияния количества и характеристик амортизаторов вибрационного вальца на характеристики колебаний вальца и рамы вальца в рамках модернизации вибрационного катка DM-614 производства Рыбинского Завода Дорожных машин с целью увеличения вынуждающего усилия вибровозбудителя с 215 кН до 280 кН. Вычислительный эксперимент проводился для различного количества амортизаторов при различных значениях коэффициента упругого сопротивления грунта. Задачами исследований являлось определение размаха колебаний вибрационного вальца и рамы вибрационного вальца катка DM-614 в процессе уплотнения грунта. Полученные результаты позволяют обосновать количество и характеристики амортизаторов вибрационного вальца для обеспечения безопасного уровня колебаний, передаваемых на кабину оператора, с учётом использования вибрационного катка при уплотнении различных дорожно-строительных материалов в широком диапазоне изменения коэффициентов уплотнения.

Ключевые слова: грунт, уплотнение, вибрация, усилие вынуждающее, каток вибрационный, валец вибрационный, рама вальца, амортизатор вальца.

ВВЕДЕНИЕ

Вибрационные катки являются наиболее распространенным средством механизации уплотнения грунтов и каменных материалов в дорожном строительстве. Основными техническими характеристиками вибрационных грунтовых катков, определяющие их технологические возможности при уплотнении дорожно-строительных материалов, являются: эксплуатационная масса; масса, приходящаяся на вибровальцовый модуль; вынуждающее усилие и частота колебаний; диаметр и ширина вибрационного вальца; мощность двигателя и некоторые другие параметры. Несмотря на многолетний опыт производства и эксплуатации вибрационных катков, производители до сих пор не пришли к единому мнению по обоснованию численных значений вышеприведённых характеристик, следствием чего является существенный разброс значений вышеприведённых характеристик у моделей вибрационных катков сопоставимой массы, выпускаемых различными производителями [1, 2]. Ещё сложнее обстоит дело с обоснованием значения амплитуды колебаний вибрационного

вальца катка, которая зависит не только от массы вибрационного вальца, вынуждающего усилия и частоты колебаний, но и от свойств уплотняемого материала, а также от количества и характеристик амортизаторов вибрационного вальца [3, 4].

Таким образом, наряду с основными характеристиками вибрационного катка, количество и характеристики амортизаторов вибрационного вальца оказывают существенное влияние на характер колебаний вальца («постоянный контакт», «частичный отрыв», «двойной прыжок» [5, 6, 7]) и, следовательно, на эффективность уплотнения дорожно-строительных материалов. Также количество и характеристики амортизаторов будут влиять на уровень вибрации, передаваемой на раму вибрационного вальца и всего катка, а также на характеристики вибрации на рабочем месте машиниста.

Исследование влияния количества и характеристик амортизаторов вибрационного вальца на характеристики колебаний вальца и рамы вальца может быть осуществлено с использованием реологической модели, предложенной в работе [8]. Особенностью данной модели является возможность учета отрыва вибрационного вальца от уплотняемого материала в процессе его уплотнения, что позволяет анализировать особенности взаимодействия вибрационного вальца катка с уплотняемым материалом в режимах «постоянного контакта» (валец в процессе колебаний не теряет контакта с уплотняемым материалом), «частичного отрыва» (валец в каждом цикле колебаний отрывается от уплотняемого материала, но амплитуда смежных отскоков вальца одинакова) и «двойного прыжка» (валец в каждом цикле колебаний отрывается от уплотняемого материала, но амплитуда смежных отскоков вальца различна, что вызывает повышенные пиковые нагрузки на подшипниковые узлы и амортизаторы вибрационного вальца и снижает эффективность уплотнения) [7, 9].

Вычислительный эксперимент по исследованию влияния количества и характеристик амортизаторов вибрационного вальца на характеристики колебаний вальца и рамы вальца проводился в рамках модернизации вибрационного катка DM-614 производства Рыбинского «Завода «Дорожных машин» (эксплуатационная масса - 14000 кг, масса вибрационного вальца - 4000 кг, масса рамы вальца - 4000 кг, частота колебаний вибровозбудителя 30 Гц), одной из задач которой являлось увеличение вынуждающего усилия вибрационного вальца с 215 до 280 кН.

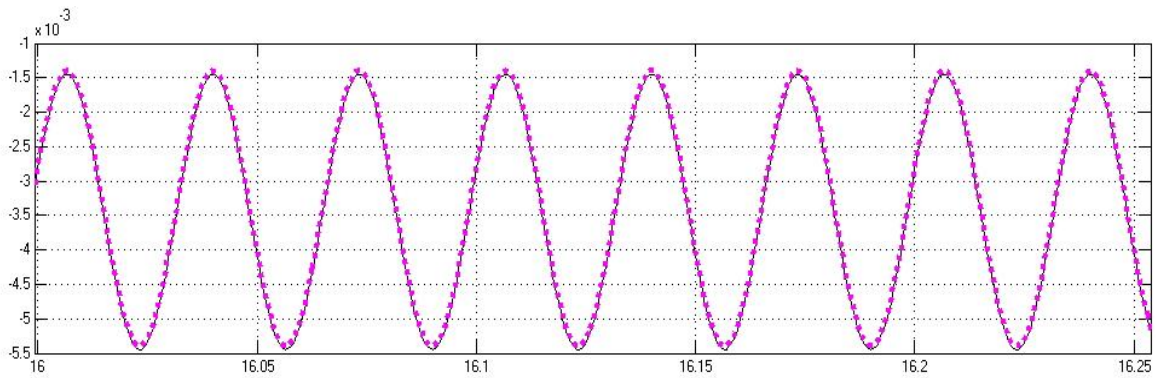


Рис. 1. Перемещение вибрационного вальца катка DM-614 (20 амортизаторов У150.030, $k_s = 58$ МН/м)

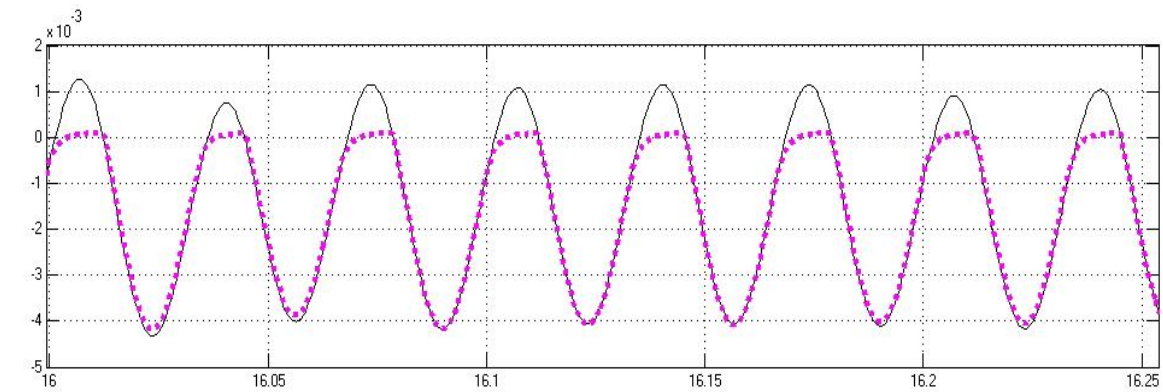


Рис. 2. Перемещение вибрационного вальца катка DM-614 (20 амортизаторов У150.030, $k_s = 100$ МН/м)

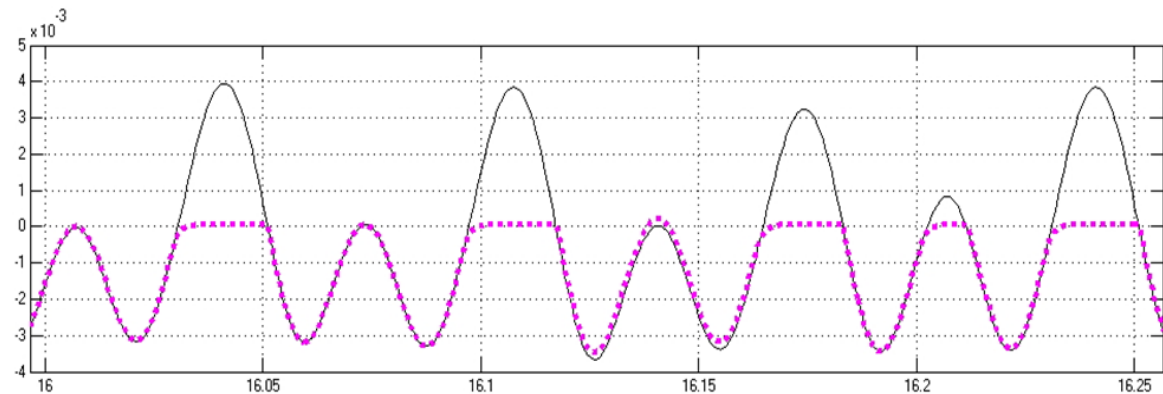


Рис. 3. Перемещение вибрационного вальца катка DM-614 (20 амортизаторов У150.030, $k_s = 145$ МН/м)

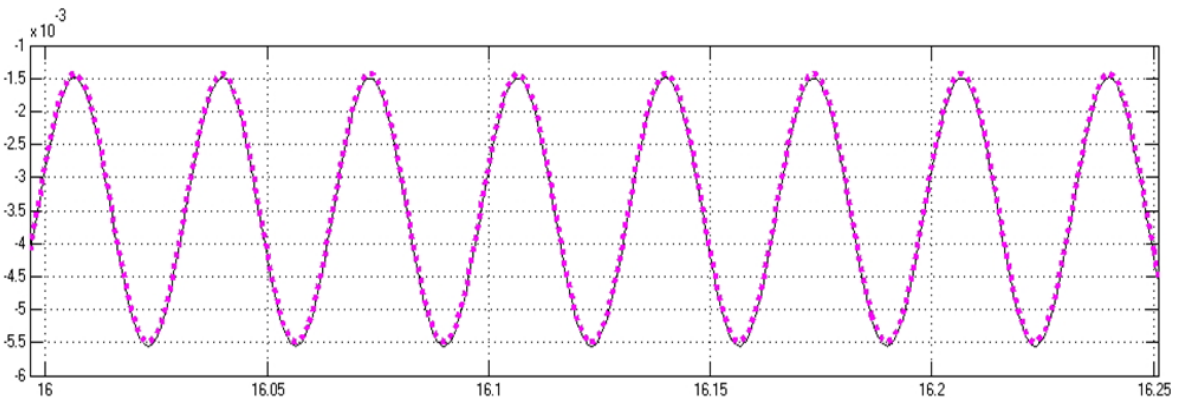


Рис. 4. Перемещение вибрационного вальца катка DM-614 (26 амортизаторов У150.030, $k_s = 58$ МН/м)

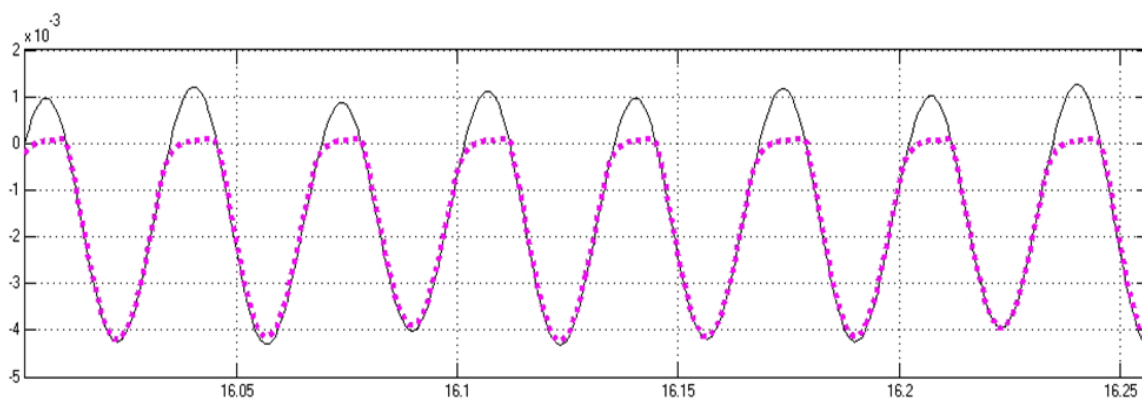


Рис. 5. Перемещение вибрационного вальца катка DM-614 (26 амортизаторов У150.030, $k_s = 100$ МН/м)

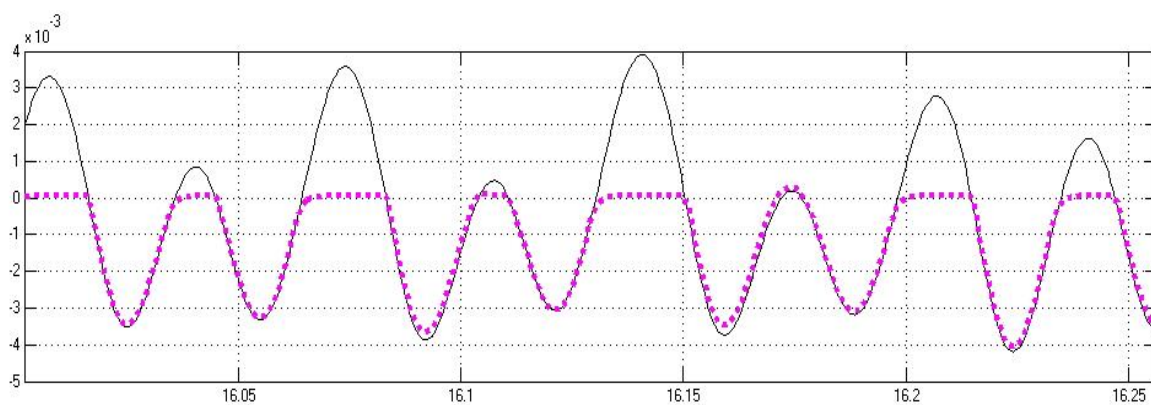


Рис. 6. Перемещение вибрационного вальца катка DM-614 (26 амортизаторов У150.030, $k_s = 145$ МН/м)

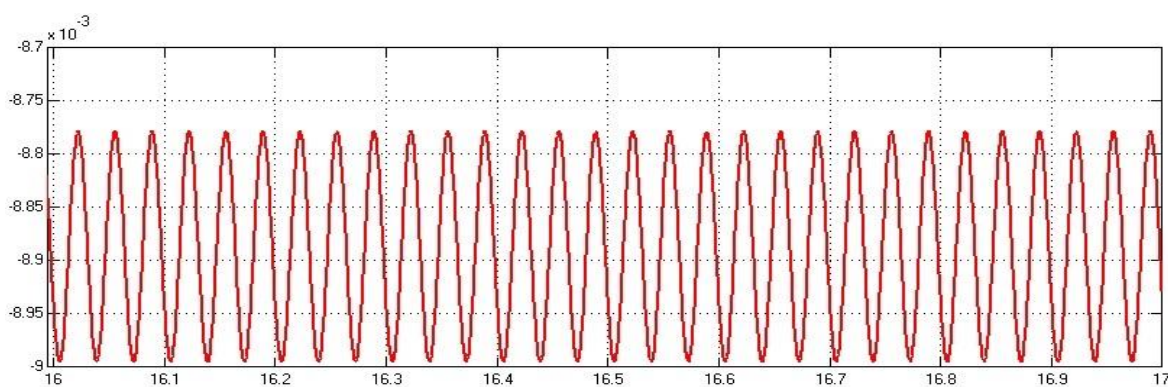


Рис. 7. Перемещение рамы вибрационного вальца катка DM-614 (20 амортизаторов У150.030, $k_s = 58$ МН/м)

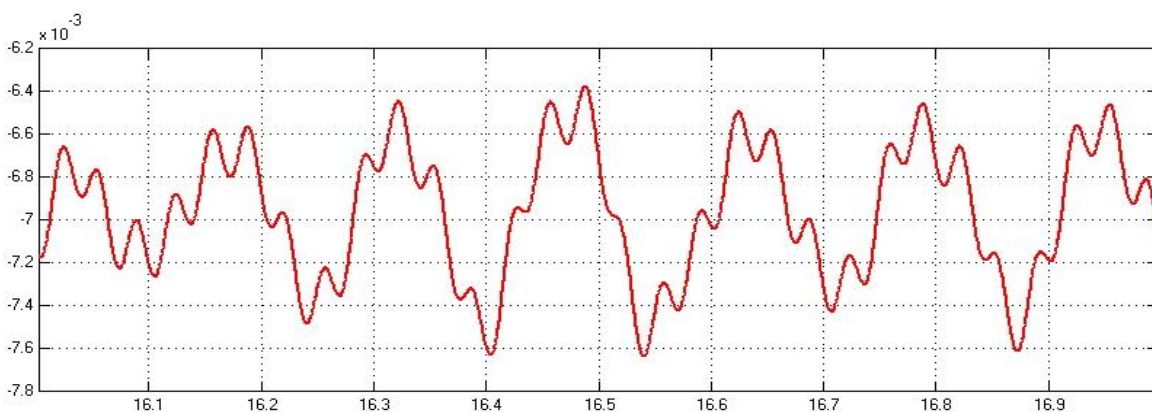


Рис. 8. Перемещение рамы вибрационного вальца катка DM-614 (20 амортизаторов У150.030, $k_s = 100$ МН/м)

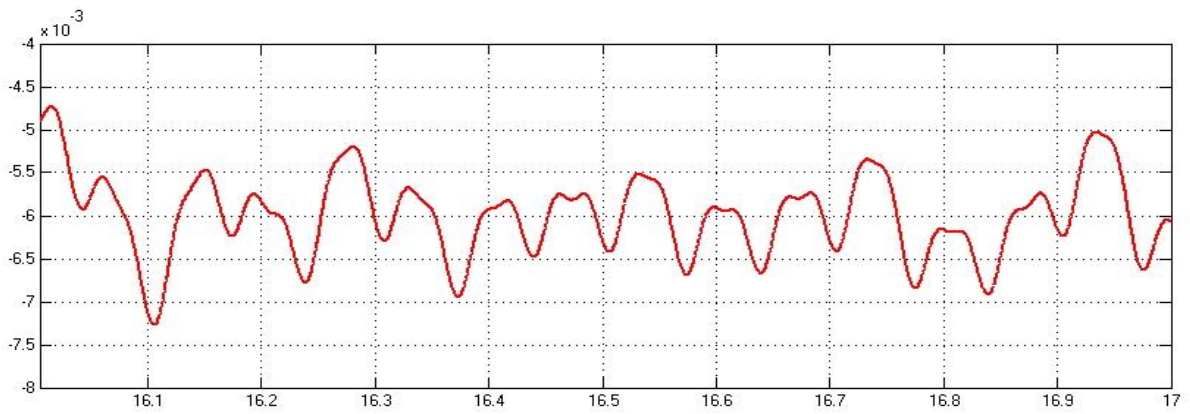


Рис. 9. Перемещение рамы вибрационного вальца катка DM-614 (20 амортизаторов У150.030, $k_s = 145$ МН/м)

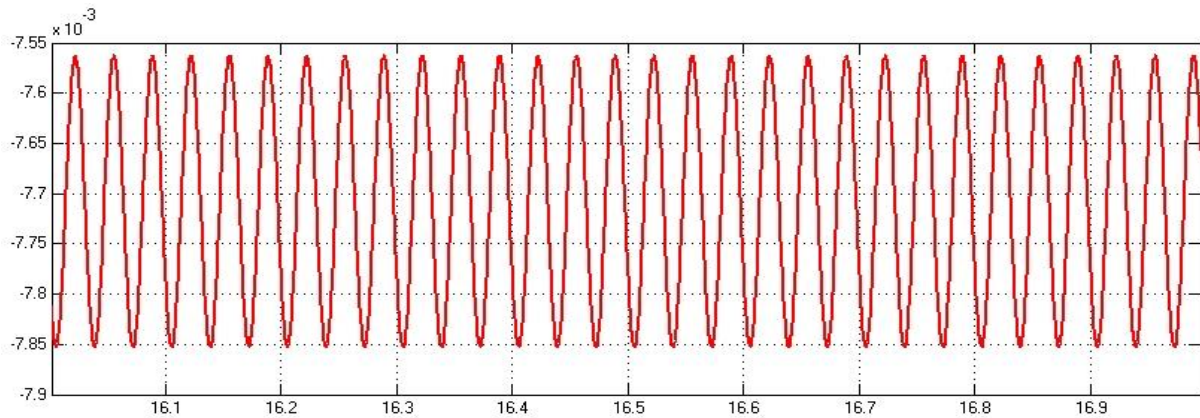


Рис. 10. Перемещение рамы вибрационного вальца катка DM-614 (20 амортизаторов У150.030, $k_s = 145$ МН/м)

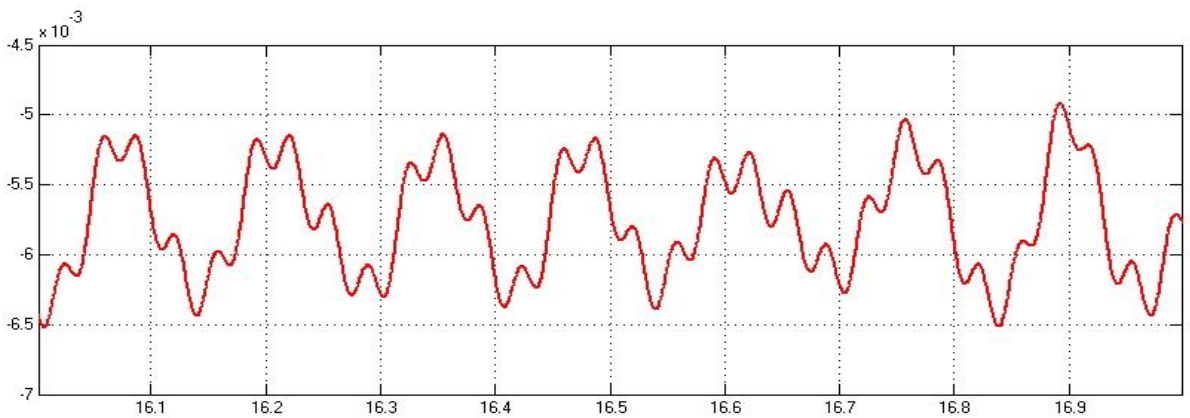


Рис. 11. Перемещение рамы вибрационного вальца катка DM-614 (20 амортизаторов У150.030, $k_s = 145$ МН/м)

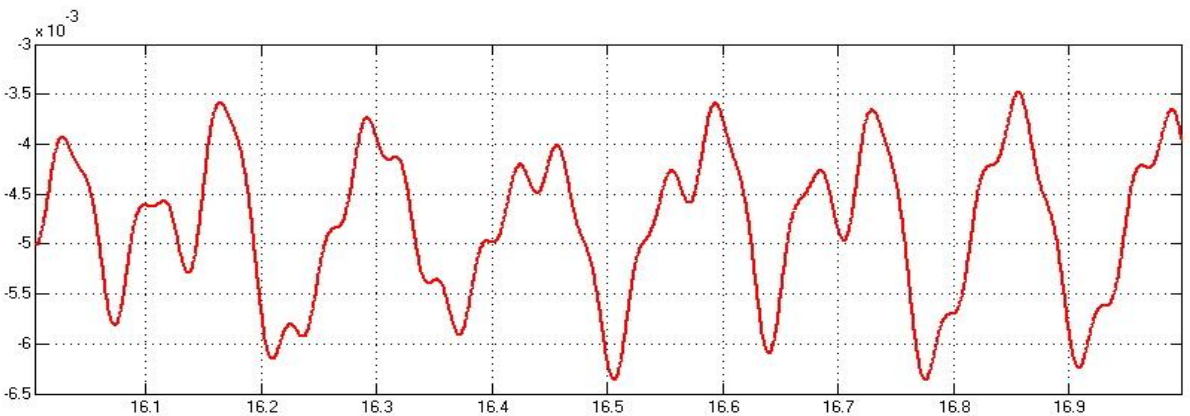


Рис. 12. Перемещение рамы вибрационного вальца катка DM-614 (20 амортизаторов У150.030, $k_s = 145$ МН/м)

Значение коэффициента упругого сопротивления одного амортизатора У150.030 (данный тип амортизаторов устанавливается на катки ДМ-614) на основании исследований [10] принималось равным $k_f = 0,362$ МН/м.

Значение коэффициента вязкого сопротивления одного амортизатора (b_f) определялось по зависимости [11], МН·с/м:

$$b_f = k_f \cdot \eta / \omega \quad (1)$$

где: η – фактор потерь ($\eta = 0,16$ [11]); ω – угловая частота колебаний вибровозбудителя, рад/сек.

Вычислительный эксперимент для вибрационного грунтового катка ДМ-614 с установленными на вальце 20, 22, 24 и 26 амортизаторами У150.030 проводился при различных значениях коэффициента упругого сопротивления грунта k_s . Значение коэффициента вязкого сопротивления грунта принималось постоянным и равным $b_s = 0,21$ МН·с/м² [11].

На рис. 1-12 представлены некоторые результаты расчетных перемещений вибрационного вальца и рамы вибрационного вальца катка ДМ-614 при 20 и 26 амортизаторах.

При установке 20 амортизаторов на начальной и средней стадиях уплотнения грунта ($k_s = 20$ и 58 МН/м) реализуется режим колебаний «постоянный контакт» с размахом колебаний вибрационного вальца в диапазоне от 3,1 до 4 мм и размахом колебаний рамы вибрационного вальца в диапазоне от 0,18 до 0,22 мм (см. рис. 1-2, 5-6 и табл. 1-2). При значении $k_s = 100$ МН/м наблюдаются колебания в режиме «частичный отрыв» с размахом колебаний вибрационного вальца 5,2 мм и размахом колебаний рамы вибрационного вальца 1,2 мм (см. рис. 3 и 7, табл. 1-2). При значении $k_s = 145$ МН/м наблюдается нежелательный режим колебаний «двойной прыжок», при котором размах колебаний вибрационного вальца достигает 7,2 мм и размах колебаний рамы вибрационного вальца 1,75 мм (см. рис. 4 и 8, табл. 1-2).

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента по определению характеристик колебаний вальца вибрационного катка ДМ-614.

| Количество амортизаторов | Размах колебаний вибрационного вальца, мм | | | |
|--------------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | $k_s=20$ МН/м ($K_y=0,900$) | $k_s=58$ МН/м ($K_y=0,95$) | $k_s=100$ МН/м ($K_y=0,97$) | $k_s=145$ МН/м ($K_y=1,00$) |
| 20 | 3,1 | 4,0 | 5,2 | 7,2 |
| 22 | 3,3 | 4,0 | 5,4 | 7,35 |
| 24 | 3,2 | 4,0 | 5,5 | 7,7 |
| 26 | 3,4 | 4,1 | 5,3 | 7,5 |

Полученные при установке 20, 22, 24 и 26 амортизаторов значения расчетного размаха колебаний вибрационного вальца и рамы вибрационного вальца приведены в табл. 1 и 2.

Благодаря данному эксперименту возможно обоснование количества и характеристик амортизаторов вибрационного вальца для обеспечения безопасного уровня колеба-

ний, передаваемых на кабину оператора, с учётом использования вибрационного катка при уплотнении различных дорожно-строительных материалов в широком диапазоне изменения коэффициентов уплотнения.

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента по определению характеристик колебаний рамы вибрационного катка ДМ-614

| Количество амортизаторов | Размах колебаний рамы вибрационного вальца, мм | | | |
|--------------------------|--|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | $k_s=20$ МН/м ($K_y=0,900$) | $k_s=58$ МН/м ($K_y=0,95$) | $k_s=100$ МН/м ($K_y=0,97$) | $k_s=145$ МН/м ($K_y=1,00$) |
| 20 | 0,18 | 0,22 | 1,22 | 1,75 |
| 22 | 0,19 | 0,24 | 1,18 | 4,5 |
| 24 | 0,22 | 0,26 | 1,18 | 2,5 |
| 26 | 0,23 | 0,28 | 1,65 | 2,75 |

Аналогично можно получить данные для исследования влияния технических характеристик катка на значения усилий в амортизаторах и подшипниковых узлах вибрационного модуля катка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Анализ данных, приведённых в табл. 1 и 2 показывает, что при 20 или 24 амортизаторах наблюдается уменьшение размаха колебаний рамы вибрационного вальца по сравнению со значениями, соответствующими 22 или 26 амортизаторам, что говорит о целесообразности использования 20 или 24 амортизаторов У150.030 при модернизации вибрационного вальца на вынуждающее усилие 280 кН. по сравнению с 20 амортизаторами, использующимися на катке ДМ-614 с вынуждающим усилием 215 кН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тюремнов И.С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков / И.С. Тюремнов, А.А. Игнатъев, И.С. Филатов // Вестник ТОГУ, 2014. – № 3(34) – С. 81-88.
2. Тюремнов И.С. / И.С. Тюремнов, А.А. Игнатъев // Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2012. – 140 с.
3. Тюремнов И.С. «Интеллектуальные» катки – «интеллектуальное» уплотнение / И.С. Тюремнов, Е.К. Чабуткин, Р.Д. Окулов // Строительные и дорожные машины, 2008. – № 8. – С. 2-7.
4. Михеев В.В. О критерии эффективности процесса виброуплотнения грунтов катками с адаптивными рабочими органами / В.В. Михеев, С.В. Савельев // В сборнике: Север России: стратегии и перспективы развития материалы II Всероссийской научно-практической конференции. 2016. – С. 98-105.
5. Adam D., Kopf F. (2004) Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece. P. 97–106.

6. Mooney M.A., Rinehart R.V., Facas N.W., Musimbi O.M. (2010) Intelligent Soil Compaction Systems. Report 676. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/> Accessed 04.12.2014.

7. Тюремнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и «интеллектуальное уплотнение» // Вестник ТОГУ, 2016. – № 2(41). – С. 115-122.

8. Морев А.С. Обоснование показателя уплотнения для системы непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками: дис. к. техн. наук. – Ярославль, 2017. – 184 с.

9. Тюремнов И.С. Реологическая модель взаимодействия вибрационного вальца катка с уплотняемым грунтом

/ И.С. Тюремнов, И.С. Филатов, А.С. Морев // Мир дорог, 2012. – № 59 (март), – С. 86-88.

10. Тюремнов И.С. Экспериментальное определение численных значений коэффициента упругого сопротивления сдвигу амортизаторов У150.030 для вибрационных катков / И.С. Тюремнов, Д.В. Фёдорова, А.С. Морев, Н.Е. Тарасова // Механизация строительства, 2017. – № 4, – С. 42-45.

11. Paul J. van Susante, Mooney M.A. (2008) Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling. Journal of engineering mechanics ASCE. – 08.2008. – P. 684-693.

Study of the Impact of the Amount of Shock Absorbers on the Parameters of Vibrations of the Drum and the Frame of a Vibrating Roller

Tyuremnov I.S., Fyodorova D.V., Morev A.S.

Yaroslavl State Technical University

Yaroslavl, Russia

tyuremnovis@yandex.ru, fyodorovadv@ystu.ru, asmorrev@bk.ru.

Abstract. The article presents the results of mathematical modeling of the oscillations of the roller and the frame of the roller of the vibratory roller with a change in the characteristics of the soil compacted and the number of shock absorbers. The rheological model used makes it possible to analyze the features of the interaction of the vibrating roller drum with the material being compacted in the continuous contact, partial uplift and double jump modes. The paper presents the results of a computational experiment to study the effect of the number and characteristics of absorbers on the oscillation characteristics of the drum and the drum frame as part of the modernization of the DM-614 vibration roller produced by the Rybinsk Plant of Road Machines with the aim of increasing the efforts of the vibratory pathogen from 215 kN to 280 kN. The computational experiment was carried out for different

numbers of shock absorbers with different values of the coefficient of elastic resistance of the soil. The objectives of the research were to determine the magnitude of oscillations of the vibrating roller and the frame of drum of the vibrating roller DM-614 in the process of soil compaction. The obtained results make it possible to justify the number and characteristics of the vibration roller shock absorbers to ensure a safe level of vibrations transmitted to the operator's cabin, considering the use of a vibrating roller in compacting various road construction materials in a wide range of variations in compaction coefficients.

Keywords: soil, compaction, vibration, impact force, vibrating roller, vibratory drum, drum frame, drum shock absorber.

Обеспечение геометрии поверхностей на стадии проектирования операции профильного фрезерования некондиционных заготовок

Гусев В.Г., Фомин А.А.

Владимирский государственный университет им. А.Г. Н.Г. Столетовых

Владимир, Россия

prof_gusev@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается технологическая операция профильного фрезерования древесины и крупных отходов (некондиционных заготовок в виде периферийных сегментов), образующихся в результате механического раскроя бревен. Прогнозирование геометрических характеристик профильных изделий из некондиционных заготовок на основе результатов проектного расчета позволяет сократить объем экспериментальных работ по обеспечению требуемой геометрии на стадии освоения производства изделий. Разработан алгоритм расчета характеристик процесса профильного фрезерования, реализация которого потребовала математического обеспечения проектной процедуры адекватными аналитическими моделями срезаемого слоя, главной и радиальной составляющих силы резания, мощности профильного фрезерования и геометрических погрешностей обработанных поверхностей. Установленные модели определяют закономерности изменения силовых характеристик профильного фрезерования некондиционных заготовок, геометрии обработанной поверхности в функции элементов режима резания, характеристики фасонного режущего инструмента и периферийного сегмента. Итерационные расчеты указанных параметров, выполненные с использованием разработанного алгоритма и адекватных математических моделей, позволяют определить условия профильного фрезерования, при которых обеспечивается требуемая геометрическая точность поверхностей при максимально возможной производительности процесса обработки некондиционных заготовок.

Ключевые слова: профильное фрезерование, некондиционная заготовка, технологическая операция, геометрическая точность, фасонная фреза, сила резания.

ВВЕДЕНИЕ

Наша планета обладает богатыми лесными природными ресурсами, которые используются для производства продукции путем переработки древесины и ее отходов [1-6], в т. ч. механической обработки фрезерованием [7-12]. Исследованы динамика снятия припуска [8], кинематика формирования обработанной поверхности [9], ее микрогеометрия, волнистость, формирование стружки [10-12], влияние условий фрезерования на качество обработанных поверхностей [13], а также сила резания [14] и жесткость шпиндельного узла при фрезеровании некондиционных заготовок [15]. Проанализирована толщина стружки [16], стабильность фрезерной операции [17] и определены оптимальные параметры фрезерования [18].

Влияние режущего инструмента, свойств древесины, способов раскроя, технологической оснастки, оборудования и пр. на эффективность процессов цилиндрического и углового фрезерования древесины изучено достаточно подробно, а профильное фрезерование древесины, неконди-

ционных заготовок, динамика формообразования фасонных поверхностей не исследованы, вследствие чего производительность, точность изделий, себестоимость выпускаемой профильной продукции и другие показатели эффективности процесса определяются субъективным фактором.

Известны и используются сложные и дорогие системы механической обработки, которые обеспечивают комплексный раскрой бревен (в то же самое время и периферийных сегментов на малые элементы). Эти малые элементы периферийных сегментов склеивают, сушат и подвергают механической обработке, что приводит к ухудшению экологической обстановки (из-за применения клеев), к удлинению технологического процесса и значительному возвышению цены готового изделия.

Перспективной является разработка значительно более дешевого оборудования и экологически чистых процессов профильного фрезерования некондиционных заготовок. На основе этого оборудования реален выпуск качественной профильной продукции типа «Блок-хаус» и др..

В настоящее время разработано опытное технологическое оборудование с программным управлением и системой автоматического управления скоростью рабочей подачи. Оно позволяет выполнять профильное фрезерование некондиционных заготовок. Высокая эффективность использования этого оборудования достигается при достоверных проектных значениях режимов резания и параметров изделий. В связи с этим необходим алгоритм расчета параметров механической обработки некондиционных заготовок

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НЕКОНДИЦИОННЫХ ЗАГОТОВОК

Протяженные криволинейные вогнутые и выпуклые поверхности изделий изготавливают фасонными фрезами из обрезной доски, а из крупных отходов древесины, образующихся в результате распила бревен, их пока не производят. Ранее отмечалось, что периферийные части бревен (периферийные сегменты) не отвечают требованиям нормативно-технической и регламентирующей документации на древесную продукцию, характеризуются непредсказуемостью криволинейных контуров, форм и размеров, значительным разбросом твердости обрабатываемого материала, стохастическим расположением сучков, отсутствием развитых технологических баз, а также сбегом, который вызывает в процессе фрезерования изменение в разы силы и мощности резания.

Все это приводит к экстремальным условиям резания, перегрузке исполнительных органов станка, поломке режу-

шего инструмента и вызывает серьезные трудности при реализации точных и высокопроизводительных процессов профильного фрезерования крупных отходов лесопиления. При раскросе бревна в размер H (рис. 1, а) образуются два периферийных сегмента S_1 , которые имеют одну обработанную плоскость, остальные поверхности покрыты корой.

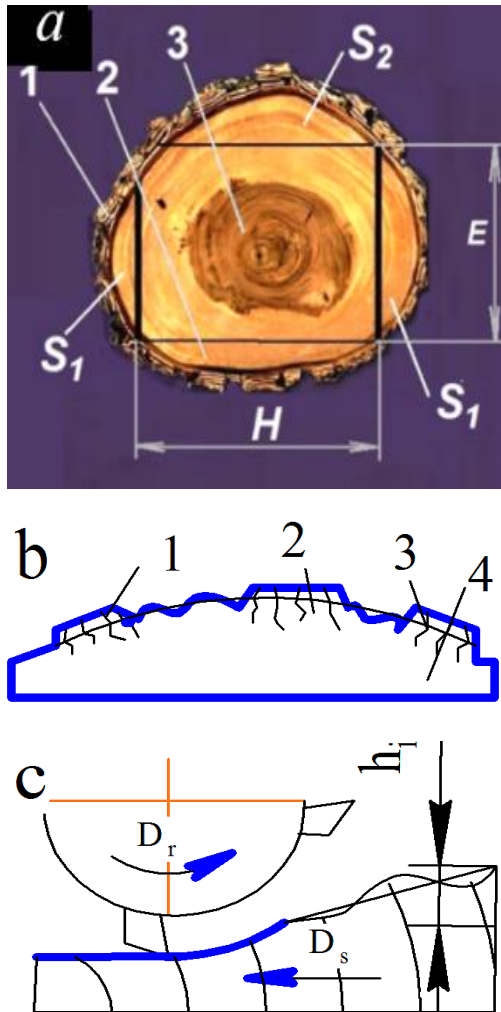


Рис.1. Схема раскроса бревна (а), периферийный сегмент с сучками (б) и фрезерование сегмента со сбегом (с)

При раскросе в размер E в центре бревна образуется брус и два периферийных сегмента S_2 . Сегменты S_1 и S_2 имеют кору 1, периферийные волокна 2, сердцевина 3 расположена в центре бруса. Самые неблагоприятные условия резания возникают при фрезеровании сросшихся сучков 1, 2, 3 (рис. 1, б) и сегментов 4 с увеличивающимся припуском h_i (рис. 1, с). Твердость сучков ели в 2,3–3,7, сосны и лиственницы в 2,2–3,5, березы в 1,3–1,5, осины в 1,25–1,50 раза выше, чем стволовой древесины. Стрелки D_r и D_s показывают направления рабочих движений режущего инструмента и заготовки.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Исходные данные для проектирования процессов профильного фрезерования стволовой древесины и периферийных сегментов с постоянно изменяющимся припуском приведены в первом операторе алгоритма, который включает в себя четыре взаимосвязанных блока,

изображенных в виде прямоугольников 1-4 (рис. 2), разделенных между собой прямыми пунктирными линиями. В операторе 1 первого блока содержатся входные данные о размерах и других характеристиках древесного изделия: ширина B_0 , толщина h_0 ; порода древесины Por (1,7) в количестве семи наименований, исходная влажность древесины $W(\%)$, сучковатость Suc , модули упругости и сдвига E, G ; значения геометрических показателей качества обработанной поверхности, которые необходимо соблюдать при профильном фрезеровании (среднее арифметическое отклонение профиля Ra , волнистость H_B , отклонение профиля продольного δ_{pr} , поперечного δ_p сечений фасонного изделия) и мощность N_d электродвигателя привода главного движения фрезы.

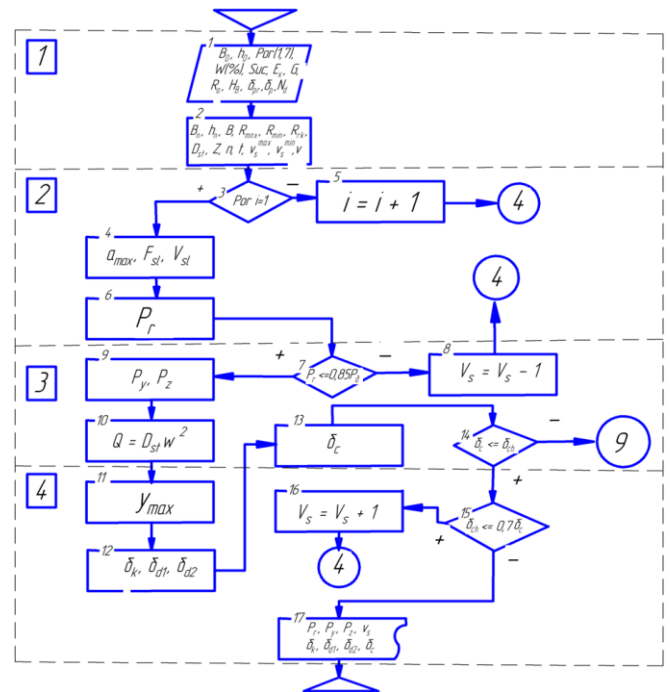


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета параметров профильного фрезерования некондиционных заготовок

В операторе 2 первого блока входят ширина B_n , толщина h_n некондиционной древесной заготовки (периферийного сегмента), размеры фасонной фрезы (высота B , минимальный R_{min} , максимальный R_{max} радиусы и радиус профиля R_{rk}), главный вектор дисбалансов D_{st} , число зубьев Z , частота вращения n шпинделя, глубина резания t , предельные значения продольной подачи v_s^{min} , v_s^{max} и скорости резания v . В операторах 3 и 5 второго блока задается порода древесины, при этом каждому текущему значению i соответствует одно наименование породы, например, сосна, ель, дуб, береза, ясень и др.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ

В операторах 4 и 6 выполняется расчет толщины a_{max} , площади F_{sl} и объема V_{sl} срезаемого слоя соответственно по формулам:

$$a_{max} = R_{rk} (1 - \cos(\arcsin(\frac{zL}{R_{rk}}))) + R_{min} - \sqrt{[R_{rk} (1 - \cos(\arcsin(\frac{zL}{R_{rk}}))) + R_{min}]^2 + (\frac{2\pi v_s}{\omega z})^2} - \frac{4\pi v_s}{\omega z} \sqrt{2[R_{rk} (1 - \cos(\arcsin(\frac{zL}{R_{rk}}))) + R_{min}](t + v_s \text{tg}\beta_{sb}) - (t + v_s \text{tg}\beta_{sb})^2} \quad (1)$$

$$F_{sl} = S_z[(t + v_s \tau \operatorname{tg} \beta_{sb}) + R_{rk} \cos(\arcsin(\frac{z_i}{R_{rk}}))] - \sqrt{[-R_{rk} \cos(\arcsin(\frac{z_i}{R_{rk}})) + R_{\min} + R_{rk}]^2 - (\frac{10^2 \pi v_s}{60 Z \omega})^2 + R_{\min} + R_{rk}}, \quad (2)$$

$$V_{sl} = 2F_{sl} R_{rk} \arcsin(\frac{B}{2R_{rk}}), \quad (3)$$

где R_{rk} , R_{\min} – соответственно радиус профиля фрезы и минимальный ее радиус; z_i – расстояние рассматриваемого поперечного сечения фрезы от ее геометрического центра; v_s – рабочая подача заготовки; ω , z – угловая скорость и число зубьев фрезы соответственно; t – глубина резания, заданная режимом фрезерования; τ – время обработки; β_{sb} – средний статистический угол, характеризующий величину сбега заготовки; B – высота фрезы.

РАСЧЕТ ВНЕШНЕЙ РАБОЧЕЙ НАГРУЗКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ

Мощность профильного фрезерования заготовки с положительным приращением припуска определяем по формуле:

$$P_r = K_t a_{pop} \left(\frac{t + v_s \tau \operatorname{tg} \beta_{sb}}{30} \right) v_s R_{rk} \arcsin(\frac{B}{2R_{rk}}), \quad (4)$$

где K_t – табличное значение удельной работы резания; $a_{pop} = a_p \cdot a_w \cdot a_r \cdot a_\delta \cdot a_v$ – общий поправочный коэффициент; a_p , a_w , a_r , a_δ , a_v – поправочный коэффициент соответственно на породу, влажность древесины, затупление лезвий фрезы, угол резания и скорость резания.

В операторах 7 и 8 третьего блока проверяется соответствие мощности резания мощности электродвигателя привода главного движения фасонной фрезы и при не выполнении условия $P_r \leq 0.85 P_d$ происходит уменьшение рабочей подачи v_s на одну ступень. В операторах 9 и 10 выполняется расчет главной P_z , радиальной P_y составляющих силы резания, а также неуравновешенной центробежной силы Q , обусловленной действием главного вектора дисбалансов фасонной фрезы по формулам:

$$P_z = \frac{1020 \cdot 60 P_r}{v} \quad (5)$$

$$P_y = m P_z, \quad (6)$$

$$Q = D_{st} \omega^2 = m_1 \omega^2 \rho, \quad (7)$$

где m – коэффициент, который является функцией исходных условий резания: остроты лезвия фасонной фрезы, средней толщины срезаемого слоя и угла резания, значения m приведены в справочниках по деревообработке [3]; D_{st} – главный вектор дисбалансов шпиндельного узла с установленной фасонной фрезой, вызванный неточной установкой и закреплением режущих пластин в корпусе фрезы, а также погрешностью установки самой фрезы на шпинделе; ω – угловая скорость фрезы; n – частота вращения фрезы, m_1 – неуравновешенная масса; ρ – радиус центра неуравновешенной массы.

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В операторе 11 выполняется расчет максимальных упругих перемещений заготовки под действием рабочей нагрузки по формуле:

$$y_{\max} = \frac{l_B^3 [(P_y + \Delta P_y) \cos(0,5(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)) - (P_z + \Delta P_z) \sin(0,5(\varepsilon_1 + \varepsilon_2))]}{48 E_x I}, \quad (8)$$

где l_B – расстояние между соседними вальцами, сообщаемыми заготовке движение со скоростью рабочей подачи; ΔP_y , ΔP_z – соответственно переменная составляющая силы P_y и P_z , обусловленная сбегом заготовки; $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ – угол выхода; E_x – модуль упругости древесины; I – момент инерции поперечного сечения заготовки.

Погрешность обработанной поверхности, вызванная кинематикой профильного фрезерования и параметрами фасонной фрезы, определяется по формуле:

$$\delta_k = -R_{rk} \cos(\arcsin(\frac{z_i}{R_{rk}})) - \sqrt{[-R_{rk} \cos(\arcsin(\frac{z_i}{R_{rk}})) + R_{\min} + R_{rk}]^2 - (\frac{\pi v_s}{Z \omega})^2 + R_{\min} + R_{rk}} \cdot (9)$$

Максимальная геометрическая погрешность, вызванная действием силы резания, равна:

$$\delta_{d1} = \frac{(J_B + J_Z) P \cos[\frac{\pi}{2} - \arctg(\frac{P_y}{P_z}) - 0,5(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)]}{J_0 J_z}, \quad (10)$$

где J_B , J_Z – соответственно жесткость шпиндельного узла и заготовки.

Максимальная погрешность, обусловленная дисбалансом фрезы, равна:

$$\delta_{d2} = \frac{D_{st} \omega^2}{J_{Bmin}}, \quad (11)$$

J_{Bmin} – минимальная жесткость шпиндельного узла с установленной фрезой.

В операторе 13 вычисляется суммарная геометрическая погрешность обработанной поверхности:

$$\delta_c = \delta_k + \delta_{d1} + \delta_{d2}. \quad (12)$$

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОФИЛЬНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.

В операторе 14 суммарная геометрическая погрешность δ_c обработанной поверхности сравнивается с погрешностью δ_{ch} , допускаемой чертежом изделия. Если $\delta_c \leq \delta_{ch}$, то, в целях более эффективного использования оборудования, оператор 15 проверяет условие $\delta_c \leq 0.7 \delta_{ch}$, при соблюдении которого оператор 16 увеличивает рабочую подачу заготовки на один шаг и запускает повторный цикл расчетов. При несоблюдении условия $\delta_c \leq 0.7 \delta_{ch}$ оператор 15 выдает команду на распечатку оператором 17 наиболее важных выходных параметров процесса профильного фрезерования: мощности фрезерования, главной и радиальной составляющих силы резания, а также геометрических характеристик точности обработанных поверхностей. Процедурой проектирования предусмотрены шаги по обеспечению требуемых значений показателей качества обработанных поверхностей при максимально возможной рабочей подаче и максимально возможной производительности профильного фрезерования. Изложенные результаты использованы при разработке деревообрабатывающего станка с программным управлением модели ПФП-100, для профильного фрезерования периферийных сегментов и стволовой древесины. Реальная модель станка прошла сертификацию, представлена на VI-м Московском международном салоне инноваций и инвестиций, где отмечена дипломом и серебряной медалью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1. На деревообрабатывающих предприятиях в результате раскря бревен образуется большое количество некондиционных заготовок (периферийных сегментов) с постоянно изменяющимся в одном направлении припуском. Из-за отсутствия развитых базовых поверхностей периферийных сегментов, разброса твердости и размеров, а также криволинейных контуров сучковатой поверхности, покрытой корой, механическая обработка сегментов вызывает серьезные затруднения, поэтому для получения качественной продукции необходимо определять оптимальные условия обработки при проектировании технологической операции.

2. Разработаны алгоритм и математические модели срезаемого слоя, силовых характеристик и геометрических показателей точности обработанных поверхностей, на основе которых выполнены итерационные расчеты параметров профильного фрезерования, прогнозирование геометрической точности изделий из некондиционных заготовок и определены условия обработки, обеспечивающие требуемую геометрию профильных поверхностей.

3. Результаты исследований использованы при разработке деревообрабатывающего станка с программным управлением модели ПФП-100 для профильного фрезерования периферийных сегментов и ствольной древесины. Реальная модель станка прошла сертификацию, представлена на VI-м Московском международном салоне инноваций и инвестиций, где отмечена дипломом и серебряной медалью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Safin, R.G. et al. (2016) "A mathematical model of thermal decomposition of wood in conditions of fluidized bed". Acta Facultatis Xylogiae Zvolen res Publica Slovaca, 58(2): 141-148. DOI: 10.17423/afx.2016.58.2.15
2. Safin R.G. et al., (2017) "Technology of Wood Waste Processing to Obtain Construction Material", Solid State Phenomena, 265: 245-249.
3. Tuntsev D.V., et al. (2016) "The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste". Proceedings of 2015, MEACS 2015. art. no. 7414929.
4. Saldaev V.A., et al. 2016 Equipment for the production of wood-polymeric thermal insulation materials IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 142(1): 012097.
5. Sadrtidinov A.R., et al. 2016 The development of equipment for the disposal of solid organic waste and optimization of its operation IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 142(1): 012095. DOI:10.1088/1757-899X/142/1/012095.
6. Sadrtidinov A.R., et al. 2016 The mathematical description of the gasification process of woody biomass in installations with a plasma heat source for producing synthesis gas.

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 124(1): 012092.

7. Ohuchi, T., & Murase, Y. (2005). Milling of wood and wood-based materials with a computerized numerically controlled router IV: development of automatic measurement system for cutting edge profile of throw-away type straight bit. Journal of wood science, 51(3), 278-281.

8. Gusev V.G., Fomin A.A. and Sadrtidinov A.R. (2017) Dynamics of Stock Removal in Profile Milling Process by Shaped Tool. Procedia Engineering 206:- P. 279-285.

9. Fomin, A.A. (2013) Kinematics of surface formation in milling Russian Engineering Research 33(11): - P. 660-662.

10. Fomin A.A. 2017. Microgeometry of surfaces after profile milling with the use of automatic cutting control system. Proceedings of 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017, art. no. 8076117.

11. Gusev, V.G. and Fomin A.A. (2017) "Multidimensional Model of Surface Waviness Treated by Shaping Cutter." Procedia Engineering 206: - P. 286-292.

12. Banerjee, A., Feng, H. Y., & Bordatchev, E. V. (2012). Geometry of chip formation in circular end milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 59(1-4), - P. 21-35.

13. Kolenchenko O. V. (2010). Influence of the milling conditions on the deformation and quality of the machined surface. Russian Engineering Research, 30(8), -P. 839-844.

14. Su, X., et al (2016) "Predictive model of milling force for complex profile milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87(5), - P. 1653-1662.

15. Fomin A.A., Gusev V.G. (2013). Spindle Rigidity in Milling Blanks with Nonuniform Properties, Russian Engineering Research. 33(11):- P. 646-648.

16. Fomin A.A. (2017) Determining undeformed chip thickness models in milling and its verification during wood processing. Solid State Phenomena 265: -P. 598-605.

17. Totis, G. et al (2017) "Upgraded stability analysis of milling operations by means of advanced modeling of tooling system bending". International Journal of Machine Tools and Manufacture, 113, -P. 19-34.

18. Li, C., Chen, X., Tang, Y., & Li, L. (2017). Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost. Journal of Cleaner Production, 140, -P. 1805-1818.

19. The rig for slab preprocessing, RF, Pat. 95589, 2010

20. A way of a roughing-out of a slab, RF, Pat. 2443547, 2012

21. Фомин А.А., Гусев В.Г. Станок для первичной обработки горбыля // Патент России № 95589. 2010. Бюл. № 19.

22. Фомин А. А., Гусев В. Г. Способ первичной обработки горбыля // Патент России №2443547. 2012. Бюл. № 6.

Providing of Surfaces Geometry at the Design Stage of Profile Milling Operation of Off-grade Workpiece

Gusev V.G., Fomin A.A.

Vladimir State University named after A. and N. Stoletovs

Vladimir, Russia

prof_gusev@mail.ru

Abstract. In the article the technological operation of a wood profile milling and a large waste (off-grade workpieces), formed as a result of logs machining, is observed. Forecasting of geometrical characteristics of profile products from the off-grade workpieces on the basis of results of design calculation allows to divide out volume of experimental works on maintenance of demanded geometry to stages of development of products manufacture. The development of an algorithm for calculating these output parameters required the mathematical support of design calculations in the form of analytical adequate models of the cut-off layer; the main, radial components of the cutting force; the profile milling power and the geometric errors of the machined surfaces. Models determine the regularity of the change in the power characteristics of profile milling, the geometry of the milled surface as a function of

the elements of the cutting mode, the characteristics of the shaped cutting tool, the peripheral segment resulting from the cutting of the logs. The developed algorithm allows calculating the parameters of profile milling of stem wood and peripheral segments (off-grade workpieces) with curved surfaces and knots. Iterative calculations of profile milling parameters, performed using the developed algorithm, allow determining the processing conditions, under which the required accuracy of the treated surfaces is provided at the maximum possible productivity of the profile milling.

Keywords: profile milling, off-grade workpiece, technological operation, geometrical accuracy, milling cutter; cutting force.

Способ совмещенного плоского периферийного шлифования

Морозов А.В., Гусев В.Г.

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых
Владимир, Россия

ntk_2005@rambler.ru, prof_gusev@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается способ совмещенного шлифования материалов, обеспечивающий одновременно предварительную и окончательную обработку поверхностей на одном шлифовальном станке. Анализ существующих способов шлифования показал, что в зависимости от объема выпуска деталей предварительное и окончательное шлифование может быть выполнено при одной или двух технологических операциях. В первом случае предварительное и окончательное шлифование проводится на одном рабочем месте с заменой крупнозернистого на мелкозернистый шлифовальный круг. Во втором случае после предварительной операции заготовка транспортируется на другое рабочее место для окончательной обработки. При первом варианте обработки требуется большое количество вспомогательного времени на замену крупнозернистого на мелкозернистый круг, корректировку его массы и настройку станка на требуемый размер. При втором варианте требуется раскрепление предварительно обработанной заготовки, транспортировка к станку для окончательной обработки, установка и закрепление в рабочей позиции, что приводит к снижению производительности технологической операции. Отмеченные недостатки можно устранить путем использования способа совмещенного шлифования. Разработаны и проанализированы возможные схемы совмещенного периферийного шлифования, определены упругие перемещения шпиндельного узла с инструментом под действием силы резания, на основании чего выбрана схема, обеспечивающая рациональное расположение крупнозернистого и мелкозернистого шлифовальных кругов на шпинделе станка. Определены технологические возможности процесса совмещенного шлифования, приведены сравнительные данные экспериментальных исследований микрогеометрии поверхностей, обработанных по предложенному и традиционному способам. Совмещенное шлифование позволяет уменьшить машинное и вспомогательное время на выполнение технологической операции и повысить производительность обработки при обеспечении микрогеометрии поверхностей, характерной для традиционного шлифования.

Ключевые слова: комбинированное шлифование, заготовка, упругие перемещения, шпиндельный узел, мелкозернистый круг, крупнозернистый круг с припуском.

ВВЕДЕНИЕ

Шлифованию среди других процессов механической обработки отводится важнейшая роль в формировании геометрической точности и качества обработанных поверхностей [1]. Известны научные работы, направленные на повышение эффективности процессов шлифования путем дискретизации режущей поверхности [2-7]. Приведены исследования динамики процессов [8, 9]; самоорганизация режущей поверхности [10]; моделирование обработанных поверхностей [11, 12] и траектории абразивного зерна [13]; применение кругов с различными характеристиками [14,

15]; импульсное прессование и высоко температурное спекание кругов [16]; применение охлаждающих технологических средств [17]; использование высоко пористых кругов [18] и уменьшение нагрузки на инструмент [19].

Существующие процессы шлифования характеризуются дифференциацией предварительного и окончательного шлифования заготовок путем обособленного проведения предварительной механической обработки крупнозернистыми кругами, а окончательного шлифования – мелкозернистыми, т. е. обработка осуществляется на двух шлифовальных станках или на одном станке с обязательной заменой крупнозернистого на мелкозернистый инструмент. Это приводит к существенному увеличению основного и вспомогательного времени на выполнение технологической операции, следовательно, к уменьшению производительности и увеличению технологической стоимости изделия. Устранение указанных недостатков существующих процессов шлифования возможно путем разработки и использования так называемого совмещенного шлифования. В этом направлении выполнены исследования, в частности, сегментных инструментов для предварительного и окончательного шлифования [4].

Абразивные сегменты для предварительного и окончательного шлифования наклонены под углом к оси вращения инструмента. Сегменты для предварительного шлифования имеют большую зернистость, но меньшую концентрацию абразивных зерен, чем сегменты для окончательного шлифования. Используется также инструмент, состоящий из двух соосно установленных абразивных кругов для предварительного и окончательного шлифования. Указанные инструменты решают задачу уменьшения тепла в зоне обработки и не рассматривают вопросы обеспечения малой шероховатости, волнистости поверхности и повышения производительности обработки.

ПЕРВАЯ СХЕМА СОВМЕЩЕННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Предлагаемый инструмент для совмещенного шлифования состоит из круга 1 (рис. 1), для предварительного шлифования, у которого абразивные зерна 2 имеют размеры F30 – F36 и более, и шлифовального круга 3 для окончательного шлифования с абразивными зёрнами F90–F120. Крупнозернистый шлифовальный круг 1 снимает припуск z_{pr} на предварительную обработку, а мелкозернистый круг 3 – припуск z_o на окончательную и служит для обеспечения требуемого качества обработанного поверхностного слоя. Круг для предварительного шлифования имеет наружный диаметр d_{pr} , который меньше диаметра d_o круга для окончательного шлифования. Между шлифовальными кругами 1 и 3 расположена прокладка 4, которая устраняет контакт

кругов и образует зазор δ , который обеспечивает возможность расположения алмазного карандаша при правке кругов с различными диаметрами.

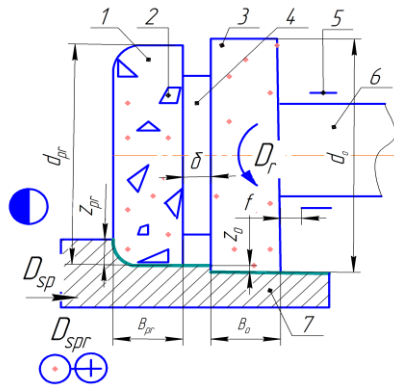


Рис. 1. Первая схема совмещенного шлифования

Крупнозернистый шлифовальный круг 1 выполняет основную работу по снятию припуска, одновременно с этим круг 2 формирует требуемое качество поверхностного слоя. Круги 1 и 3 обрабатывают заготовку при одинаковой частоте вращения, скоростях продольной и поперечной подачи. Отличие процессов шлифования кругами 1 и 3 состоит в том, что каждый из них снимает различный по величине припуск, а также имеет различную характеристику абразивного материала. Круг 1 расположен ближе к оператору, обслуживающему станок (на рис. 1 он изображен в виде залитого круга), а круг 3 – между кругом 1 и передней опорой 5 шпинделя 6.

Диаметры обоих шлифовальных кругов связывают уравнением:

$$d_o = d_{pr} + 2(R_{max} + T), \quad (1)$$

где d_o , d_{pr} – соответственно диаметр шлифовального круга для окончательного и предварительного шлифования; R_{max} – максимальная высота шероховатости поверхности после предварительного шлифования; T – дефектный слой, образованный в детали в результате силового и теплового действия предварительного шлифования.

РАСЧЕТ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОСИ ШПИНДЕЛЯ ПРИ ПЕРВОЙ СХЕМЕ СОВМЕЩЕННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Процесс шлифования выполняется при вращении кругов 1 и 3 (в направлении стрелки D_r), продольной D_{spr} , поперечной D_{sp} подаче заготовки в направлении к оператору, обслуживающему станок. Процесс заканчивается мелкозернистым кругом при поперечной подаче в направлении от оператора, со снятием припуска, определяемого по формуле:

$$z_u = \frac{P_\Sigma}{j} = \frac{P_o + P_{np}}{j}, \quad (2)$$

где P_Σ – суммарная сила резания; P_o , P_{np} – соответственно сила резания, вызванная работой кругов для окончательного и предварительного шлифования; j – жесткость шпиндельного узла в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности.

Припуск z_{pr} в разы превышает припуск z_o , поэтому сила P_{pr} значительно больше силы P_o (рис. 2). Сила резания P_o , создаваемая кругом 3 для окончательного шлифования, расположена от передней опоры 5 на расстоянии:

$$l_o = 0,5 B_o + f, \quad (3)$$

где B_o – высота круга 3; f – расстояние от круга 3 до передней опоры 5 шпинделя 6.

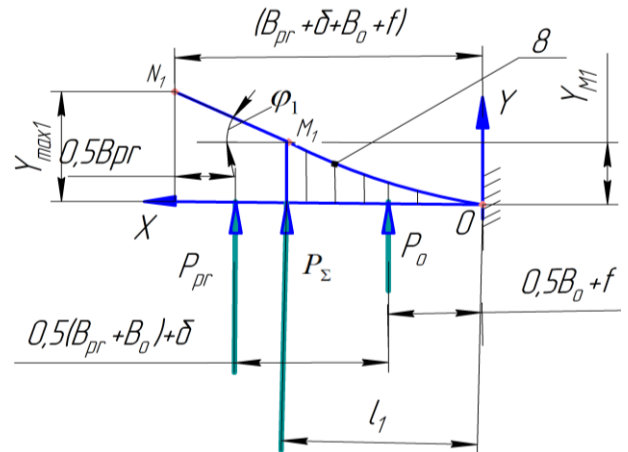


Рис. 2. Упругие перемещения оси шпинделя при первой схеме шлифования

Сила резания P_{pr} , создаваемая кругом 1 для предварительного шлифования, расположена от передней опоры шпинделя на расстоянии:

$$l_{pr} = f + B_o + \delta + 0,5 B_{pr}, \quad (4)$$

где B_{pr} – высота круга 1 для предварительного шлифования, δ – толщина прокладки 4 (рис. 1).

Суммарная сила резания P_Σ совпадает по направлению с силами P_o и P_{pr} , а её значение определяется по формуле:

$$P_\Sigma = P_o + P_{pr}. \quad (5)$$

Систему сосредоточенных сил P_o и P_{pr} с известными координатами точек приложения можно заменить эквивалентной системой, в которой действует суммарная сила резания P_Σ . Точка приложения силы P_Σ имеет координату $x = l_1$. Условием эквивалентности двух рассмотренных систем является равенство изгибающих моментов, создаваемых сосредоточенными силами относительно начала прямоугольной системы координат xOy . Из условия эквивалентности двух систем координата точки приложения силы P_Σ (рис. 2) определится по формуле:

$$l_1 = \frac{(0,5 B_o + f) P_o + (B_o + f + 0,5 B_{pr} + \delta) P_{pr}}{P_o + P_{pr}}. \quad (6)$$

Максимальные упругие перемещения оси шпинделя 5 под действием суммарной силы резания P_Σ в точке её приложения $x = l_1$ равны (рис. 2):

$$Y_{M1} = \frac{P_\Sigma l_1^3}{3EI}, \quad (7)$$

где $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости стали, из которой выполнен шпindelь 6; $I = \frac{\pi d_{pr}^4}{64}$, d_{pr} – момент инерции по-

перечного сечения и приведенный диаметр консоли шпинделя 6 на которой установлены шлифовальные круги 1 и 3.

Угол поворота поперечного сечения шпинделя от точки с координатой $x = l_1$ равен:

$$\varphi_1 = \frac{P_{\Sigma} l_1^2}{2EI}. \quad (8)$$

Упругие перемещения оси шпинделя под действием силы P_{Σ} на длине $0 \leq x \leq l_1$ описываются кривой OM_1 третьего порядка, далее от точки M_1 – отрезком прямой линии M_1N_1 , касательной в точке M_1 к кривой OM_1 (рис. 2). Максимальные упругие перемещения левого торца круга 1 (рис. 1) под действием силы P_{Σ} в точке с координатой $x = (f + B_o + \delta + B_{np})$ равны:

$$Y_{max1} = \frac{P_{\Sigma} l_1^3}{3EI} + (f + B_o + \delta + B_{pr} - l_1) \arctg(\varphi_2). \quad (9)$$

ВТОРАЯ СХЕМА СОВМЕЩЕННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Комбинированное шлифование можно реализовать и по второй схеме, когда мелкозернистый круг 1 располагается на максимальном расстоянии от передней опоры 5 шпинделя 6, а крупнозернистый 3 – на минимальном. В этом случае силы резания P_o и P_{pr} меняются местами, но их значения не изменяются. С учетом этого вторая схема совмещенного шлифования имеет вид, представленный на рис. 3. Круг 1 расположен от передней опоры 5 шпинделя 6 на расстоянии f , а круг 3 – на расстоянии $(f + B_{np} + \delta)$.

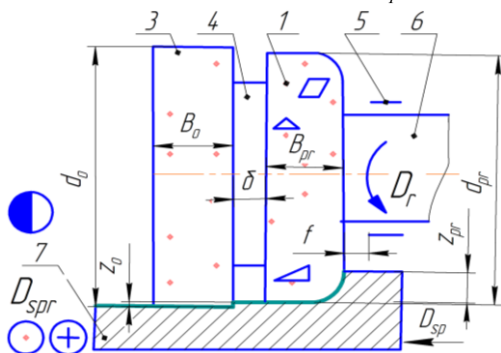


Рис. 3 Вторая схема совмещенного шлифования

Как и при первой схеме совмещенного шлифования, круг 1 снимает основной припуск z_{pr} , а круг 3 – припуск z_o . Частота вращения шпинделя с инструментом, величина продольной и поперечной подачи заготовки при второй схеме обработки (рис. 3) остаются такими же, как и при первой схеме (рис. 1). При второй схеме поперечная подача заготовки направлена к оператору, управляющему станком, в при первой схеме – от оператора. Расстояние точки

приложения равнодействующей силы P_{Σ} от начала координат O (рис. 4) при второй схеме совмещенного шлифования равно:

$$l_2 = \frac{(0,5B_o + f)P_{pr} + (B_o + f + 0,5B_{pr} + \delta)P_o}{P_o + P_{pr}}. \quad (10)$$

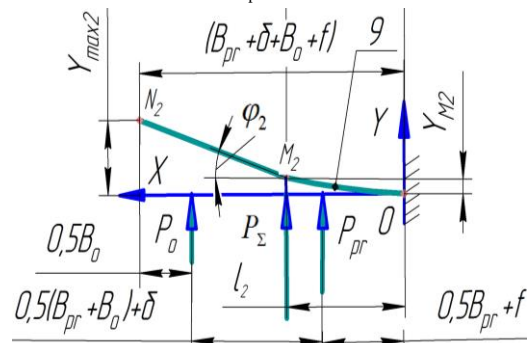


Рис. 4. Упругие перемещения шпинделя при второй схеме

РАСЧЕТ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОСИ ШПИНДЕЛЯ ПРИ ВТОРОЙ СХЕМЕ ШЛИФОВАНИЯ

Упругие перемещения оси шпинделя под действием силы P_{Σ} в точке $x = l_2$ определяются по формуле:

$$Y_{M2} = \frac{P_{\Sigma} l_2^3}{3EI}. \quad (11)$$

Угол поворота поперечного сечения шпинделя, расположенного на расстоянии $x = l_2$ от точки O , под действием суммарной силы резания P_{Σ}

$$\varphi_2 = \frac{P_{\Sigma} l_2^2}{2EI}. \quad (12)$$

Упругие перемещения оси шпинделя под действием силы P_{Σ} на длине $0 \leq x \leq l_2$ описываются кривой OM_2 третьего порядка, далее от точки M_2 – отрезком прямой линии M_2N_2 , касательной в точке M_2 к кривой OM_2 . Максимальные упругие перемещения левого торца круга 3 (рис. 3) под действием силы P_{Σ} при $x = (f + B_o + \delta + B_{np})$ то есть в точке N_2 равны.

$$Y_{max2} = \frac{P_{\Sigma} l_2^3}{3EI} + (f + B_o + \delta + B_{pr} - l_2) \arctg\left(\frac{P_{\Sigma} l_2^2}{2EI}\right). \quad (13)$$

Проанализируем полученные формулы с позиции высокой геометрической точности поверхностей, обработанных по первой и второй схеме. Режим шлифования, характеристика абразивного материала кругов 1 и 3, их размеры, снимаемые припуски, силы резания P_o , P_{pr} и P_{Σ} , а также изгибная жесткость шпинделя равнозначны для сравниваемых схем. При работе круга для предварительного шлифования возникает сила резания, которая значительно больше, чем при работе круга для окончательной обработки. Это объясняется тем, что припуск, снимаемый кругом для предварительного шлифования в разы больше припуска, снимаемого кругом для окончательной обработки.

АНАЛИЗ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОСИ ШПИНДЕЛЯ ПРИ ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ СХЕМЕ СОВМЕЩЕННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Анализ уравнений (6) и (10) показывает, что в (6) перед сравнительно малой силой P_o стоит множитель $(0,5B_o + f)$, который меньше множителя $(B_o + f + 0,5B_{pr} + \delta)$, стоящего перед силой P_{pr} , значительно превышающей силу P_o . Этот факт свидетельствует о том, что член $(B_o + f + 0,5B_{pr} + \delta)P_{pr}$ в уравнении (6) существенно больше, чем $(0,5B_o + f)P_o$. В уравнении (10) силы P_o и P_{pr} поменялись местами, при этом перед большей силой P_{pr} стоит множитель $(0,5B_o + f)$, который меньше множителя $(B_o + f + 0,5B_{pr} + \delta)$, стоящего перед малой силой P_o . В результате этого числитель в уравнении (6) больше, чем числитель в уравнении (10), а, следовательно, координата l_1 точки приложения суммарной силы P_Σ при первой схеме больше координаты l_2 при второй. На основании этого следует вывод о том, что при первой схеме сила P_Σ создает больший изгибающий момент в передней опоре 5 шпинделя 6, чем при второй, а, следовательно, и к большим упругим перемещениям шпинделя с инструментом. Этот вывод подтверждается также неравенствами $Y_{M1} > Y_{M2}$ и $l_1 > l_2$. Разделив (7) на (11), получим значение коэффициента, указывающее во сколько раз упругие перемещения в точке приложения силы P_Σ при первой схеме совмещенного шлифования больше по сравнению со второй схемой:

$$K_y = \frac{Y_{M1}}{Y_{M2}} = \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^3. \quad (14)$$

Для значений $B_o = B_{pr} = 10 \text{ мм}$, $\delta = 5 \text{ мм}$, $f = 5 \text{ мм}$, которые применимы для плоскошлифовального станка 3М71, отношение $l_1 / l_2 \approx 1,5 - 2,0$, а коэффициент $K_y \approx 3,4 - 8,0$.

МЕТОДИКА ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫБРАННОЙ СХЕМЫ СОВМЕЩЕННОГО ШЛИФОВАНИЯ

На основании проведенного выше анализа упругих перемещений шпинделя с кругами 1 и 3 предлагаемый способ шлифования реализуют с использованием второй схемы совмещенного шлифования (рис. 3). Устанавливают и закрепляют шлифовальные круги 1, 3 на шпинделе 6. Заготовку 7 устанавливают на магнитном столе 10 плоскошлифовального станка (рис. 5) так, чтобы она располагалась за крупнозернистым шлифовальным кругом 1 (смотрим из позиции, занимаемой оператором, обслуживающим станок). Включают вращение шпинделя 6 с кругами 1 и 3 (рис. 3) в направлении стрелки D_r и продольную подачу в направлении стрелки D_{spr} . Подводят крупнозернистый шлифовальный круг 1 к заготовке 7 до появления первой искры, затем опускают круг на величину припуска z_{pr} ,

подлежащего снятию крупнозернистым кругом. После настройки крупнозернистого круга на размер включают поперечную подачу в направлении стрелки D_{sp} к оператору и обрабатывают заготовку обоими кругами 1 и 3 (рис. 3). При высоких требованиях к шероховатости поверхности дополнительно выполняют шлифование мелкозернистым кругом при поперечной подаче в направлении от оператора (рис. 5). Крупнозернистый круг 1 для предварительного шлифования не касается обработанной поверхности и не ухудшает малую шероховатость, формируемую мелкозернистым кругом 3. В известных процессах шлифования этого достичь невозможно, так как в них используются крупно- и мелкозернистый круги с равными диаметрами режущей поверхности и шероховатость обработанной поверхности ухудшается крупнозернистым кругом.

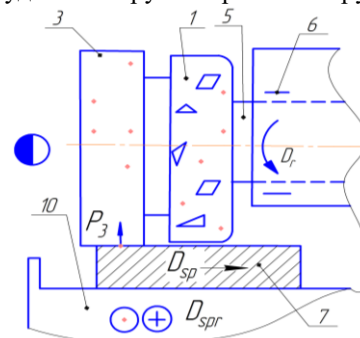


Рис. 5. Заключительные проходы шлифования

Для определения технологических возможностей описанного способа шлифования проведены опыты. На станке 3М71 шлифовали пластины из стали 40Х совмещенным инструментом, а также отдельно крупнозернистым и мелкозернистым кругом вышеуказанной характеристики абразивного материала. Скорость резания составляла 35 м/с, продольная подача заготовки 15 м/мин, поперечная подача 4 мм/двойной.ход стола. Установлено, что шероховатость обработанной поверхности после совмещенного шлифования меньше в 2,5 раза по сравнению с обработкой крупнозернистым кругом, и больше на (5–7) % по сравнению с обработкой мелкозернистым кругом, установленным на шпинделе станка. Уменьшение шероховатости в 2,5 раза объясняется тем, что процесс традиционного шлифования выполняется кругом с крупным абразивным зерном. Увеличение шероховатости на (5–7) % объясняется большей динамической активностью совмещенного шлифования в условиях одновременной предварительной и окончательной механической обработки. При обработке новым инструментом с использованием лишь мелкозернистого круга шероховатость поверхностей для сравниваемых вариантов одинакова.

Таким образом, с позиции обеспечения высокой геометрической точности шлифованных поверхностей необходимо использовать вторую схему совмещенного шлифования, обеспечивающую меньшую изгибающую нагрузку на шпиндель, а, следовательно, и меньшие упругие перемещения шлифовального инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1. Разработан способ совмещенного шлифования инструментом, содержащим крупно- и мелкозернистый абразивные круги, установленные на шпинделе. Способ позволяет выполнять одновременно предварительную и окончательную обработку заготовок на одном станке.

2. Разработаны возможные схемы совмещенного шлифования и проанализированы упругие перемещения шпинделя под действием силы резания, на основе чего выбрана схема для практической реализации. Совмещенный режущий инструмент испытан в процессе плоского шлифования заготовок.

3. Совмещенное шлифование позволяет уменьшить основное и вспомогательное время на выполнение технологической операции или число технологических операций или исключить замену крупно- на мелкозернистый круг (когда процесс обработки реализуется на одном станке), что приводит к повышению производительности механической обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Suslov A.G., Quality of a blanket of machine components, Moscow, 2000.
2. Gusev V.G., Morozov V.V. Plane Discrete Grinding Technology, Vladimir, Publishing House, 2007.
3. Gusev V.G., Morozov A.V. Flat Peripheral Grinding with Discrete Wheels, Yoshkar-Ola, 2012.
4. Morozov A.V., Gusev V.G. Discrete Plane Face Grinding, Moscow, "Pen" Publishing House, 2016.
5. Morozov A.V. Deterioration of the diamond tool at editing of discrete grinding wheels, J. Sci. Engineering industry bulletin 3 (2016). – P. 59-64.
6. Gusev V.G., Morozov A.V., Discretization technology of abrasive wheels operating surfaces with laser and hydro-abrasive jet, J. Sci. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 9(73) (2017) – P. 20-27.

7. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S., Discrete structure of the cutting surface of a grinding wheel, J. Sci. Russian Engineering Research. 29(9) (2009) – P. 940-943.

8. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S., Evaluating discrete wheels and their influence on grinding dynamics, J. Sci. Russian Engineering Research. 29(8) (2009) – P. 835-837.

9. Zubarev Iu.M., Priemyshev A.V., Process stability of grinding taking into account its dynamic characteristics, RF, Sankt-Peterburg, 2016.

10. Salov P.M., Kravchenko B.A., Principles of self-organising of grinding wheels discretization, RF, Samara, 2001.

11. Novoselov Yu.K., Kainov D.A., Bratan S.M., The construction of the model of a ground surface on the basis of a stochastic description of the properties of the tool, Nauk. pr. Donec. nac. tehn. un-tu. Ser.: Mashinobladnannja, Issue 7. P.17-31 (2010).

12. Iu.K. Novoselov, Dynamics of surfaces forming at abrasive machining, Sevastopol', 2012.

13. Stepanov Iu.S., Barsukov G.V., Mikheev A.V. Modelling of a mechanical trajectory of abrasive grain at hydroabrasive cutting of structural materials, J. Sci. News of the Oryol state technical university. Engineering industry. Instrument making. 1 (2006) – P. 58-61.

14. Khudobin L.V., Rudetskii A.V., The RF Patent 2,359,809. (2009)

15. Khudobin L.V., Obshivalkin M.Iu., Muslina G.R., The R.F. Patent 2,155,129. (2000)

16. Ju.N. Poljanchikov, Scientific bases of creation and application of the unicomponent abrasive tool formed by pulse pressing and high-temperature sintering, Saratov, 2002.

17. Khudobin L.V., Babichev A.P., Bulyzhev E.M., Lubricant-cooling technological means and their application at machining by cutting, Moscow, 2006.

18. Starkov V.K., Grinding by high-porous wheels, Moscow, 2007.

19. Khudobin L.V., Minimisation of a loading of grinding wheels, Ulyanovsk, 2007

20. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S., The R.F. Patent 2,606,143. (2017)

The Method of the Combined Flat Peripheral Grinding

Morozov A.V., Gusev V.G.

Vladimir State University

Vladimir, Russia

prof_gusev@mail.ru

Abstract. The article deals with the method of combined grinding of materials, providing simultaneously preliminary and final surfaces treatment on one machine tool. The analysis of existing grinding methods showed, that depending on volume of details exhaustion a preliminary and final grinding can be executed at one or two technological operations. In the first case, the preliminary and final grinding is carried out on the same workplace with the replacement of coarse-grained with a fine-grained grinding wheel. In the second case after the preliminary operation the workpiece is transported to another workplace for final processing. In both variants a large amount of auxiliary time is required, which leads to a decrease in the productivity of the technological operation. The noted deficiencies eliminated by using the method of combined grinding. Possible combined peripheral grinding schemes were developed and analyzed, elastic displacements of the spindle

knot with a tool under the action of cutting force were determined, on the basis of which a scheme was chosen, that ensures rational arrangement of coarse-grained and fine-grained wheels on the machine spindle. The technological possibilities of the combined grinding were determined, The comparative experimental data of the microgeometry of surfaces, processed by proposed and traditional methods, are given. Combined grinding allows reducing the machine and auxiliary time for the performing of technological operation and to increase the processing productivity with the same microgeometry of the surface, typical for traditional grinding.

Keywords: combined grinding, workpiece, elastic displacements, spindle knot, fine-grained wheel, coarse-grained wheel.

Повышение эффективности обработки канавок на валах из конструкционной стали повышенной твердости

Грубый С.В.
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
grusv@yandex.ru

Чаевский П.А.
ООО «Компания РИТС»
Москва, Россия
pchaevskiy@mail.ru

Аннотация. Раскрыта методика расчета сил, температуры в зоне резания при точении канавок в заготовках из различных конструкционных материалов канавочными резцами с заданной геометрией. Выполнен проверочный прочностной расчет режущего клина, обоснованы геометрические параметры и прочностных характеристик инструментального материала. Проведен анализ и подбор износостойкого покрытия для снижения температуры и повышения стойкости инструмента. Обоснованы конструктивные особенности и условия применения сборного инструмента, оснащенного сменными многогранными пластинами (СМП) разработанной формы и размеров.

Ключевые слова: канавочный резец, силы резания, износостойкие покрытия, температура резания, сборный резец, сменная многогранная пластина.

ВВЕДЕНИЕ

Современные изделия, выпускаемые машиностроительными предприятиями, содержат большое число деталей с канавками. Эти детали имеют широкий диапазон форм, размеров и изготавливаются из различных материалов.

На большинстве машиностроительных предприятий проводятся технические мероприятия по уменьшению себестоимости и увеличению производительности выпускаемой продукции. Одним из путей повышения эффективности производства является использование инструментов прогрессивных конструкций. В частности, на деталях типа валов канавки обрабатывают цельными, составными или сборными твердосплавными резцами.

Инструментальные фирмы предлагают инструменты различных конструкций для обработки канавок. Так, каталоги инструментальных фирм Iscar, SANDVIK Coromant, SimTec, Paul HORN, Carmex, WIDIA, DENITool для точения канавок предлагают различные конструкции резцов со сменными многогранными пластинами (СМП). Инструменты рассматриваемых фирм имеют различные конструктивные особенности и могут использоваться в условиях машиностроительных предприятий. Вместе с тем основным недостатком этих инструментов является относительно высокая стоимость, что при их использовании приводит к увеличению себестоимости обработки соответствующих деталей. Поэтому вопросы разработки, изготовления и применения сборных резцов отечественных конструкций являются актуальными для тех предприятий и фирм, которые ставят и решают задачи по снижению себестоимости продукции и издержек производства.

В качестве базового варианта рассмотрены стандартные канавочные резцы с напайными пластинами, геометрия ко-

торых соответствует ГОСТ 18884-73. Эти резцы используют на некоторых предприятиях для данного типа операций.

Резцы данной конструкции имеют ряд серьезных недостатков: необходимость переточки для восстановления режущих свойств, что влечет за собой потребность в дополнительном квалифицированном персонале и специализированном оборудовании; относительно низкая стойкость инструмента между переточками из-за нецелесообразности использования износостойких покрытий на напайных пластинах; отсутствие специальной геометрии передней поверхности для обеспечения оптимального процесса стружкообразования; увеличенное вспомогательное время на смену инструмента по сравнению с конструкциями с СМП и др.

В частности, следует отметить отсутствие износостойкого покрытия на напайных пластинах. Наносить защитное покрытие на напайной инструмент после каждой переточки нецелесообразно, т.к. кроме восстановления геометрии режущего клина после износа нанесение износостойкого покрытия значительно увеличит себестоимость изготовления инструмента. Также следует учесть, что напайные пластины для обработки канавок не имеют отверстия. На некоторых установках по нанесению износостойких покрытий отсутствие отверстия на пластине усложняет технологический процесс нанесения покрытия из-за необходимости закрепления пластин в специальном приспособлении и снижает общий объем загружаемых пластин в камеру установки.

При обработке канавок на деталях из труднообрабатываемых материалов, в частности из конструкционных сталей повышенной твердости, возникают высокие температуры в зоне резания, которые приводят к разупрочнению твердого сплава, в следствие чего возникает интенсивный износ режущих кромок и увеличивается вероятность поломки режущего клина. Для снижения температуры резания и повышения износостойкости инструментального материала рекомендовано использование сборного инструмента, оснащенного СМП с износостойкими покрытиями.

ООО «Компания РИТС» занимается внедрением эффективных конструкций режущих инструментов на современных машиностроительных предприятиях. Совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана проведены исследования для обоснования внедрения токарных резцов прогрессивных конструкций с СМП и замены напайных резцов.

Задачами исследования являлись следующие:

- Разработка методики и расчет сил, температуры в зоне резания при точении канавок в заготовках из различных конструкционных материалов канавочными резцами с заданной геометрией;

- Проверочный прочностной расчет режущего клина, обоснование геометрии и прочностных характеристик инструментального материала;

- Подбор износостойкого покрытия для снижения температуры и повышения стойкости инструмента; обоснование конструкции и условий применения и внедрения сборного инструмента с СМП.

РАСЧЕТ СИЛ РЕЗАНИЯ И ПРОВЕРОЧНЫЙ ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ

При обработке труднообрабатываемых материалов, в том числе конструкционных сталей повышенной твердости, возникают отказы канавочных резцов в виде поломок по причине недостаточной прочности инструмента. По результатам прочностного расчета можно дать рекомендации по геометрическим параметрам инструмента, свойствам инструментального материала и конструктивным особенностям инструмента. Силовое взаимодействие резца и заготовки рассматривалось рядом авторов [1-5]. Обосновано, что для разработки конструкции канавочных резцов с СМП необходимо проанализировать силы резания и напряжения, возникающие в режущем клине инструмента, и рассчитать соответствующие коэффициенты запаса прочности.

Основы современного расчета сил резания и напряжений отражены в ряде учебников, монографий и научных статей. Например, в обобщенном виде со ссылками на литературные источники расчетные методики приведены в отечественном учебнике [6]. Зарубежными авторами, в частности в работах [7-8], также рассчитываются силы резания по схожим алгоритмам.

В проведенных исследованиях для расчета сил резания использована методика, разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана и приведенная в статье [9]. Входными переменными для расчета служат геометрические параметры инструмента, скорость резания, толщина и ширина срезаемого слоя, известные механические характеристики обрабатываемого и инструментального материалов. Выходными параметрами являются: угол сдвига, коэффициент укорочения стружки, относительный сдвиг, коэффициенты трения и составляющие силы на передней и задней поверхностях инструмента, суммарные составляющие силы в станочной системе координат. Разработанная методика позволяет рассчитать силы в широком диапазоне толщин срезаемого слоя. Вместе с тем, применительно к прочностному расчету канавочных резцов представляет интерес толщины срезаемого слоя, превосходящие значение диаметра округления режущей кромки.

В расчетах приняты следующие исходные данные и значения параметров:

- Материал режущей части резца - твердый сплав марки ВК8, задний угол 8о, передний угол 10о;
- Обрабатываемый материал – закаленная сталь марки 40X, твердость HRC 50; канавка шириной 2мм, обрабатывается на наружной цилиндрической поверхности заготовки.

Для сравнения выбраны стандартные представители по группе углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, и коррозионностойких сталей – марки 45 и 12X18H10T, соответственно.

Рассмотрена схема прямоугольного свободного резания, для которой главная составляющая силы резания P_z совпадает по направлению с вектором скорости резания, радиальная составляющая силы P_y совпадает с вектором подачи канавочного резца. Для этой схемы значение подачи равно соответствующему значению толщины срезаемого слоя.

На рисунке рис. 1 приведены графики зависимости главной составляющей силы резания для трех рассмотренных конструкционных сталей от толщины срезаемого слоя.

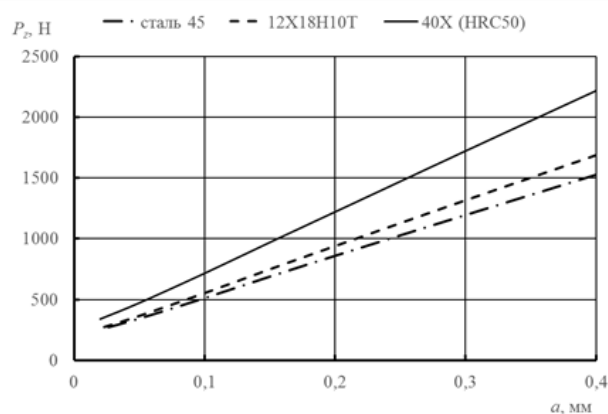


Рис. 1. Графики зависимости главной составляющей силы резания от толщины

На рисунке рис. 2 – аналогичные зависимости радиальной составляющей силы резания.

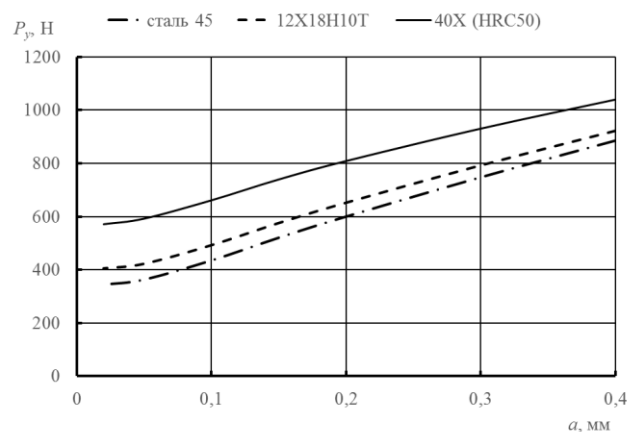


Рис. 2. Графики зависимости радиальной составляющей силы резания

Полученные зависимости составляющих сил резания отражают существенное влияние твердости и прочности обрабатываемого материала, и служат основой прочностного расчета инструмента.

Расчет прочности режущего инструмента выполнен по допустимым напряжениям первого рода. Рассчитаны напряжения на границах режущего клина за пределами контактной зоны по формулам, заимствованным из работ

М.П. Вадачкоря и приведенным в монографии [10]. Проанализированы радиальные напряжения на передней поверхности от суммарного действия сил нормальных и трения, действующих на передней и задней поверхностях инструмента. Графики зависимостей радиальных напряжений от толщины срезаемого слоя приведены на рисунке рис. 3.

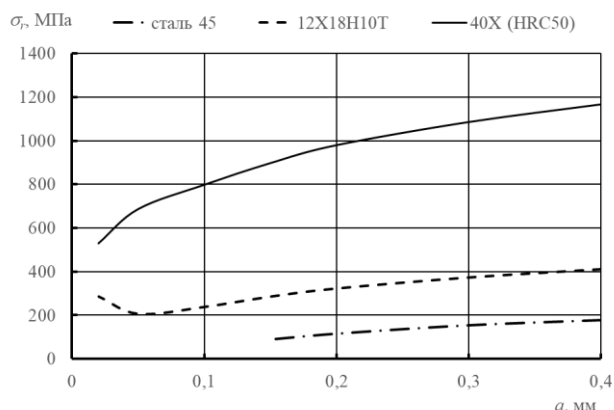


Рис. 3. Графики зависимостей радиальных напряжений на передней поверхности от толщины срезаемого слоя

Условие прочности на передней поверхности за пределами зоны контакта принимает вид:

$$\sigma_r < \sigma_b \quad (1)$$

Т.е. значения радиальных напряжений должны быть меньше предела прочности твердого сплава на растяжение. Соответствующие графики коэффициентов запаса для рассмотренных марок обрабатываемых сталей показаны на рисунке рис. 4.

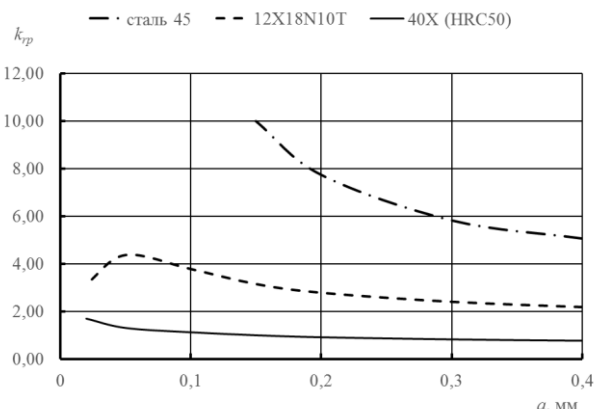


Рис. 4. Графики коэффициентов запаса от толщины для различных марок сталей

Резец из твердого сплава марки ВК8 при обработке закаленной стали марки 40Х имеет коэффициент запаса прочности либо немногим более единицы для малых значений толщин среза, либо меньше единицы. Полученные результаты говорят о том, что использование таких резцов неэффективно для современных машиностроительных предприятий, т.к. при повышении подачи снижается коэффициент запаса, что приводит к увеличению вероятности поломки инструмента.

По результатам проведенных исследований обоснована необходимость замены твердого сплава марки ВК8 на современный твердый сплав с повышенной прочностью. В

частности, предложено использовать для изготовления СМП сборных канавочных резцов твердый сплав марки А10 Кировградского завода твердых сплавов [11]. Указанный твердый сплав имеет прочность в 2-2,3 раза превышающую прочность твердого сплава марки ВК8. Повышение прочности инструментального материала пропорционально повысит коэффициент запаса прочности, что позволит предотвратить поломки канавочных резцов при обработке конструкционной стали повышенной твердости.

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ

Повышенная температура в зоне резания негативно влияет на стойкость инструмента. При сильном температурном воздействии на твердосплавный инструмент происходит его разупрочнение и значительное снижение стойкости, а также увеличивается вероятность поломки.

Повысить температурную стойкость может термостойкое износостойкое покрытие. Критерием выбора покрытия будет служить его термостойкость и универсальность применения. Оценив теоретически максимальную температуру резания, была определена требуемая термостойкость.

Для тех же материалов и условий обработки были рассчитаны температуры, возникающие на передней и задней поверхности твердосплавного резца. Температура на передней поверхности выше, следовательно, будем рассматривать ее как максимально возможную при данных режимах. Результаты расчета в виде графиков показаны на рис. 5.

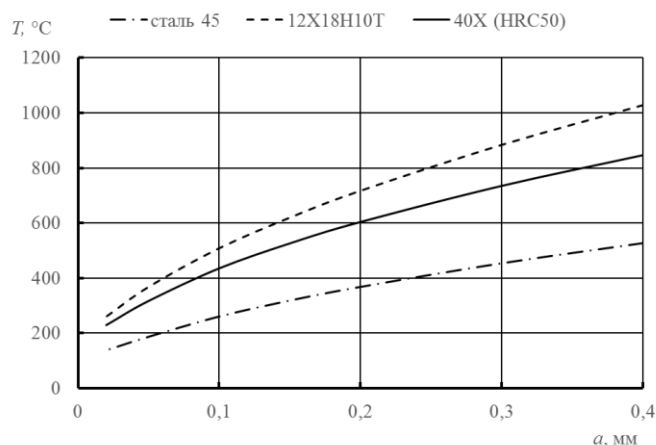


Рис. 5. Графики температуры на передней поверхности твердосплавного канавочного резца

Максимальная расчетная температура составляет 1029 °C. Исходя из проведенных расчетов и учитывая возможности современных нанокompозитных покрытий для значительного увеличения эффективности обработки, предложено использовать покрытие типа nACo фирмы PLATIT [12].

Нанокompозитное покрытие nACo® (на базе Ti, Al) — это высокотехнологичное твердое покрытие, состоящее из наночастиц, пребывающих в связующей аморфной матрице. Наносится nACo® физическим способом при использовании порошковых красок в один или несколько слоёв. Покрытие уникально благодаря сочетанию физически параметров: при увеличении твердости одновременно увели-

чивается его пластичность. Основные физические характеристики покрытия приведены в таблице Таблица 1.

Таблица 1
Физические свойства износостойкого покрытия nASo®.

| Физические свойства nASo® | |
|-----------------------------|-----------|
| Микротвердость, GPa | 35 |
| Толщина, мкм | 1,0...4,0 |
| Коэффициент трения по стали | 0,45 |

Выбранное покрытие имеет термостойкость выше расчетной и универсальную область применения.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТАННОГО СБОРНОГО РЕЗЦА

После проведения анализа и обоснования необходимости использования СМП с износостойким покрытием была спроектирована линейка токарных канавочных резцов для ООО «Компания РИТС». Основываясь на опыте зарубежных фирм по проектированию канавочных резцов, предложена конструкция, исключающая недостатки ранее используемой конструкции. Модель разработанного сборного резца показана на рисунке рис. 6.

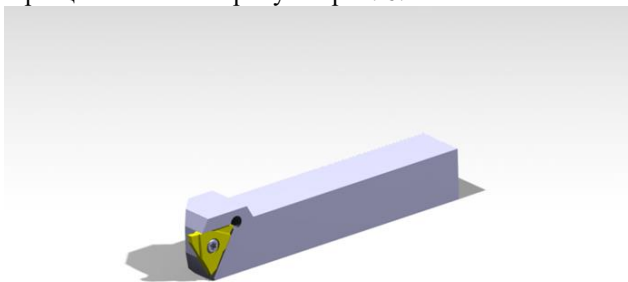


Рис. 6. Модель разработанного сборного резца

Основными особенностями разработанного сборного резца являются следующие:

- Изготовление пластин из заготовки стандартной формы СМП.
- Возможность изготовления пластины с нестандартной шириной режущего клина, а также фасонного профиля.
- На одну державку могут быть установлены пластины для выполнения различных операций.
- В случае повреждения одной режущей кромки, все остальные кромки остаются работоспособными.
- Крепление пластины на державке повышенной жесткости и надежности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали неэффективность применения стандартных напайных токарных канавочных резцов на современных машиностроительных предприятиях при обработке заготовок из конструкционных сталей

повышенной твердости. Были разработаны рекомендации по применению современного твердого сплава и износостойкого покрытия. Также была разработана конструкция токарного канавочного резца с СМП.

Изготовление и последующее внедрение разработанных сборных резцов, оснащенных СМП из твердого сплава высокой прочности, обеспечит повышение надежности инструментальной системы машиностроительного предприятия, исключит поломки режущего инструмента и связанные с ними простои оборудования. Применение высокотемпературного износостойкого покрытия на СМП позволит повысить производительность обработки канавок на заготовках из конструкционных сталей повышенной твердости, увеличит стойкость инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zubkov N.N. Tool-Workpiece Interaction in Deformational Cutting / N.N. Zubkov, A.I. Ovchinnikov, S.G. Vasil'ev // Russian Engineering Research. -2016. - vol. 36, № 3. - pp. 209-212.
2. Petrushin S.I. Theory of constrained cutting: Chip formation with a developed plastic-deformation zone / S.I. Petrushin, A.V. Proskokov // Russian Engineering Research. - 2010. - vol. 30, № 1, pp. 45-50.
3. Кабалдин Ю.Г. Квантово-механическое моделирование деформации и разрушения срезаемого слоя при резании / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Кузьмишина // Вестник машиностроения. – 2016. – № 4. – С. 65-71.
4. Грубый С.В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. -149 с.
5. Грубый С.В. Расчет параметров стружкообразования и сил резания пластичных материалов // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2017. – №1. – С. 25-37.
6. Розенберг Ю.А. Резание материалов. – Курган: Зауралье, 2007. – 294 с.
7. Toenshoff H.K., Basics of Cutting and Abrasive Processes / H.K. Toenshoff, B. Denkena - Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. – p. 399
8. Ravi Shankar M. Severe Plastic Deformation of Difficult-to-Deform Materials at Near-Ambient Temperatures / M. Ravi Shankar, R. Verma, B.C. Rao, S. Chandrasekar, W.D. Compton, A.H. King, K.P. Trumble // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. – 2007. - vol. 38A, is. 9, pp. 1899-1905.
9. Грубый С.В. Расчет сил резания при обработке пластичных материалов в широком диапазоне толщин срезаемого слоя // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – №2. – С. 3-10.
10. Лолодзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение.1982.
11. ТУ 48-4205-81-2017, АО «КЗТС».
12. PLATIT Open Sours 2012.

Improving the Efficiency of Machining of Grooves on the Shafts from Structural Construction Steel of Increased Hardness

Grubiy S.V.
BMSTU
Moscow, Russia
grusv@yandex.ru

Chaevskiy P.A.
LLC "Company RITS"
Moscow, Russia
pchaevskiy@mail.ru

Abstract. The method of calculating forces, temperatures in the cutting zone when turning grooves in workpieces of various structural materials with grooving cutters with a given geometry is disclosed. The verification strength calculation of the cutting wedge is performed. The geometric parameters and strength characteristics of the tool material are justified. The wear resistant coating to reduce temperature and increase tool durability was analyzed and selected. Design features and conditions for the use of built-up

tool, equipped with changeable multifaceted plates (CMP) of developed shape and size are justified.

Keywords: grooving cutter, cutting forces, wear-resistant coatings, cutting temperature, built-up cutter, changeable multifaceted plate.

Общие закономерности формирования поверхностного слоя деталей машин при обработке комбинированными электротехнологическими методами

Усов С.В.

ООО «Технологические системы
защитных покрытий»
Москва, Россия
s.usov@tspc.ru

Давыденко П.А.

ФГАОУ ВО «Российский
университет дружбы народов»
Москва, Россия
p1308@mail.ru

Свириденко Д.С.

ФГУП «Всероссийский научно-
исследовательский институт
авиационных материалов»
Москва, Россия
d_sviridenko@mail.ru

Аннотация. Человеческое общество постоянно испытывает потребности в новых видах продукции, сокращения срока их освоения. Эти потребности могут быть удовлетворены с помощью новых технологических процессов, основанных на немеханическом воздействии инструмента на заготовку, одним из примеров которого являются комбинированные электротехнологические методы. Наибольшее применение комбинированные электротехнологические методы получили в технологиях обработки поверхностей деталей машин, основанных на сложных процессах растворения металла. Стендовые испытания позволили установить определенные физико-механические закономерности в повышении долговечности в условиях применения упрочняюще-формообразующих комбинированных электротехнологических методов. Для выполнения условий испытаний были применены соответствующие оборудование, технологическая оснастка, инструменты, обеспечен класс среды электролитов. По результатам испытаний подтверждена возможность комбинирования способов обработки деталей машин, работающих в условиях высокой трибологической нагрузки. При этом рассмотрены и образованы оптимальные сочетания и режимное обеспечение.

Ключевые слова: детали машин, комбинированная обработка, электрохимическая обработка, трибология, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения наиболее сложных технологических задач создания новой техники стали во все большей степени использовать и развивать новые методы обработки материалов, основанные на немеханическом воздействии инструмента на заготовку. В большинстве случаев для реализации этих методов используются пространственно- локализованные электромагнитные поля с высокой плотностью потока мощности. Все эти методы обработки объединяют под названием электрохимическая обработка (ЭХО).

Наибольшее применение ЭХО получила в технологиях размерной обработки (формообразования) рабочих поверхностей деталей машин, основанных на сложных электрохимических процессах растворения металла, управление которой по сравнению с процессами обработки резанием представляет собой сложную в технологическом отношении задачу. Поэтому применение ЭХО деталей машин позволяет повысить точность обработки деталей машин, а тем самым и повысить надежность изделия в целом [1, 2].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Экспериментальные исследования ставили своей целью раскрыть закономерности формирования параметров качества поверхностного слоя посредством определения благоприятных диапазонов режимов комбинированных электротехнологических методов. В качестве критериальной оценки оптимальных режимов использовались результаты стендовых испытаний (трибологических, термоциклических, знакопеременных циклических, по определению осыпаемости гальванического покрытия), обеспечивающих подобие начальных условий функционирования типовых деталей машин. В этой связи были сформированы следующие взаимосвязи технологических методов и показателей долговечности [3]:

- а) комбинированный последовательный метод электрохимического формообразования (неподвижный катод-инструмент, электрохимическое протягивание) и гальваническое хромирование;
- б) комбинированный параллельно-последовательный метод алмазноэлектрохимического хонингования и гальванического хромирования;
- в) комбинированный последовательный метод дробеструйного упрочнения и электрохимического полирования;
- г) комбинированный последовательный метод импульсно-циклического формообразования и дробеструйного.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим характер взаимосвязи параметров качества с достигаемым эффектом прироста долговечности, реализуемого в условиях стендовых испытаний на выделенном оптимальном диапазоне режимов электротехнологических сочетаний [4]. Обеспечение долговечности в условиях термомеханического изнашивания, циклического знакопеременного нагружения определяются рядом специфических моментов в образовании комплексов параметров качества. Улучшение показателей микро- и макро геометрической точности обеспечивает прирост долговечности до 15%, одновременно достигается снижение осыпаемости гальванического хромированного покрытия на 0,5...7%, что способствует достижению значений прироста долговечности деталей при использовании таких параллельно-последова-

тельных методов, как алмазно-электрохимическое хонингование и гальваническое хромирование; электрохимическое формообразование и гальваническое хромирование. В этих комбинациях реализуется выполнение всех трех выделенных методических принципов комбинирования (совмещение, исключение, совершенствование). Реализация первого принципа (алмазно-электрохимическое хонингование), формируя адгезионно-когезионные механизмы изнашивания, повышает износостойкость деталей на 5...10%, при этом оптимальная зона режимного обеспечения создает менее протяженные участки когезионного изнашивания, что объясняется повышенным эффектом упрочнения за счет выбора оптимального значения продолжительности выглаживания алмазно-электрохимического хонингования. Выполнение принципа совершенствования (алмазно-электрохимическое хонингование и гальваническое хромирование) позволяет существенным образом снизить величину износа на 10...20% полностью, исключая адгезионно-когезионные эффекты [5]. В этом случае преобладающими особенностями фрактограм являются области тепло серого фона, причем увеличение толщины гальванического покрытия (до 70 мкм) способствует формированию трещины на поверхности образца, что укладывается в зону оптимальных режимов, обеспечивающих снижение осыпаемости гальванического покрытия и прирост твердости, образование эпюры сжимающих напряжений (алмазно-электрохимическое хонингование). Реализация принципов исключения и совершенствования в условиях образования последовательного метода электрохимического формообразования (неподвижный катод-инструмент и электрохимическое протягивание, гальваническое хромирование) исключает образование макро- и микро эффектов поверхностного слоя. Это оценивается величинами в 10...15%, что на 0,5... 1% снижает осыпаемость гальванического хромового покрытия, обеспечивая за счет этого 5... 10% прирост долговечности образцов. Необходимо подчеркнуть, что рост величины гальванического покрытия (до 200...220 мкм) вызывает в условиях трибологических испытаний многочисленные трещины и скалывания вследствие реализации эффекта пластического оттеснения в условиях контактного трибологического взаимодействия. Реализация надежного функционирования в условиях циклического знакопеременного нагружения, ударно-усталостного изнашивания выполняется посредством двух комбинированных последовательных сочетаний [6, 7]:

- электрохимического импульсно-циклического формообразования (ЭХО имп.) и дробеструйного упрочнения (ДУ);
- дробеструйного упрочнения (ДУ) и электрохимического полирования (ЭХП).

Формирование первого комбинированного сочетания обеспечивает снижение микро- и макро геометрии на 10...15%, образует прирост твердости на 45...50 %, формирует эпюру сжимающих напряжений, обеспечивая прирост до 40... 50 %. В то же время применение второго сочетания улучшает микрогеометрические показатели на 10...15 %, твердость до 75 %, образует эпюру сжимающих напряжений - увеличивает значения до 60...75%. Такое изменение в рассматриваемом комплексе параметров качества образует

прирост долговечности в условиях циклического знакопеременного нагружения до 10...30%. Эффекта прироста термоциклической долговечности не наблюдается. Реализуемые принципы (исключения и совмещения) так же весьма специфичны для вышеназванных сочетаний технологических методов в условиях триботехнических стендовых испытаний. Эффект сочетания ЭХО имп. и ДУ как упрочняющего сочетания ДУ и ЭХП в условиях трибологических испытаний характерны наличием механизма когезионно-адгезионного изнашивания. При этом сдвиг механизма изнашивания в сторону адгезионного характера для упрочняющего сочетания и наоборот, эффект когезии относится к формообразующему комбинированному методу.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ (ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, ИНСТРУМЕНТЫ)

Для выполнения разработанных комбинаций электро-технологических методов необходимо создать соответствующее оборудование, технологическую оснастку (приспособления) инструменты, соответствующий класс среды - электролитов, оптимизировать режимы. При этом перечень выполняемых технических сочетаний обеспечивает достижения установленного выше состава параметров качества поверхностного слоя.

Технологическая проработка обеспечения долговечности деталей машин включает следующие разделы [8]:

- создание специализированного, высокопроизводительного, быстропереналаживаемого оборудования;
- создание многоцелевой, надежной инструментальной оснастки (приспособлений), обеспечивающих достижение требуемого набора параметров качества;
- создание специальных, долговечных инструментов для реализации комбинированных электротехнологических методов;
- создание соответствующих электролитных сред, обладающих специальными свойствами, обеспечивающих требуемую макро- и микрогеометрическую точность;
- создание и разработка вспомогательного оборудования, соответствующей документации для внедрения участков электротехнологического оборудования;
- проведение оптимизации режимов комбинированных электротехнологических методов, способствующих выполнению требуемого набора параметров качества, создающих условия обеспечения необходимого уровня долговечности деталей машин.

• Оборудование для электрохимических методов протягивания и обработки с неподвижным катодом-инструментом [9, 10]: данный метод выполняется на серийной установке ЭХС-1У, а реализация метода с использованием неподвижного катода - на специальной установке.

• Оборудование для комбинированного метода алмазно-электрохимического хонингования [11, 12]: в состав созданного оборудования для реализации комбинированного метода алмазноэлектрохимического хонингования входят модернизированные вертикально-хонинговальные полуавтоматы моделей 3М83, 3К82У, 3821. Оборудование используется по принципу встраивания в действующий технологический маршрут и создания специального

участка. В обоих случаях оборудование обеспечивается необходимой вентиляционной системой, системой снабжения электролитом, установками для промывки и пассивации деталей. Станки оснащены рабочими камерами из органического стекла, что позволяет вести наблюдение за процессом и сводит к минимуму утечки тока. Дверь камеры выполнена вращающейся на вертикальных петлях с резиновым уплотнением по периметру. Электролит, стекающий с дверцы при ее открывании, собирается в желобок и отводится на слив. Для простоты смены оснастки в стенках используется подача электролита снизу обрабатываемой детали.

При такой схеме необходимо устройство, преграждающее путь потоку электролита из камеры в место отвода из нее инструмента. Хорошие результаты дало использование для этой цели гидродинамического уплотнения, основанного на принципе отсечки электролита, движущегося из рабочей зоны вверх, вспомогательным потоком, направленным под углом 110...130° к первому. Для предохранения оборудования от случайных капель электролита, не задержанного гидродинамическим уплотнением, предназначен быстрого съемный резиновый рукав, ограничивающий пространство между гидрозатвором и шпиндельной бабкой. Чтобы гофрированный рукав при необходимости не закрыл доступ к узлу крепления инструмента в патроне, он выполнен быстрого съемным, с использованием байонетного крепления кожуха к корпусу щеткодержателя.

Предложенная конструкция уплотнения надежно защищает оборудование от попадания на него электролита и позволяет использовать инструмент разного диаметра. Для закрепления инструмента в шпинделе и подвода к нему тока использован шарнирный патрон, соединенный гибкими проводниками с коллектором, работающим в контакте с шестью медно-графитовыми щетками. Для снижения теплового режима работы токоподвода в корпусе щеткодержателя выполнена кольцевая полость, по которой протекает вода. "Плавание" полумуфты, в которой крепится инструмент, обеспечивается ее шарнирным соединением с полумуфтой.

На переоборудованном станке ЗК82У применено иное конструктивное решение токоподвода к инструменту. Этот станок вместо подвижной шпиндельной бабки имеет вращающуюся гильзу, внутри которой движется шпиндель. Поэтому щеточное устройство работает в паре трения с совершающим возвратно-поступательное и вращательное движение шпинделем. Для подвода тока к шпинделю использованы две нестандартные щетки из графита. Они охлаждаются водой, которая протекает по каналам в теле щеток, и подводится с помощью штуцеров. Щетки установлены в щеткодержателе и прижаты к шпинделю пружинами. Медные пластины, служащие для подвода тока от источника питания, прикреплены к щеткам винтами.

Для установки, базирования и закрепления приспособления служит плита 1, электрически изолированная от массы станка и выполненная из стали 30Х13. Плита закреплена на столе станка через промежуточные стальные опоры и изоляционные прокладки, проходящие сквозь отверстия в дне камеры. Зазор между плитой и дном камеры заполнен гидропластом. Не рекомендуется непосредственно устанавливать плиту на дно камеры из-за трудности ее выдержки и снижения жесткости конструкции. На

закрепленной плите расточки под винты залиты эпоксидным клеем. Снизу к плите прикреплен патрубок подвода электролита, проходящий сквозь отверстие, вырезанное в столе.

Подвод тока к заготовке осуществляется через отдельный контактный элемент приспособления, соединенный через гибкий проводник сквозь стенку камеры с кабелем источника питания.

Для алмазноэлектрохимического хонингования со значительными погрешностями формы возникла необходимость в усовершенствовании системы радиальной подачи хонинговальных брусков, имеющейся на станке 3821. Управление подачей брусков на этом станке основано на принципе слежения за током, потребляемым электроприводом вращения шпинделя.

При включении станка начинается ускоренное раздвижение брусков. При этом потребляемый ток минимален. В момент касания брусков с заготовкой ток увеличивается и сигнал с шунта на фазе двигателя становится достаточным для срабатывания поляризованного реле. Реле своими контактами замыкает цепь, которая самоблокируется и дает команду на переход от ускоренной к дозированной ступенчатой радиальной подаче брусков, означающей начало хонингования. В случае возрастания нагрузки в процессе хонингования до показателя "перегрузка" срабатывает реле, которое дает команду на прекращение подачи брусков. Замкнувшиеся контакты подключают одну из задающих обмоток своего реле, согласованного с измерительной обмоткой для увеличения коэффициента возврата. Это позволяет отключиться реле при сигнале, отличающемся от сигнала включения и обеспечить продолжение хонингования с дозированной подачей после снятия перегрузки при нагрузке, близкой к нормальной.

Однако при обработке заготовок, имеющих значительные погрешности формы хонингуемого отверстия, указанная система радиальной подачи брусков оказывается неработоспособной. Если переход от ускоренной подачи к дозированной случался при прохождении хоним участка с большим диаметром, происходило заклинивание инструмента. Для устранения этого недостатка было предложено и реализовано техническое решение, основанное на изменении циклограмм перехода от ускоренной подачи брусков к дозированной подаче. Сущность решения состояла во введении отрицательной обратной связи положения брусков с перегрузкой. При перегрузке срабатывает и размыкается цепь прекращения дозированной подачи и замыкает добавочную введенную цепь, дающая команду на ускоренный отвод ("отскок") брусков от обрабатываемой поверхности. "Отскок" происходит на величину, достаточную для снятия перегрузки и задается настройкой резистора. При этом станок возвращается в режим нормальной работы, позволяющей осуществлять АЭХХ без заклинивания инструмента. Централизованная система снабжения электролитом включает секционную ванну с успокоителями потока и змеевиком для охлаждения раствора, два бака отстойника, четыре центробежных насоса в нержавеющей стали в исполнении с фильтрами тонкой очистки и систему коммуникаций.

Очистка электролита производится комбинированным способом – фильтрованием, флотированием и отстаива-

нием. Флотореагентом является техническое моющее средство, добавляемое в электролит в количестве 0,02...0,4%, поднявшийся на поверхность шлам удаляется в конце смены.

Каждый из насосов системы снабжает станки электролитом. Давление на выходе насосов регулируется вентилями и контролируется по показаниям манометров. Степень засорения фильтров определяется по разности показаний манометров. Вентили могут перекрывать поступление электролита к станкам и регулировать его подачу. Из рабочих камер станков электролит сливается в ванну через трубопроводы. После накопления в ванне нефлотируемого шлама производится перекачка насосом загрязненного раствора из ванны в незаполненный отстойник. Заполнение ванны очищенным электролитом производится самотеком из отстойника при открытых вентилях.

Основные данные системы снабжения электролитом:

- объем ванны: 2,5м³;
- объем отстойников: 2 шт. × 2,5м³;
- подача одного насоса: 200 л/мин.;
- давление электролита: 6 МПа.

Станки, объединенные с централизованной системой снабжения электролитом и источниками питания, образуют установки, позволяющие работать в наладочном и полуавтоматическом режимах. Наладочный режим предназначен для проведения переналадочных и опытных работ, который позволяет:

1) Включать и отключать:

- возвратно-поступательное движение шпинделя;
- вращение шпинделя;
- подачу электролита;
- подачу напряжения.

2) Настраивать систему активного контроля на заданный размер (только на станке 3821).

• Оборудование для электрохимического метода импульсно-циклического формообразования [13]: установка модели ЭХП-I применяется для метода импульсно-циклического формообразования. Установка включает: собственно станок; насосные станции для подачи электролита; баки для хранения электролита; источник питания серии ВАК 3200 модернизированный под импульсную схему.

Станок конструктивно состоит из камеры; вибратора; устройства подачи (посредством движения каретки стола); станины; системы управления; системы контроля за подачей стола. Функционально он обеспечивает движение катода-инструмента, подъем и опускание рабочей камеры, движения электролита в зону обработки, слив электролита из рабочей камеры в промежуточную емкость. Рабочая вибрация сообщается инструменту от электродвигателя, мощностью 4,5 кВт. Ускоренные и рабочие перемещения производятся от электродвигателя, мощностью 1,6 кВт. Система подачи электролита состоит из основного бака. Для предохранения патрона от попадания в него сквозь штангу электролита, находящегося под избыточным давлением в зоне обработки, сопряжение корпус хона - разжимной конус уплотнено резиновым кольцом.

Основной расчетной величиной при проектировании хона является длина его катодного участка. Наибольшей

долговечностью обладают механически закрепляемые изоляторы, изготовленные из пластмасс, не изменяющих свои свойства в электролите: капролона, фторопласта.

• Оборудование для комбинированного метода дробеструйного упрочнения и электрохимического полирования: оборудование для электрохимического метода импульсно-циклического формообразования, применяется для экспериментального подбора режимов рассматриваемого метода, с использованием специальной дробеструйной установки и традиционной ванны для электрохимического полирования с источником питания.

• Технологическое обеспечение комбинированного последовательного метода электрохимического формообразования (неподвижный катод-инструмент, электрохимическое протягивание) и гальванического хромирования [14, 15]: комбинированный метод электрохимического формообразования с применением подвижного и неподвижного катода-инструмента достигает требуемых параметров качества посредством использования специальных конструкций электродов-инструментов, оптимизации режимов, что в сочетании с последующим технологическим методом гальванического хромирования (9...70мкм) способствует достижению требуемого уровня долговечности. При этом достигнуто повышение долговечности деталей на 20...30% [16]. Рассмотрим конструктивно-технологические отличия разработанных катодов-инструментов и диапазоны оптимизированных режимов комбинированных методов. С целью исключения макро дефектов, предполагается использование электрод-инструмент с внутренним каналом для подвода электролита, на котором расположены направляющие и изолирующие втулки, закрепляемые на стержне. На поверхности стержня выполнены продольные шлицевые пазы, образующие выступы по форме канавок. В зоне радиального канала выхода электролита в зону растворения установлена головка, представляющая собой цилиндр с радиальными отверстиями. Работа инструмента происходит таким образом: инструмент устанавливается посредством катододержателя, при фиксации этого положения катода-инструмента осуществляется включение насосов и подача электролита в зону формообразования и слив посредством ванны. После этого происходит включение источника напряжения. Электролита через канал стержня проходит через головку и затем подается в зону анодного растворения. Как показали результаты натурных испытаний, определенная геометрия нарезов в трубе, обеспечивает необходимую долговечность и способствует приросту последней [17, 18]. С этой целью разработана специальная конструкция катода-инструмента обеспечивающая достижение оптимальной геометрии, при этом катод-инструмент конструктивно состоит из латунного стержня, колпачков, изолирующих пластин, выполненных в условиях литья под давлением из материала типа полиамид. При этом латунный корпус выполнен с ориентированными на нем винтовыми пазами в соответствии с геометрией выполняемых нарезов. Обработка данного геометрического профиля производится на специализированной установке. Катод-инструмент перемещается в обрабатываемой детали посредством специальной штанги, закрепляемой на электроде в районе передней бабки. Соответствующая система снабже-

ния электролитом осуществляет его подачу при одновременном включении источника технологического напряжения. Формирование профиля нареза производится посредством совместного вращения катода и перемещения копирующего пальца по копиру. При этом разработанная конструкция катода обеспечивает необходимую геометрию нареза за счет того, что изолирующие вкладыши выполнены в виде упругой балки, закрепленной с двух концов с прогибом, обеспечивающим стабилизацию распределения электролитного потока по ширине формобразуемого нареза. Применение катода специальной конструкции позволило, видоизменив значения плотности тока, изменить значения внутренних и наружных радиусов нарезав, ширины нареза и обеспечить требуемый уровень долговечности деталей. Оптимизация режимов электрохимического протягивания деталей типа "тела вращения" в совокупности с наложением соответствующей толщины гальванического покрытия способствует стабилизации долговечности.

• Технологическое обеспечение комбинированного параллельно-последовательного метода алмазно-электрохимического хонингования и гальванического хромирования: применение метода алмазно-электрохимического хонингования (в совокупности с технологическим методом гальванического хромирования) применительно к деталям машин, типа тел вращения способствуют повышению долговечности изделия на 10 %. Такое достижение требуемого уровня долговечности способствует получению более высоких показателей качества поверхностного слоя, а также повышению прочности накладываемого впоследствии гальванического хромового покрытия. На вышеописанных станках, применительно к алмазноэлектрохимическому хонингованию, применяются специальные инструменты и приспособления, конструкции которых унифицированы и взаимозаменяемы. Инструментом, является хон с оправкой. Оправка состоит из латунной штанги с эпоксидным изоляционным покрытием, армированным капроновой нитью. Применение нержавеющей стали для изготовления штанги нежелательно из-за низкой электропроводности. Коническим хвостовиком штанга устанавливается в патрон и закрепляется. Толкатель связывает механизм подачи брусков с разжимным конусом хона. Хоны для алмазно-электрохимического хонингования сквозных отверстий имеют два исполнения второе исполнение отличается от первого конструкцией колодок, позволяющей использовать унифицированные держатели брусков. Для предохранения патрона от попадания в него сквозь штангу электролита, находящегося под избыточным давлением в зоне обработка - сопряжение корпус хона - разжимной конус уплотнено резиновым кольцом. Основной расчетной величиной при проектировании хона является длина его катодного участка. Наибольшей долговечностью обладают механически закрепляемые изоляторы, изготовленные из пластмасс, не изменяющих свои свойства в электролите: капролона, фторопласта. Большой прочностью обладает также изоляционное покрытие из терморезистивного материала на основе феиолоформальдегидной смолы и стекловолокна в качестве наполнителя [19]. Покрытие наносится методом литьевого прессования и обладает пределом прочности на изгиб не менее 120 МПа и ударной вязкостью не менее 30 МПа·мм. Для улучшения сцепляемости прессматериала с

деталью на последней рекомендуется выполнять рифления сетчатой накаткой и высверливать отверстия.

Ограничители зазора с позиций теории трения и износа желательны изготавливать из материалов высокой твердости. Однако попытки выполнять ограничители из окисной керамики или поликристаллических сверхтвердых материалов оказались неудачными, так как при контакте ограничителей с обрабатываемой поверхностью на ней образовывались царапины и ухудшалась шероховатость. Поэтому хоны снабжены ограничителями из пластмассы. Работоспособность хона зависит от точности изготовления и применяемых материалов. Силовые элементы хона (корпус, разжимной конус, клиновые колодки) изготовлены из термообработанной (закалка с низким отпускком) стали 30Х13, а посадки подвижных соединений выполнены по 7-8 квалитетам точности [20].

Приспособления для алмазноэлектрохимического хонингования механические и спроектированы с учетом особенностей их эксплуатации. За период простоев в зазорах подвижных соединений происходит отложение солей. Чтобы приспособления сохраняли подвижность, в них не применяют точные ходовые посадки, а площадь поверхности сопряжения принимается минимальной. Как показал опыт, поверхность контакта "токоподвод - заготовка", находящаяся в электролите, подвержена анодному, растворению. Поэтому: подвод тока к заготовке осуществляется при помощи легко заменяемого специального контактного элемента, входящего в состав приспособления; исключено протекание тока в местах сопряжения приспособления с заготовкой, особенно по базирующим поверхностям.

Если заготовка имеет отверстия или щели, пересекающиеся с обрабатываемой поверхностью, то в приспособлениях используются заглушки, устраняющие утечку электролита. Благодаря простоте переналадки оборудования, заключающейся в замене инструмента, приспособления и установке кулачков управления возвратно-поступательным движением хона, несложности изготовления новой оснастки участок станков приспособлен к серийному и мелкосерийному производству, к изменению номенклатуры обрабатываемых деталей.

• Технологическое обеспечение комбинированного метода электрохимического импульсно-циклического формообразования и дробеструйного упрочнения: реализация данного комбинированного метода позволила повысить долговечность деталей на 10... 15%. Оборудование для реализации данного метода рассмотрено выше.

• Технологическое обеспечение комбинированного метода электрохимического полирования и дробеструйного упрочнения: данный метод позволил повысить долговечность деталей на 20...30 %. Метод дробеструйного упрочнения осуществляется дробью, выполненной из проволоки I кл ГОСТ 9389-75. Электрохимическое полирование вышеуказанных деталей производится в ванне с раствором электролита. Как правило, деталь устанавливается в специальное устройство и зажимается, при этом расположение катода ориентируется строго относительно внутренней поверхности пружины. В то же время поверхность зуба досылателя располагается таким образом, чтобы обеспечить протекание метода электрохимического полирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования позволили установить определенные физико-механические закономерности в повышении стеновой долговечности в условиях применения упрочняюще-формообразующих комбинированных электротехнологических методов. При этом рассмотрены и образованы оптимальные сочетания режимов выделенных комбинаций "табл. 1" [21].

Таблица 1

Режимное обеспечение комбинированных методов

| № | Наименование метода | Оптимальное режимное обеспечение |
|---|---|---|
| 1 | Комбинированный последовательный метод электрохимического формообразования (неподвижный катод-инструмент, электрохимическое протягивание) и гальваническое хромирование | Плотность тока - 30...40 А/см ² |
| | | Напряжение - 14...20 В |
| | | Продолжительность - 900...1200 с |
| | | Электролит - 10...15% раствор |
| | | Скорость перемещения катода-инструмента - 186...225 мм/мин |
| 2 | Комбинированный параллельно-последовательный метод алмазлектрохимического хонингования и гальванического хромирования | Плотность тока - 20...30 А/см ² |
| | | Удельное давление хона-инструмента - 0,4...0,5 МПа |
| | | Давление электролита - 0,6...0,8 МПа |
| | | Напряжение - 14...20 В |
| | | Продолжительность - 90...200 с |
| 3 | Комбинированный последовательный метод дробеструйного упрочнения и электрохимического полирования | Продолжительность дробеструйного упрочнения - 400...800 с |
| | | Продолжительность электрохимического полирования - до 480 с |
| | | Плотность тока электрохимического полирования - 0,6...0,7 А/см ² |
| | | Напряжение - 14...20 В |
| | | Продолжительность - 600...900 с |
| 4 | Комбинированный последовательный метод электрохимического импульсно-циклического формообразования и дробеструйного | Плотность тока ЭХО - 35...40 А/см ² |
| | | Напряжение ЭХО - 8...12 В |
| | | Электролит ЭХО - 10...15% раствор |
| | | Продолжительность дробеструйного упрочнения - 1080...1200 с |
| | | Продолжительность - 600...900 с |

ЛИТЕРАТУРА

1. Усов С.В. Нетрадиционные методы обработки деталей машин, созданные на основе информационных технологий. / С.В. Усов, О.Ф. Вячеславова и др. – Подольск: Славянская школа, 2010. – 150 с.
2. Попов А.П. Методы повышения надежности. / А.П. Попов, Т.А. Попова и др. // Вестник Московского государственного открытого университета. Серия «Техника и технология». – 2013. – № 4. – С.32.
3. Попов А.П. Оптимизация технологических процессов / А.П. Попов, Т.А. Попова // Мир транспорта. – 2015. – № 5. – С.16–25.
4. Усов С.В. Научные основы создания прогрессивных методов обработки деталей машин. / С.В. Усов, С.В. Поляков и др. – Подольск: Славянская школа, 2011. – 209 с.
5. Усов С.В. Исследование влияния комбинированных методов обработки на трибологические характеристики поверхностного слоя деталей машин. / С.В. Усов, Д.С. Свириденко и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – № 5. – С.138–141.
6. Болдырев А.И. Экспериментальные исследования технологических возможностей электрохимического формообразования. / А.И. Болдырев, С.В. Усов и др. // Вестник

воронежского государственного технического университета. – 2014 – Т.10, № 3-1, с. 120-122.

7. Усов С.В. Теоретические основы построения комбинированных электротехнологических методов обработки деталей машин. / С.В. Усов, О.Ф. Вячеславова // Журнал технических исследований - Т. 2, № 6. – С. 3.

8. Албагачиев А.Ю. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. Том. VI / А.Ю. Албагачиев, С.К. Амбросимов и др. - М.: Издательский дом "Спектр", 2015. – 464 с.

9. Бахвалов В.А. Способ хонингования глубоких отверстий и инструмент для его реализации // СТИН. – 2006. – № 4. – С.39-40.

10. Звонцов И.Ф. Технологические методы управления качеством в производстве деталей с глубокими отверстиями / И.Ф. Звонцов, П.П. Серебrenицкий и др. // Металлообработка. – 2016. – № 4. – С.11–25.

11. Батышев К.А. Проектирование технологии изготовления деталей машин с применением комбинированного метода алмазно-электрохимического хонингования и гальванического хромирования. / К.А. Батышев, Д.С. Свириденко и др. // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: тезисы докл. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. (Курск, 15-16 февраля 2018 г.). – Курск, 2018. – С. 30-33.

12. Гавриш А.П. Новые схемы алмазного хонингования высоколегированных композитов деталей трения полиграфических машин / А.П. Гавриш, Т.А. Роик и др. // Вісник Хмельницького Національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 6. – С.39–43.

13. Смоленцев В.П. Применение магнитно-реологических жидкостей в металлообработке / В.П. Смоленцев, А.А. Болдырев // Нетрадиционные методы обработки: Межвуз. сб. науч. трудов. – Вып. 9. – Ч.3. – М.: Машиностроение, 2010. – С.120–129.

14. Кузовкин А.В. Размерное формообразование сложнопровильных деталей с применением твердого токопроводящего наполнителя / А.В. Кузовкин, В.П. Смоленцев – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2000. – 176 с.

15. Свириденко Д.С. Расчет инструментов для электротехнологических методов обработки деталей машин. / Д.С. Свириденко, К.А. Батышев и др. // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: тезисы докл. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. (Курск, 15-16 февраля 2018 г.). – Курск, 2018. – с. 297-299.

16. Звонцов И.Ф. Электроалмазное хонингование глубоких отверстий / И.Ф. Звонцов, П.П. Серебrenицкий // [Электронный ресурс]: <http://mirprom.ru/public/elektroalmaznoe-honingovanie-glubokih-otverstiy.html>. Доступ 22.11.2017.

17. Рябцева А.В. Основы формирования отверстий малых диаметров применением электротехнологической обработки и их контроль. / А.В. Рябцева, Д.С. Свириденко // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2015. – № 4. – С.55–57.

18. Домнин П.В. Влияние различных способов обработки поверхностей в глубоких отверстиях на показатель шероховатости / П.В. Домнин, А.А. Тимофеева // Современная техника и технологии. – 2016. – № 3. – С.16–20.

19. Bilgi D.S. Electrochemical deep hole drilling in super alloy for turbine application / D.S. Bilgi, V.K. Jain // Journal of materials processing technology, Vol. 149, Iss. 1–3, 2004, pp. 445–452.

20. Pa P.S. Electrode form design of large holes of die material in ultrasonic electrochemical finishing. Journal of materials processing technology. Vol. 192–193, 2007, pp. 470–477.

21. Усов С.В. Электрохимические методы обработки деталей машин. / С.В. Усов, Д.С. Свириденко – Подольск: Сатурн-С, 2007. – 122 с.

General Patterns in the Formation of the Surface Layer of Machine Parts Treated by Combined Electro-technical Methods

Usov S.V.

Technological systems for protective coats LLS
Moscow, Russia
s.usov@tspc.ru

Davydenko P.A.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education RUDN University
Moscow, Russia
p1308@mail.ru

Sviridenko D.S.

Federal State Unitary Enterprise All Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials
Moscow, Russia
d_sviridenko@mail.ru

Abstract. The humanity has always needed new products and shorter time to incorporate them. These needs can be met by new technological processes based on non-mechanical impact of an instrument on a blank, for example on combined electro-technical methods. Combined electro-technological methods are most popular in technologies utilized in machine parts surface treatment based on sophisticated processes of metal dissolution. Rig testing allowed identifying certain physical and mechanical patterns in the increase of durability under the condition that strengthening sizing combined electro-technical methods were used. In order to

meet the requirements of the test, the suitable equipment, technological gear, instruments were used and the electrolyte environment class was ensured. The test confirmed the possibility of combining different methods of machine parts treatment that endure high tribological pressure. Best combinations and regime support were researched and identified.

Keywords: machine parts, combined treatment, electro-chemical treatment, tribology, wear.

Сверхточная обработка поверхностей элементов приборов из оптических материалов

Грубый С.В.
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
grusv@yandex.ru

Шавва М.А., Лапшин В.В.
АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»
Москва, Россия
katapu@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на повышение производительности, точности и качества обработки поверхностей (снижение шероховатости и глубины трещиноватого слоя) элементов приборов из оптических материалов: дигидрофосфат калия (KDP), ситалла, кварцевого стекла, алмазным лезвийным и абразивным алмазным инструментом. Приведены кинематические схемы сверхточной обработки оптических поверхностей и основные теоретические зависимости, задающие режимы и условия резания. Также приведены примеры лезвийной и абразивной обработки на сверхточных экспериментальных стендах и результаты метрологического контроля параметров качества обработанных поверхностей.

Ключевые слова: сверхточная обработка, оптические материалы, алмазное микрофрезерование, алмазное шлифование.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционная технология обработки поверхностей элементов из оптических материалов предусматривает алмазное шлифование с последовательным снижением зернистости и химико-механическое полирование. Основными недостатками традиционной технологии являются - низкая производительность процесса, сложность автоматизации и управления; повреждение поверхностного слоя абразивными частицами. В МГТУ им. Н.Э. Баумана, АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», ООО «Ресурс точности» по кооперации с рядом организаций проведен комплекс технологических исследований и конструкторских разработок, направленных на повышение производительности, точности и качества обработки поверхностей элементов из оптических материалов лезвийным и абразивным алмазным инструментом. Технологические экспериментальные исследования проведены на сверхточных стендах по схеме фрезерования плоской поверхности алмазной однорезцовой фрезерной головкой и плоского алмазного шлифования с наклоном оси шлифовального круга. Образцы для обработки изготовлены из оптических материалов: ситалла, кварцевого стекла и дигидрофосфата калия. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что можно создать условия обработки, обеспечивающие толщину срезаемого слоя в нанометровом диапазоне, при которых механизм хрупкого взаимодействия «инструмент – обрабатываемый материал» заменяется на пластическое деформирование [1-5]. Переход от хрупкого скалывания к пластичному деформированию позволяет получить поверхность с минимальным поврежденным слоем и шероховатостью Ra менее 0,01 мкм. Погрешность формы обрабатываемой поверхности при этом обеспечивается кинематикой сверхточного станка [6].

ЛЕЗВИЙНАЯ АЛМАЗНАЯ ОБРАБОТКА

Для обеспечения условий пластичного деформирования оптического материала в зоне резания, алмазный монокристаллический инструмент должен иметь следующие характеристики: передний угол в диапазоне от 0° до -35° [7]; радиус округления режущей кромки - от 50 до 100 нм; радиус вершины лезвия инструмента от 1 мм до 10 мм; задний угол в диапазоне от 7° до 15° .

Толщина срезаемого слоя при лезвийной обработке зависит от режимов резания и параметров режущего инструмента. На рис.1 приведены зависимости толщины срезаемого слоя a от продольной подачи заготовки на один оборот инструмента S при радиусе вершины 1 мм и глубине резания 2 мкм, а на рис. 2 от глубины резания t при радиусе вершины 1 мм и подаче заготовки 2 мкм/об.

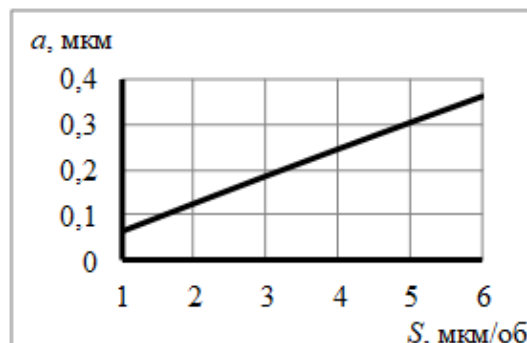


Рис. 1. График зависимости толщины срезаемого слоя от подачи заготовки

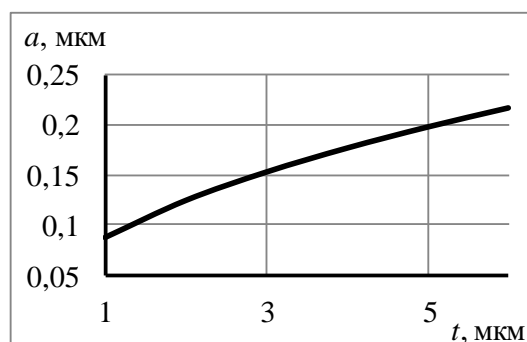


Рис. 2. График зависимости толщины срезаемого слоя от глубины резания

Анализ показывает, что с уменьшением подачи заготовки и глубины резания толщина срезаемого слоя уменьшается. Экспериментально доказано, что для обеспечения условия пластичного деформирования KDP толщина срезаемого слоя должна составлять не более 100...120 нм [8].

Экспериментальные исследования по обработке однорезцовой алмазной фрезерной головкой проведены на сверхточном экспериментальном стенде для алмазного микрофрезерования, который имеет следующие конструктивные особенности: шпиндельный узел и линейный суппорт стенда выполнены на аэростатических опорах; стенд установлен на виброизолирующих опорах; предусмотрена система охлаждения двигателя шпиндельного узла.

Основные параметры сверхточного экспериментального стенда приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры сверхточного экспериментального стенда для алмазного микрофрезерования

| № п/п | Наименование параметра | Величина |
|-------|--|------------|
| 1. | Наибольшие габаритные размеры обрабатываемой детали, мм | 450x450 |
| 2. | Диапазон частот вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 50...600 |
| 3. | Количество осей, шт. ось X - поперечный суппорт; ось C - вращение шпинделя | 2 |
| 5. | Ход поперечного суппорта, ось X, мм | 800 |
| 6. | Разрешающая способность по оси X, нм | 1 |
| 7. | Диапазон подач по оси X, мм/мин | 0,002..150 |

Кинематическая схема обработки алмазным лезвийным инструментом на сверхточном экспериментальном стенде приведена на рис. 3. Объектами исследований являлись заготовки из дигидрофосфата калия (KDP) размерами 180x180x10 мм.

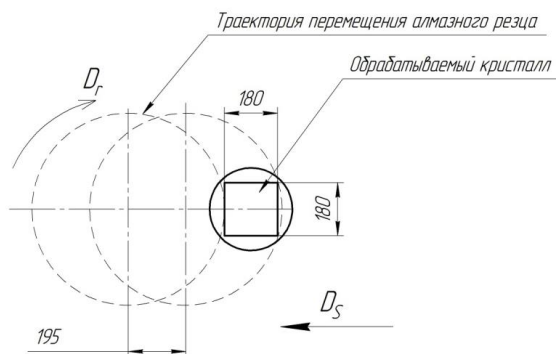


Рис. 3. Кинематическая схема обработки на сверхточном экспериментальном стенде для алмазного микрофрезерования

Параметры алмазного резца, режимы резания и толщина срезаемого слоя приведены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы обработки заготовки из KDP

| Параметр | Величина |
|---|----------|
| Радиус однорезцовой фрезерной головки $R_{фр}$, мм | 325 |
| Радиус алмазного резца r , мм | 1 |
| Глубина резания t , мкм | 2 |
| Подача на оборот S , мкм/об | 2 |
| Частота вращения шпинделя n , об/мин | 340 |
| Толщина срезаемого слоя a , нм | 124 |

Для контроля шероховатости обработанных поверхностей использован 3D профилометр Leica DCM3D. Профилограмма обработанной поверхности приведена на рис. 4. Шероховатость обработанной поверхности составила R_a 3 нм, R_z 12 нм.

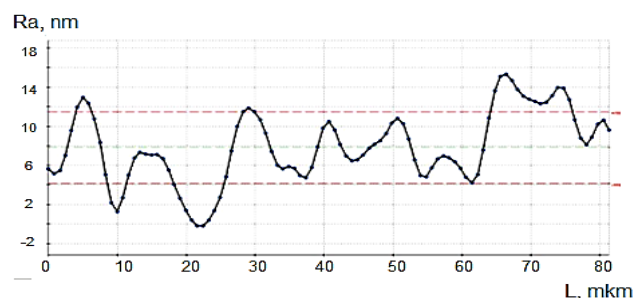


Рис. 4. Профилограмма обработанной поверхности заготовки из KDP

Измерение погрешности формы плоской обработанной поверхности заготовки из KDP, выполнено на лазерном интерферометре производства ИПФ РАН (г. Нижний Новгород). На рис. 5 приведена интерферограмма обработанной поверхности. Отклонение от плоскостности составило 280 нм. Погрешность формы обработанной детали определяется отклонением от прямолинейности направляющих станка, недостаточной точностью юстировки и вибрациями, возникающими при обработке.

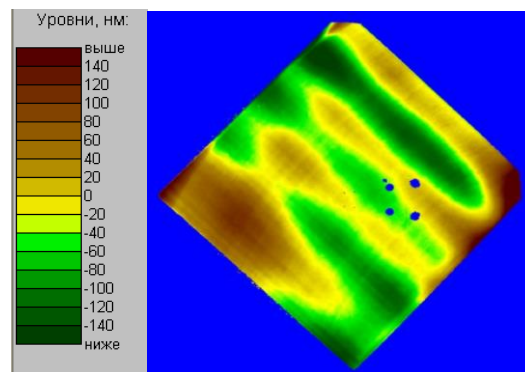


Рис. 5. Интерферограмма обработанной поверхности заготовки из KDP

Результаты экспериментальных исследований по алмазной лезвийной обработке показывают, что элементы оптики и микроэлектроники из дигидрофосфата калия, кремния, германия за счет обеспечения условий пластического деформирования материала в зоне резания могут быть обработаны с шероховатостью R_a не более 5 нм.

АЛМАЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ

Для обеспечения условий пластического деформирования при алмазном шлифовании – толщины срезаемого слоя в нанометровом диапазоне, режущий инструмент должен иметь следующие параметры: зернистость алмазоносного слоя от 2 мкм до 3 мкм; концентрация зерен в алмазоносном слое не мене 150%; использование органических связок; периодическая правка шлифовального круга, также предложено использовать схему плоского шлифования с наклоном оси круга

относительно оси вращения планшайбы с заготовками – рис. 6 [9]. На Рис. 5 шлифовальный круг радиусом R наклонен на угол β и вращается с частотой n_1 . Круговая подача заготовки со скоростью S_{prod} , задается частотой вращения n_2 поворотного стола диаметром D_{zag} . Глубина резания обозначена t . Поперечная подача круга осуществляется со скоростью S_{pop} . Изменение угла наклона оси шлифовального круга позволяет изменять направление распространения трещин в поврежденном слое. Оптимальный угол наклона оси круга, обеспечивающий пластическое деформирование материала в зоне резания и минимальную глубину трещиноватого слоя (менее 50 нм), подтвержден экспериментально и находится в диапазоне от 1° до 3° .

В табл. 3 приведены параметры для расчета толщины срезаемого слоя единичным зерном при шлифовании с наклоном оси круга.

Таблица 3

Параметры для расчета толщины срезаемого слоя единичным зерном

| Параметр | Величина |
|---|----------|
| Коэффициент, учитывающий заделку зерна в связку ε | 0,5 |
| Средний диаметр алмазного зерна x , мкм | 2 |
| Концентрация зерен в алмазоносном слое K , % | 100 |
| Частота вращения круга n_1 , об/мин | 1000 |
| Глубина резания t , мкм | 5 |
| Ширина алмазоносного слоя B , м | 0,01 |
| Радиус шлифовального круга R , м | 0,05 |
| Угол наклона оси круга β , град | 1,5 |

На рис. 6 приведен график зависимости толщины срезаемого слоя единичным зерном от продольной подачи.

Расчеты показывают, что толщина срезаемого слоя зависит от режимов резания, параметров режущего инструмента и угла наклона шлифовального круга.

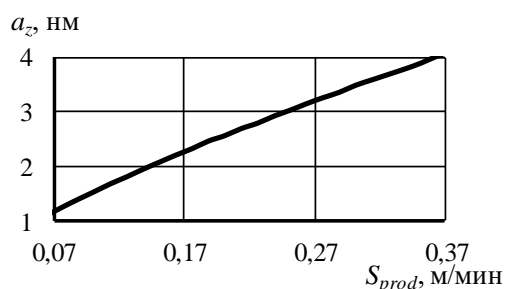


Рис. 6. График зависимости толщины срезаемого слоя единичным зерном от продольной подачи при плоском шлифовании с наклоном оси круга

Кинематическая схема обработки алмазным шлифовальным кругом с наклоном оси (рис. 7) была реализована на сверхточном экспериментальном стенде. Параметры стенда приведены в табл. 4.

Конструктивными особенностями стенда являются: шпиндель заготовки и шлифовальный шпиндель выполнены на базе подшипников с газовой смазкой, что обеспечивает величину радиального биения исполнительных поверхностей не более 0,5 мкм и жесткость не менее

100 Н/мкм; продольный и поперечный суппорты выполнены с пористым дросселированием для подачи газовой смазки и имеют дополнительное демпфирование сверхвязкой жидкостью; система индикации станка позволяет оценить величину врезания инструмента с точностью до 0,1 мкм.

Таблица 4

Параметры сверхточного экспериментального стенда для исследования процесса шлифования оптических поверхностей

| № п/п | Наименование параметра | Величина |
|-------|---|------------|
| 1. | Диапазон частот шлифовального шпинделя n_1 , мин ⁻¹ | 50...3000 |
| 2. | Диапазон частот вращения шпинделя заготовки n_2 , мин ⁻¹ | 0,01...100 |
| 3. | Ход продольного суппорта, ось Z (суппорт врезания), мм | 100 |
| 4. | Ход поперечного суппорта, ось X, мм | 200 |
| 5. | Количество осей, шт. ось X - поперечный суппорт; ось Z - продольный суппорт (врезания); ось S - вращение шлифовального круга; ось S1 - вращение заготовки | 4 |
| 6. | Рабочая подача продольного суппорта, мм/мин | 5...200 |
| 7. | Дискретность перемещения поперечного суппорта, мкм | 0,1 |
| 8. | Мощность электродвигателя шлифовального круга, кВт | 1 |

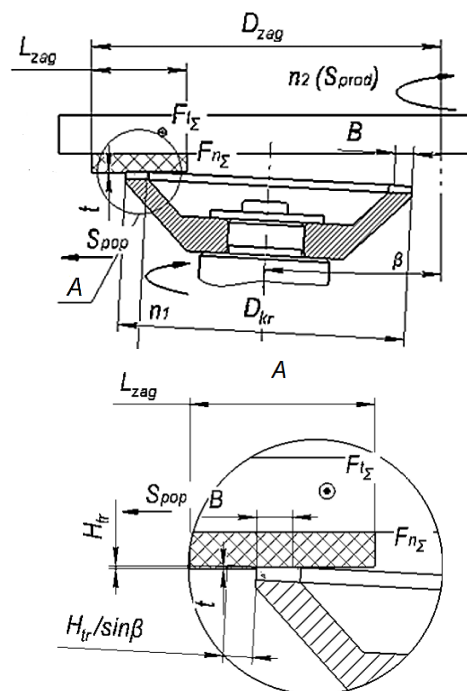


Рис. 7. Схема алмазного шлифования с наклоном оси круга

Объектами исследований при алмазном шлифовании были заготовки из ситалла марки СО-115М и кварцевого стекла марки КУ1. Обработка заготовок при алмазном шлифовании осуществлялась по на следующих режимах: глубина резания t – 1...2 мкм, частота вращения шлифовального круга n_1 – 1000 об/мин, частота вращения шпинделя заготовки n_2 – 0,2 об/мин, продольная подача заготовки S_{prod} , – 0,0075 м/мин. Диаметр вращения

заготовки составил 120 мм. Для шлифования использован алмазный круг: форма 12A2 45°, размеры круга: диаметр 100 мм, высота 21 мм, посадочный диаметр 20 мм, ширина алмазоносного слоя 6 мм, высота алмазоносного слоя - 3 мм, алмазный порошок марки АСМ зернистостью 3/2 мкм, концентрация 100%, марка связки - Б1.

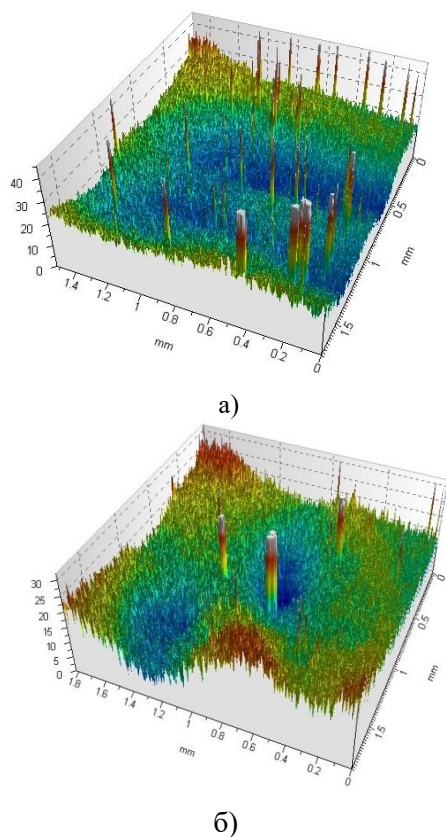


Рис. 8. Топограммы обработанных оптических поверхностей: а) ситалла СО-115М; б) кварцевого стекла КУ1

Измерения шероховатости обработанных поверхностей проводились на оптическом профилометре модели Talysurf CCL 660. На рис. 8 приведены топограммы обработанных оптических поверхностей. Шероховатость обработанных поверхностей составила R_a 9...11 нм (R_z 44...65 нм).

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что при алмазном шлифовании оптических материалов можно создать условия для пластичного деформирования материала в зоне резания и получить шероховатость обрабатываемой поверхности R_a менее 10 нм. Кроме того, пластичное деформирование материала в зоне резания и использование схемы шлифования с наклоном круга обеспечивают уменьшение глубины поврежденного слоя до величины менее 50 нм. Минимальная глубина трещиноватого слоя позволяет уменьшить величину рассеяния, направленного на обработанную оптическую поверхность излучения, и эффективность, долговечность и точность работы приборов в целом [10,11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Полученные экспериментальные данные по алмазной лезвийной и абразивной обработке позволяют сделать вы-

вод о том, что при условиях создания пластического деформирования для оптических материалов в зоне резания, обработанная поверхность имеет шероховатость R_a менее 10 нм и глубину трещиноватого слоя не более 50 нм. Полученные параметры качества обработанных поверхностей КДР кристаллов, ситалла и кварцевого стекла показывают, что при обработке рассматриваемых материалов алмазным фрезерованием и шлифованием на сверхточных станках, возможно минимизировать или исключить операции полирования из технологического процесса. Для обеспечения пластического деформирования оптического материала в зоне резания необходимо, чтобы были соблюдены необходимые рекомендации по параметрам режущего инструмента и режимам обработки. При этом точность формы обработанной поверхности обеспечивается кинематической точностью используемого оборудования и может достигать 0,3 мкм на апертуре 180x180 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xianqun H. Specific Energy as an Index to Identify the Critical Failure Mode Transition Depth in Rock Cutting / Xianqun H., Chaoshui X. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Iss. 4, Vol. 49. – P. 1461-1478.
2. Masahiko Y. Critical depth of hard brittle materials on nano plastic forming / Masahiko Y., Sivanandam A., Matsu-mura T. // *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*. – 2008. – Vol. 2, #1. – P. 59-70.
3. Muhammad A. Analytical modelling of ductileregime machining of tungsten carbide by end-milling / Muhammad A., Mustafizur R., Y.S. Wong // *International Journal of Advance Manufacturing Technology*. – 2011. – №5. – P. 53-64.
4. Bifano T. Specific grinding energy as an in process control variable for ductile-regime grinding / Bifano T., Fawcett S. // *Precision engineering*. – 1991. – Vol. 13, №4. – P. 256-262.
5. Masahiko Y. Critical depth of hard brittle materials on nano plastic forming / Masahiko Y., Sivanandam A., Matsu-mura T. // *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*. – 2008. – Vol. 2, #1. – P. 59-70.
6. Borovskiy G. V. Ultraprecision machining of brittle optical materials / Borovskiy G. V., Shavva M. A., Grubiy S. V. and Maslov R. A. // *Russian Engineering Research*. – 2015. – #91. – P. 883-89.
7. Bifano T. Chemomechanical effects in ductile regime machining of glass / Bifano T., DePiero D., Golini D. // *Precision engineering*. – 1993. – Vol. 15, №4. – P. 238-247.
8. Zaharevich E. M. The Experimental Determination of the Ductile-Fracture Transition Boundaries when Cutting Brittle Materials / Zaharevich E. M., Lapshin V. V., Shavva M. A. and Grubiy S. V. // *News of High Education Institute Engineering*. – 2016. – #7. – P. 64-71.
9. Shavva M. A. The Methods of Calculation of Cutting Forces for Diamond Grinding of Brittle Optical Materials // *News of High Education Institute Engineering*. – 2017. – #2. – P. 61-69.
10. 3D mapping of subsurface cracks in alumina using FIB/ B.J. Inkson [et al] // *Materials Research Society*. – 2001. – Vol. 649. – P. Q.7.7.1 – Q.7.7.6.
11. The effect of eigenstrain induced by ion beam damage on the apparent strain relief in FIB-DIC residual stress evaluation/ E. Salvati [et al] // *Materials and Design*. – 2016. – №92. – P. 649-658.

Ultra-precision machining of optical materials elements devices surfaces

Grubiy S.V.

Bauman Moscow State Technical Universit
BMSTU
Moscow, Russia
grusv@yandex.ru

Shavva M.A., Lapshin V.V.

Russian Research & Development Tooling Institute
VNIINSTRUMENT
Moscow, Russia
katapu@mail.ru, vasylap@mail.ru

Abstract. Results of theoretical and experimental studies aimed at improving the performance, accuracy and quality of machining optical materials elements devices surfaces (reducing the roughness and depth of fractured layer): potassium dihydrophosphate (KDP), sitall, quartz glass, diamond blade and abrasive diamond tools, are presented in article. Kinematic schemes of ultra-precise machining of optical surfaces and the basic theoretical dependences, setting modes and cutting conditions are considered. Exam-

ples of blade and abrasive processing on ultra-precise experimental stands and results of metrological control of treated surfaces quality parameters are also given.

Keywords: high-accuracy machining, optical materials, diamond micromilling, diamond grinding.

Экспериментальные исследования снижения гидравлического сопротивления при движении высоковязких жидкостей в трубопроводе

Ильина Л., Шагарова А.
Волгоградский государственный
технический университет
Волгоград, Россия
vgtupaph@gmail.com, shagarang@gmail.com

Гончаров Н.
АО «Каустик»
Волгоград, Россия
bigfatskeleton@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен способ снижения гидравлического сопротивления трубопровода путем создания пристенного газового слоя при течении высоковязкой среды в трубопроводе. Разработана экспериментальная установка с устройством для создания двухслойного кольцевого течения. Проведены экспериментальные исследования устойчивости двухслойного кольцевого течения на примере модельной вязкой жидкости (моторного масла) и пристенного газового слоя. Экспериментальные исследования показали эффективность применения двухслойного кольцевого течения для снижения гидравлического сопротивления при транспортировке высоковязких сред внутри круглой трубы. Применение двухслойного кольцевого течения в гидравлических системах и промышленных трубопроводах позволит повысить пропускную способность гидравлических систем и снизить энергозатраты на транспортировку высоковязких жидкостей за счет снижения потерь давления на преодоление сил трения при течении высоковязких сред внутри трубопровода.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, пристенный слой, высоковязкая жидкость, кольцевое течение.

ВВЕДЕНИЕ

Решение вопроса по снижению гидравлического сопротивления, а, следовательно, и снижению энергозатрат при течении вязких и высоковязких сред в производственных и транспортных трубопроводах, является актуальной задачей, стоящей при проектировании новых и реконструкции существующих производственных трубопроводов и гидравлических систем.

Анализ способов снижения гидравлического сопротивления, показал актуальность применения двухслойного течения вязкой среды в кольце маловязкой жидкости или газа [1-7].

Для создания устойчивого двухслойного кольцевого течения в трубопроводах разработаны различные конструкции устройств [8-12, 16-17].

Теоретические основы течения жидкостей в трубопроводе с маловязким пристенным слоем рассмотрены во многих источниках и предложены модели течения для вязких жидкостей с различными

реологическими характеристиками в кольце маловязкой жидкости или газа [13-17, 19-23].

Существующая математическая модель двухслойного кольцевого течения высоковязкой ньютоновкой жидкости в кольце маловязкой жидкости (газа) показала, что расход маловязкой жидкости для создания устойчивого двухслойного кольцевого течения составляет от 10 до 25% от расхода основной высоковязкой жидкости [16]. При этом происходит значительное снижение гидравлического сопротивления и энергозатрат на транспортировку высоковязкой жидкости.

Для подтверждения разработанной математической модели двухслойного кольцевого течения была проведена серия экспериментов, задачей которых являлось исследование устойчивости такого течения в вертикальном трубопроводе [16].

В экспериментальном исследовании течения высоковязкой жидкости в кольцевом газовом слое в горизонтальном трубопроводе [17, 18] наблюдается значительное увеличение объема перекачиваемой вязкой жидкости в единицу времени при меньших расходах газа для создания пристенного слоя. Конструкция экспериментальной установки в работах [17,18] отличается тем, что трубопровод по которому осуществляется кольцевое течение – пластиковый, нагнетательное устройство используемое в представленных работах не позволяет обеспечить постоянный расход газа для создания пристенного газового слоя.

Следует отметить, что в гидродинамике принято считать, что влияние шероховатости на потери давления на участке прямого трубопровода выполненного из стекла и пластика минимальны [24], т.е. потери давления при течении вязкой жидкости и так будут незначительными.

Таким образом, экспериментальное исследование устойчивости течения вязкой жидкости в кольце маловязкой жидкости или газа на прямом участке шероховатого трубопровода является актуальной задачей, позволяющей в случае решения найти оптимальные расходы основной вязкой жидкости и газа для создания устойчивого кольцевого течения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДВУХСЛОЙНОГО КОЛЬЦЕВОГО ТЕЧЕНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований устойчивости двухслойного кольцевого течения была изготовлена экспериментальная установка.

Экспериментальная установка представлена на рис.1 и включает в себя расходную емкость 1 для основной жидкости, установленную на подставке 2 и соединенную через кран, разделитель 12 тонкостенной стальной трубы 4 длиной 1000 мм и внутренним диаметром 16 мм с приемной емкостью 5, размещенную в резервуаре 6. Подача газа в пристенный слой осуществляется компрессором 7. Компрессор снабжен манометром 9 и краном подачи воздуха 8, трубой с краном 10, счетчиком объема газа 11 и устройством для создания пристенного кольцевого слоя 12, соединенных с трубой 4, для создания пристенного кольцевого газового слоя, которая крепится в горизонтальном положении к резервуару 6 с помощью держателя 13.

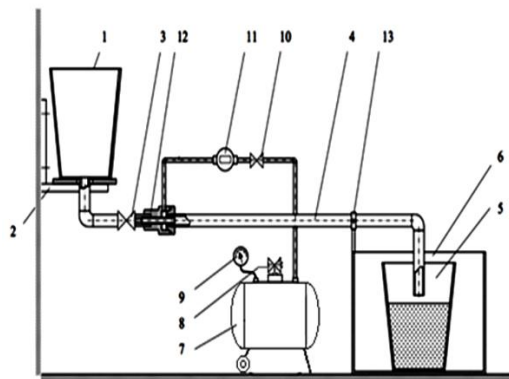


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – расходная емкость; 2 – подставка; 3, 10 – кран; 4 – труба; 5 – приемная емкость; 6 – резервуар; 7 – компрессор; 8 – кран; 9 – манометр; 11 – счетчик газа; 12 – устройство для создания пристенного кольцевого слоя; 13 – держатель

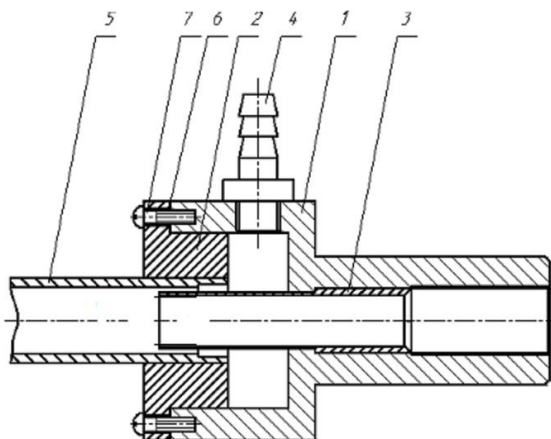


Рис.2. Устройство для создания пристенного кольцевого слоя: 1 – корпус; 2 – втулка; 3 - гильза; 4 – штуцер; 5 – труба; 6 – прокладка; 7 – винт

Для создания пристенного газового слоя было изготовлено устройство (рис.2), которое содержит корпус, в котором выполнена кольцевая полость, соединенная с одной стороны с системой подачи газа для создания кольцевого пристенного слоя, а с другой стороны - с трубой через кольцевую щель, образованную наружной поверхностью гильзы с внутренней поверхностью трубы.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В качестве основной жидкости было выбрано минеральное моторное масло для бензиновых двигателей легковых автомобилей характеристика которого приведена в таблице 1.

Для создания пристенного кольцевого газового слоя использовался воздух, характеристика которого приведена в таблице 2.

Таблица 1

Характеристика моторного масла лукойл стандарт 10w-40

| Наименование показателей | Значение |
|---|------------------------|
| Вязкость кинематическая, м ² /с, при 20 °С | 0,594·10 ⁻³ |
| Вязкость динамическая, Па·с, при 20 °С | 0,526 |
| Массовая доля механических примесей, % | 0,012 |
| Массовая доля воды, % | следы |
| Температура застывания, °С | -35 |
| Плотность, кг/м ³ , при 20 °С | 886 |

Таблица 2

Характеристика атмосферного воздуха

| Наименование показателей | Значение |
|--|------------------------|
| Вязкость динамическая, Па·с, при 20 °С | 0,018·10 ⁻³ |
| Плотность, кг/м ³ , при 20 °С | 1,184 |

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

При проведении экспериментов исследовалась зависимость расхода основной жидкости (моторного масла) от расхода вспомогательной среды (газ), образующей пристенный кольцевой слой при течении в трубе.

С помощью стандартного стеклянного термометра определялась температура моторного масла, воздуха, а затем с помощью стандартного стеклянного капиллярного вискозиметра типа ВПЖ-1 и ареометра типа АНТ-1 - кинематическая вязкость и плотность моторного масла.

Методики экспериментального определения вязкости и плотности жидкостей широко известны, поэтому их описание не приводится.

Вязкость и плотность воздуха, используемого для создания пристенного слоя, определялись из справочных таблиц [4] при известных температурах.

Расход основной жидкости $Q_{ж}$ определялся измерением объема и времени течения с помощью мерной емкости и секундомера.

Расход газа (воздуха) $Q_{г}$, определялся измерением объема подаваемого газа за определенное время с

помощью счетчика газа роторного типа СГМБ и секундомера.

Эксперимент по исследованию зависимости расхода основной жидкости (моторное и растительное масло) $Q_{жс}$ от расхода вспомогательной среды (воздуха) $Q_г$, используемой в качестве пристенного слоя, проводился в следующей последовательности:

- в расходную емкость 1 наливалась основная жидкость, а в емкость компрессора 7 производилась подкачка воздуха при контроле его давления манометром 9;
- при включении секундомера открывался кран 3, и основная жидкость под действием гравитационных сил из расходной емкости 1 поступала через канал в гильзе разделителя 12 внутрь трубы 4;
- открывался на определенный расход кран 10 и сжатый воздух по трубке 9 поступал в кольцевую полость корпуса разделителя 12, а оттуда через кольцевую щель - в трубу 4, образуя пристенный кольцевой газовый слой определенной толщины, в зависимости от расхода подаваемой среды;
- слив основной жидкости осуществлялся в приемную емкость 5;
- через определенное время секундомер останавливался, кран 3 и 10 перекрывались и подача основной и вспомогательной жидкости (газа) прекращалась;
- измерялись израсходованные объемы основной и вспомогательной среды за время эксперимента и определялись их объемные расходы $Q_{жс}$, $Q_г$;
- с помощью крана подачи воздуха 8 изменялся расход вспомогательной среды (газа), и эксперимент повторялся.

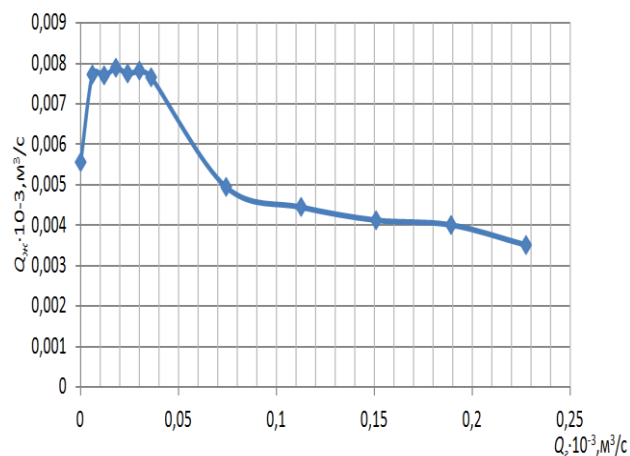
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты экспериментальных исследований зависимости расхода основной жидкости (моторное масло) $Q_{жс}$, от расхода вспомогательной среды (воздуха) $Q_г$, используемой в качестве кольцевого пристенного слоя, представлены в графической форме, изображенной на рис.3.

Создание пристенного кольцевого жидкого (газового) слоя при течении основной жидкости (моторное масло) в трубе способствует уменьшению гидравлического сопротивления трубы и увеличению расхода основной жидкости, причем, зависимость расхода основной жидкости $Q_{жс}$ от расхода вспомогательной среды (газа) $Q_г$ носит экстремальный характер.

С увеличением расхода газа $Q_г$, образующей пристенный кольцевой слой, расход основной жидкости $Q_{жс}$ увеличивается до определенного предела, после которого при значительных расходах вспомогательной среды (газа) происходит его уменьшение вследствие вытеснения основной жидкости возросшим потоком вспомогательной среды, переходу режима течения из

ламинарного в турбулентный и создания тем самым повышенного сопротивления движению основной жидкости.



Моторное масло : $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\mu = 0,526 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\rho = 886 \text{ кг/м}^3$
 Воздух : $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\mu = 0,018 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\rho = 1,184 \text{ кг/м}^3$

Рис.3. Зависимость расхода основной жидкости (масло моторное) $Q_{жс}$ от расхода газа $Q_г$

Сравним полученные в ходе эксперимента результаты в данной работе с результатами, представленными в работах [17,18]. Для наглядности отобразим данные в виде графиков, изображенных на рис.4.

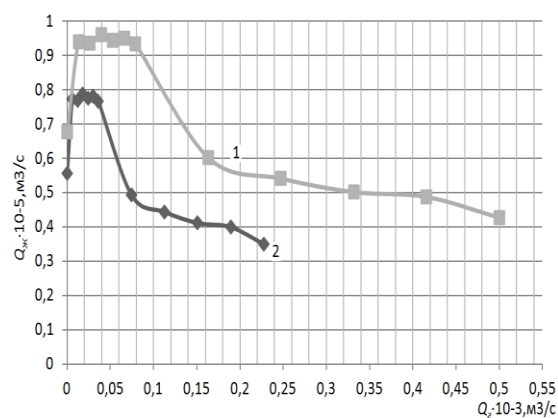


Рис. 4. Сравнительная зависимость расхода основной жидкости (масло моторное) $Q_{жс}$ от расхода воздуха $Q_г$

1 – результаты экспериментальных данных, представленных в работах [17,18]; 2 – данные полученные в ходе эксперимента

Как видно из графического изображения зависимостей 1 и 2, результаты экспериментов можно считать корректными, так как результаты имеют пропорциональные отклонения, которые можно объяснить наличием и отсутствием шероховатостей на внутренней поверхности труб.

В случае течения основной жидкости (моторного масла) без пристенного газового слоя, увеличение расхода

моторного масла на 30% в начальной точке показанном зависимостью 1, по сравнению с полученными экспериментальными данными (2) объясняется также отсутствием шероховатости на поверхности трубопровода.

Воспроизводимость результатов подтверждается массивом данных, полученных в ходе проведенного эксперимента по предложенной методике. Значительное снижение расхода газа в ходе эксперимента (2) объясняется стабилизацией кольцевого пристенного слоя, за счет установки компрессора, позволяющего регулировать подачу воздуха.

Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных, можно сделать вывод, что течение высоковязкой ньютоновской жидкости с пристенным газовым слоем в шероховатой стальной трубе позволяет обеспечить повышение пропускной способности трубопровода в 1,5 раза.

Сравнительный анализ течения вязкой жидкости с пристенным газовым слоем в гладком и шероховатом трубопроводе, говорит о повышении пропускной способности трубопроводов в обоих случаях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черникин В.И. Гидротранспорт нефтепродуктов по трубам. // Труды МНИ им. И.М. Губкина, 1949. – вып. 9.
2. Charles M.E., Redberge P.J. The Reduction of Pressure Gradients in Oil Pipelines by the Addition of Water. / The Canad. Journal of Chem. Eng., aprile, 1967.
3. Мастобаев Б.Н. Химические средства и технологии в трубопроводном транспорте нефти / Б.Н. Мастобаев, А.М. Шаммазов, Э.М. Мовсумзаде. – М.: Химия, 2002. – 296с.
4. Алиев Р.А. Трубопроводный транспорт нефти и газа: учеб. для вузов / Р. А. Алиев [и др.] – М.: Недра, 1988. – 368 с.
5. Скрипников Ю.В. Влияние маловязкого пристенного слоя на устойчивость течения в круглой трубе. // Сб. науч. трудов "Совершенствование систем управления и эксплуатации магистрального транспорта". – Уфа: ВНИИСПНефть, 1988.
6. Тугунов, П.И. Эксплуатация магистральных трубопроводов / П.И. Тугунов, М.В. Нечваль, В.Ф. Новоселов, Ш.Н. Ахатов. – Уфа-25: Башкир. кн. изд., 2005. – 84 с.
7. Снижение гидравлического сопротивления при двухслойном кольцевом течении высоковязкой жидкости в трубопроводе / Л. А. Ильина, А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Е. В. Васильева // Известия ВолгГТУ. Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии». Вып. 7 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 1 (128). - С. 114-117.
8. П. м. 84925 РФ , МПК F 15 D 1/06, F 17 D 1/20. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе / А. Б. Голованчиков, Е. Н. Конопальцева, А. В. Ильин, Л. А. Ильина, М. Г. Чернобровкина; ВолгГТУ. - 2009.
9. Голованчиков А.Б., Ильина Л.А., Ильин А.В., Дулькина Н.А., Козлов Д.А., Лыкова М.Е. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе // Патент РФ №2334134, 2008. МПК F 15 D 1/06, F 17 D 1/20.
10. Голованчиков А.Б., Ильина Л.А., Ильин А.В., Дулькина Н.А., Разумная Т.В. Способ перемещения высоковязких жидкостей по трубопроводу // Патент РФ №2334161. 2008. МПК F 17 D 1/14, F 15 D 1/02.
11. Голованчиков А.Б., Ильина Л.А., Ильин А.В., Дулькина Н.А., Дулькин А.Б., Карашук Д.С. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе. // Патент . Россия №2285198. 2006. МПК F 17 D 1/20, F 15 D 1/06.
12. Голованчиков А.Б., Ильин А.В., Ильина Л.А., Лобойко В.Ф., Якушко М.В. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе. // Патент РФ №2241868. 2004. МПК 7 F 15 D 1/06, F 17 D 1/20.
13. Транспортировка нефти и нефтепродуктов с газовым пограничным слоем / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, А. В. Ильин, Н. А. Дулькина, А. Б. Дулькин // Технологии нефти и газа. - 2006. - №4. - С. 10-14.
14. Модель двухслойного кольцевого течения вязкой жидкости с произвольной реологической кривой с маловязким пристенным слоем в трубе / А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Л. А. Ильина // Изв. ВолгГТУ. Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии». Вып. 5 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2012. - № 1. - С. 12-14.
15. Течение в трубе неньютоновской жидкости с маловязким пограничным слоем / А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Л. А. Ильина // Изв. ВолгГТУ. Сер. Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии: Межвуз. сб. науч. статей / ВолгГТУ. - Волгоград, 2004. - Вып.1, №5. - С. 19-21.
16. Теоретические основы течения жидкостей в трубопроводе с маловязким пограничным слоем / А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Л. А. Ильина / Волгоград. гос. техн. ун-т, – Волгоград, 2007. – 108 с.
17. Граничная устойчивость гетерофазных жидкостей на макро- и микроуровнях/ А. Б. Голованчиков, Е. В. Васильева, Л. А. Ильина ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – 131 с.
18. Экспериментальные исследования устойчивости течения нефтепродуктов в трубе с пристенным жидким (газовым) слоем / А. В. Ильин, Г. Н. Карева, Е. В. Васильева, Л. А. Ильина, А. Б. Голованчиков // Технологии нефти и газа. - 2013. - № 5. - С. 36-41.
19. Archibong-Eso, A. High viscous oil–water two–phase flow: experiments & numerical simulations / A. Archibong-Eso, J. Shi, Y. D. Baba, A. M. Aliyu, Y. O. Raji, H. Yeung // Heat and Mass Transfer Journal. - 2018.
20. Andrade, T. H. F. Isothermal and non-isothermal water and oil two-phase flow (core-flow) in curved pipes / T. H. F. Andrade, K. C. O. Crivelaro, S. R. F. Neto, A. G. B. Lima // International Journal of Multiphysics. – 2013, Vol. 7. №2.
21. Cazarez-Candia, O. Modeling of heavy oil-water core-annular upward flow in vertical pipes using the two-fluid model / O. Cazarez-Candia, S. Piedra-González // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017, Vol. 150. 146 p.
22. Gupta, R. Oil-Water Core-Annular Flow in Vertical Pipes: A CFD Study / R. Gupta, C. K. Turangan, R. Manica // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2016, Vol. 94.
23. Gadelha, A. J. F. Thermo-Hydrodynamics of Core-Annular Flow of Water, Heavy Oil and Air Using CFX / A. J. F. Gadelha, S. R. de Farias Neto, R. Swarnakar, A. G. B. de Lima // Advances in Chemical Engineering and Science. – 2013, Vol. 3. 37 p.
24. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. –13-е изд., стереотип. – М.: Альянс, 2006. – 575 с.

Experimental Research on Reducing Hydraulic Resistance when Transporting High-viscosity Fluids by Pipeline

Irina L., Shagarova A.

Volgograd State Technical University
Volgograd, Russia
vgtupaph@gmail.com, shagarang@gmail.com

Goncharov N.

JSC Kaustik
Volgograd, Russia
bigfatskeleton@mail.ru

Abstract. The paper dwells upon reducing the hydraulic resistance of a pipeline by generating a wall-adjacent gas layer when transporting a high-viscosity medium. The research team has designed an experimental setup that contains a device for generating two-layer annular flow. The stability of such two-layer annular flow has been studied by simulating a viscous fluid (motor oil) and a wall-adjacent gas layer. Experiments show using a two-layer annular flow effectively reduces the hydraulic resistance when transporting a high-viscosity medium by a round pipe. Using two-layer annular flows in hydraulic systems and industrial

pipelines improves the throughput and reduces the energy costs of transporting high-viscosity fluids by reducing pressure losses that occur when overcoming the friction forces arising during such transport. The experimental data thus show that a wall-adjacent gas layer can improve the pipeline throughput by up to ~50% when transporting a high-viscosity Newtonian fluid through a rough-surfaced steel pipe.

Keywords: hydraulic resistance, wall-adjacent layer, high-viscosity fluid, annular flow.

Оптимизация технологии режима отверждения композитов на основе эпоксидных связующих

Чэнь Янчэн

МГТУ имени Н.Э. Баумана
Москва, Россия
yangyangchen@mail.ru

Мальшева Г.В.

МГТУ имени Н.Э. Баумана
Москва, Россия
malyin@mail.ru

Аннотация. Проведены методики определения теплофизических свойств эпоксидных связующих в зависимости от их процесса отверждения, т.е. при изменении фазового состояния. В качестве объекта исследований использован эпоксидный состав на основе эпокси-диановой смолы и модифицированного алифатического полиамина. Проведены экспериментальные исследования по определению изменения теплофизических свойств эпоксидных связующих в процессе их отверждения. Проведен алгоритм определения режима отверждения термореактивных связующих. Проведено математическое моделирование процесса отверждения эпоксидного связующего при разных скоростях нагрева методом конечных элементов. В качестве исходных данных при моделировании использованы полученные результаты экспериментальных исследований. При использовании результатов математических моделирования проведена оптимизация кинетики процесса отверждения в зависимости от разных скоростей нагрева методом идеальной точки. И установлено, что оптимальным вариантом является скорость нагрева до начала гелеобразования 3 К/мин, скорость нагрева после совершения гелеобразования 5 К/мин, и температура выдержки 98 °С.

Ключевые слова: оптимизация процесса отверждения; кинетика отверждения; теплофизические свойства эпоксидных связующих; моделирование; полимерные композиционные материал.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимерные композиционные материалы на основе эпоксидных матриц нашли устойчивое применение, поскольку эпоксидные матрицы обладают комплексом хороших технических и эксплуатационных свойств [1-3]. Исследование кинетики процесса отверждения эпоксидных связующих имеет теоретическое и практическое значение.

Проблеме оценки кинетики процессов отверждения уделяется большое внимание, особенно если решаются вопросы разработки технологии формования крупногабаритных изделий сложной геометрической формы [4-6]. Типовой технологический режим процесса отверждения показан на рис. 1. На участках I и III имеет место повышение температуры, на участках II IV - выдержка и на участке V - охлаждение. Время и температуры выдержки на II участке определяют, как правило, экспериментально для каждого конкретного изделия. Время и температура выдержки на IV участке полностью зависят от химической структуры используемого связующего и задается его разработчиками [7]. Таким образом, при разработке технологического процесса отверждения технолог самостоятельно должен определить режимы на участках I и III.

В процессе отверждения эпоксидных связующих и композитов на их основе, одновременно имеет место возникновение усадки и остаточных напряжений [8, 9]. Оба этих

процесса начинаются на начальной стадии (I участок), когда происходит образование сетчатой структуры, т.е. процесс формирования полимерной сетки начинается в жидкой фазе на самом первой этапе отверждения. Процесс увеличения вязкости протекает непосредственно до начала процесса гелеобразования. Этот процесс сопровождается множеством химических и термодинамических процессов и приводит к формированию квазинепрерывного каркаса. Объемная усадка возникает на самом начальном этапе процесса отверждения и ее величина в существенной степени будет зависеть макромoleкулярной подвижности, что оказывает огромное влияние на плотность упаковки макромoleкул. Остаточные напряжения, точно также, как и объемная усадка, возникают на I стадии процесса отверждения, что связано с ограниченными деформациями материала.

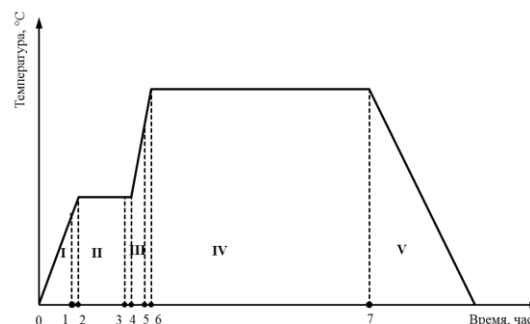


Рис.1. Типовой технологический режим процесса отверждения термореактивных связующих

Кинетика накопления величины объемной усадки и остаточных напряжений в процессе отверждения зависит от многих факторов: градиента температур по толщине отверждаемого материала, теплофизических свойств используемых армирующих наполнителей и, в существенной степени, от кинетики процесса нагрева.

Существуют различные экспериментальные методы [9-12] и теоретические подходы [13,14], позволяющие оптимизировать технологические режимы формования деталей из полимерных композиционных материалов. Однако авторы многочисленных работ при моделировании температурного состояния в процессе нагрева [15, 16] не учитывают изменение агрегатного состояния связующего в процессе его отверждения, который сильно влияет на технологические погрешности при исследовании температурного состояния связующих в процессе его отверждения, и при моделировании и оптимизации процесса отверждения деталей из композитов на основе термореактивных связующих. Это приводит к завышенной продолжительности про-

цесса нагрева, потери качества и увеличения себестоимости особенно при исследовании крупногабаритных изделий сложной геометрической формы.

Целью настоящего исследования является оптимизация режимов отверждения эпоксидных связующих в зависимости от кинетики процесса нагрева.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМА ОТВЕРЖДЕНИЯ

В данной работе приведен алгоритм определения режимов отверждения, при использовании любого термореактивного связующего, отверждение которого происходит при повышенных температурах (Рис.2).

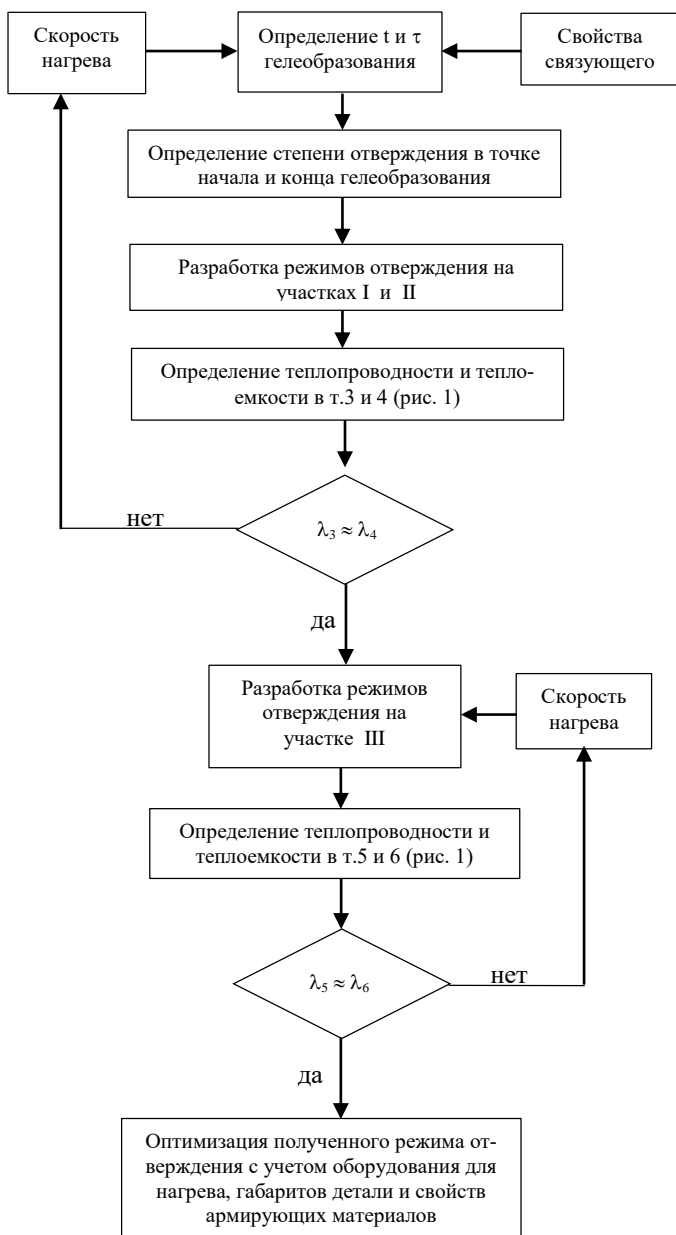


Рис.2. Алгоритм определения режима отверждения

Принято допущение, что выдержка на II участке начинается после начала процесса гелеобразования и продолжается до его полного завершения. И в конце участка III происходит окончательное формирование структура полимерных матриц.

Независимо от свойств используемых материалов, выдержка на II участке начинается после начала процесса гелеобразования и должна продолжаться до его полного завершения. В качестве критерия завершения процесса гелеобразования предлагается использовать характеристики теплоемкости или теплопроводности. На рис. 1 точками 1-6 обозначены значения времени и температуры в которых необходимо проводить измерения теплофизических характеристик. Если выполняются условия при которых значения теплопроводности $\lambda_3 \approx \lambda_4$ и $\lambda_5 \approx \lambda_6$, только в этом случае начинается выдержка на участках II и III.

К оптимизируемым параметрам технологического режима относятся: скорость повышения температуры на участке I, скорость повышения температуры на участке III, продолжительность выдержки при постоянной температуре на участке II. За критерии качества предлагается использовать значения остаточных напряжений. Предлагаемый алгоритм может быть использован только в том случае, если для рассматриваемого связующего известны значения остаточных напряжений (или пористости) не только на каждом из рассматриваемых участков техпроцесса отверждения (I - III), но и на всех указанных на рис. 1 точках.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований использовалось эпоксидное связующее горячего отверждения, состоящего из эпоксидной смолы и отвердителя на основе ароматического амина.

Значения теплоемкости и теплопроводности оценивали непосредственно в процессе отверждения (для жидкого, гелеобразного и твердого состояния). Коэффициенты теплоемкости связующего в зависимости от конверсии определены методом дифференциального сканирующего калориметра. Испытания для определения теплоемкости связующего проводили на приборе DSC204F1 (Netzsch) по ГОСТ 56754-2015 до температуры начала реакции отверждения. Величина теплового эффекта определялась методом дифференциально-сканирующей калориметрии и экспериментально оценивалась степень конверсии [17, 18].

Значения коэффициентов теплопроводности определены методом лазерной вспышки. Эксперименты по определению теплопроводности проведены на установке LFA 457 MicroFlash - NETZSCH. Особенность проведения данных исследований является использовании специальной оправки [12], поскольку жидкое связующее является прозрачным для излучения лазера. И в процессе исследований сначала определялась величина эффективной теплопроводности, и потом определена величина теплопроводности.

Полученные значения экспериментальных данных показаны в таблице 1

Таблица 1

Результаты экспериментальной оценки характеристик эпоксидного материала при комнатной температуре

| Процесс отверждения | Свойства связующего | | |
|---------------------|---------------------|---------------|----------------------|
| | Конверсия, % | Ср, Дж/(кг·К) | λ , Вт/(м·К) |
| 1-ой участка | 0 | 1973 | 0,08 |
| | 16 | 1921 | 0,14 |
| | 30 | 1820 | 0,19 |
| 3-ой участка | 50 | 1626 | 0,20 |
| | 75 | 1406 | 0,22 |

Температура выдержки на участке II соответственна температуре гелеобразования. Исследования для оценки температуры гелеобразования в зависимости от скорости нагрева проводили на приборе марки DMA 242 E Artemis. В эксперименте определена температура гелеобразования при скоростях нагрева: 1,3,5,7 К/мин методом динамического механического анализа. И по теории флори-стокмайера-гольдберга (Flory-Stockmayer Theory) степень конверсии в точке гелеобразования постоянно и не зависит от скорости нагрева [14-16]. Поэтому в данной работе можем использовать теорию Озава (Ozawa), в точке гелеобразования теория Озава имеет вид:

$$\log \beta + 0,4567 \frac{E_a}{RT_{гел}} = \text{const} \quad (1)$$

где β – скорость нагрева, E_a – кажущаяся энергия активации; T – абсолютная температура, R – универсальная газовая постоянная.

Методом аппроксимации определена связи температуры гелеобразования и скоростей нагрева при использовании экспериментальных результатов определения температуры гелеобразования:

$$\log \beta + 110,25 \cdot \frac{1}{T_{гел}} = 1,68 \quad (2)$$

Таким образом определена температура гелеобразования при скоростях нагрева 2,4,6 К/мин. Полученные значения температуры гелеобразования от скорости нагрева показаны в таблице 2

Таблица 2

Результаты зависимости температуры гелеобразования от скоростей нагрева

| Скорость нагрева(К/мин) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Температура гелеобразования (°C) | 65 | 80 | 98 | 102 | 107 | 122 | 130 |

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

Моделирование проводили с учетом и без учета изменения агрегатного состояния связующего в процессе его отверждения (табл. 3). На рис. 3 показана зависимость температуры от времени в середине образца, определенная на участке 0-1 (см. рис. 1) при скорости нагрева 3 К/. На рис. 4 показана зависимость градиента температуры от времени в середине образца, также определенная на участке 0-1 при скорости нагрева 3 К/мин.

Таблица 3

Результаты моделирования значений температур в исследуемом образце в процессе его отверждения

| Скорость нагрева, К/мин | Без учета агрегатного состояния | С учетом агрегатного состояния |
|--|---------------------------------|--------------------------------|
| Значения температуры в центре исследуемой модели, °C | | |
| 1 | 31,7 | 28,9 |
| 3 | 45,0 | 36,0 |
| 5 | 58,3 | 44,7 |
| 7 | 71,6 | 52,8 |
| Градиент температур на поверхности и в середине модели, °C | | |
| 1 | 1,3 | 4,2 |
| 3 | 4,0 | 13,1 |
| 5 | 6,7 | 20,3 |
| 7 | 9,4 | 28,2 |

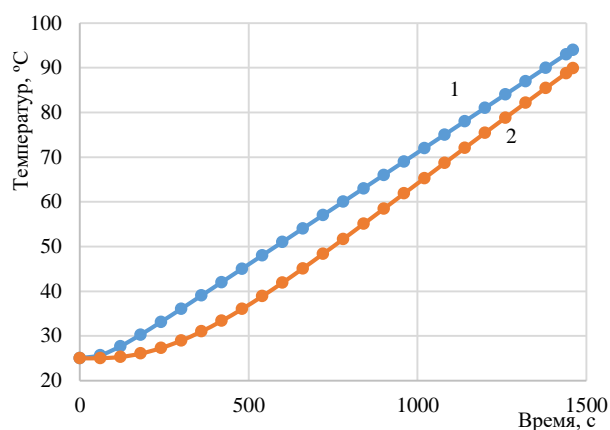


Рис. 3. Зависимость температур от времени нагрева при скорости нагрева 3 К/мин. без учета (1) и с учетом(2) изменения агрегатного состояния эпоксидного материала

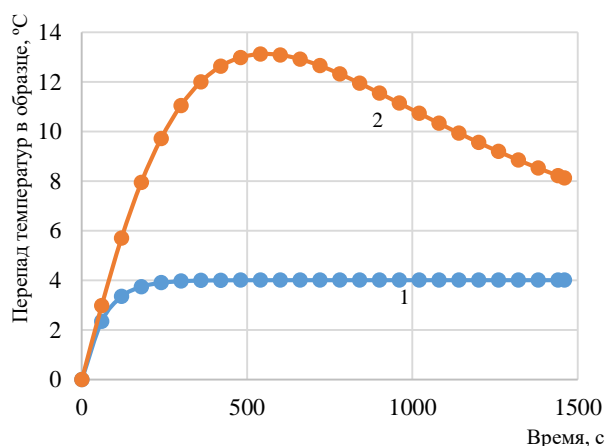


Рис.4. Зависимость перепада температуры от времени в образце эпоксидного материала без учета (1) и с учетом (2) изменения его агрегатного состояния при скорости нагрева 3 К/мин

В процессе моделирования установлено, что при повышении скорости нагрева погрешность температурного поля без учета и с учетом разного агрегатного состояния увеличивается. Таким образом, учет теплофизических свойств эпоксидного материала при изменении его агрегатного состояния позволяет существенным образом повысить точность.

Для дальнейшей оптимизации процесса отверждения в данной работе моделирования значения температур образца в процессе его нагрева проводился с учетом теплофизических характеристик материала в жидком, гелеобразном и твердом состоянии. В качестве исходных данных для проведения моделирования процесса отверждения были использованы результаты ранее проведенных экспериментальных исследований [12]. Для каждого участка скорости нагрева (участок I и участок III) V_I и V_{III} выбраны семь вариантов скоростей подъема температур 1,2,3,4,5,6,7 К/мин (всего 49 вариантов моделирования). И проведено математическое моделирование процесса нагрева методом конечных элементов.

В качестве критерия оптимизации использованы:

(1) перепад температуры на участке до гелеобразования (первой участка): $\Delta T_{\max I}$;

(2) перепад температуры на участке после гелеобразования (третьей участке): $\Delta T_{\max III}$;

(3) продолжительность процесса нагрева на участках до и после точки гелеобразования: τ .

Ограничение:

- (1) $\Delta T_{\max I} < 20$ °С,
- (2) $\Delta T_{\max III} < 10$ °С,
- (3) $\tau < 60$ мин.

И из ограничения найдены 9 допустимых альтернативных объектов из 49 вариантов моделирования. Полученные допустимые альтернативные объекты показаны в таблице 3.

Таблица 3.

Допустимые альтернативные объекты и идеальный объект при оптимизации

| № Варианта | Скорость нагрева на первой участке, К/мин | Скорость нагрева на третьей участке, К/мин | Температура подержка на второй участке, °С |
|------------|---|--|--|
| 1 | 2 | 4 | 80 |
| 2 | 2 | 5 | 80 |
| 3 | 3 | 3 | 98 |
| 4 | 3 | 4 | 98 |
| 5 | 3 | 5 | 98 |
| 6 | 4 | 2 | 102 |
| 7 | 4 | 3 | 102 |
| 8 | 4 | 4 | 102 |
| 9 | 4 | 5 | 102 |

Все приведенные в табл. 3 варианты технологических режимов были исследованы методом идеальной точки [19-22]. Наиболее приемлемой считается альтернатива, у которой расстояние от "идеальной точки"(ИТ) минимально:

$$R_{Ai} = \min \sqrt{\sum_{j=1}^N (x_{id,j} - x_{ij})^2} \quad (3)$$

где R_{Ai} - расстояние точки i -ой альтернативы от идеальной точки; N – количество критериев оценки альтернатив; $x_{id,j}$ – идеальное значение по j -му критерию для идеального варианта; x_{ij} – значение по j -му критерию для i -ой альтернативы.

В данной работе $N=3$; $i=8$.

Результаты моделирования градиента температуры на поверхности и в центре образца при разных скоростях нагрева и соответственные значения R_{Ai} показаны в таблице 4.

Таблица 4.

Результаты моделирования для допустимых альтернативных объектов и идеального объекта

| № | Критерии | | | R_{Ai} |
|----|--------------------------|----------------------------|--------------|----------|
| | $\Delta T_{\max I}$ (°С) | $\Delta T_{\max III}$ (°С) | τ (мин) | |
| 1 | 8,8 | 7,7 | 52,5 | 6,88 |
| 2 | 8,8 | 9,6 | 47,5 | 5,77 |
| 3 | 13,1 | 5,8 | 51,6 | 6,71 |
| 4 | 13,1 | 7,7 | 44,8 | 5,09 |
| 5 | 13,1 | 9,5 | 40,7 | 4,37 |
| 6 | 16,5 | 3,9 | 58,3 | 8,47 |
| 7 | 16,5 | 5,8 | 45,3 | 5,55 |
| 8 | 16,5 | 7,6 | 38,8 | 4,46 |
| 9 | 16,5 | 9,4 | 34,9 | 4,48 |
| ИТ | 8,8 | 5,8 | 34,9 | --- |

В результате получен минимальное значение R_{Ai} при $i=5$:

$$R_{A5} = 4,37$$

Т. е. оптимальным является нагрев со скоростью 3 °С/мин на 1-ой участке и 5°С/мин на 3-ей участке, и температура выдержки на 2-ой участке 98°С. В этом случае продолжительность процесса отверждения является наименьшей.

ВЫВОДЫ

Разработана методика определения теплоемкости и теплопроводности эпоксидных связующих в зависимости их фазового состояния (в жидком, гелеобразном и твердом состоянии).

Полученные результаты применимы ко всем типам терморезактивных связующих, отверждение которых проводят при повышенных температурах.

Проведено математическое моделирование процесса отверждения в зависимости от разных скоростей нагрева, выполнен расчет перепад температур и продолжительности процесса до гелеобразования. В результате проведенных расчетов установлено, что оптимальным является такой режим отверждения, при котором скорость повышения температуры на 1 участке составляет 3 °С/мин, а на 3-ей участке 5°С/мин. Найденные режимы отверждения позволили сократить суммарную продолжительность нагрева более чем на 20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баурова Н.И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016.
2. Баженов С.Л. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология / С.Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект». 2010. – 352 с.
3. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. – СПб.: Издательство «Научные основы и технологии», 2013. – 720 с.
4. Городецкий М.А. Типовые проблемы при выборе вспомогательных материалов для инфузионных технологий формования изделий из стеклопластиков / М.А. Городецкий, Е.С. Тепишкина, П.И. Чирва // Все материалы: энциклопедический справочник. 2017. – №4. – С. 60-65.
5. Малышева Г.В. Теоретические основы процессов формования изделий из стекло- и углепластиков // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). 2017. – №1 (1). – С.58-60.
6. Нелюб В.А. Обоснование технологических режимов многократной пропитки-сушки и последующей автоклавной обработки для обеспечения требуемого состава материала теплозащитного покрытия и минимального времени его изготовления / В.А. Нелюб, В.А. Тарасов, В.А. Романенков и др // Известия высших учебных заведений. М.: Машиностроение. 2017. – 12(693). – С.94-102.
7. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учебное пособие / под общ. ред.

Е.Н. Каблова. – М.; ВИАМ, 2017. – 472 с.

8. Baurova N.I., Sergeev A.Y. Structural studies of fracture patterns in adhesive joints after pullout testing // *Polymer Science – Series D*. 2014. 7(4). pp. 298-302.

9. Зуев А.В. Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических свойств / А.В. Зуев, Ю.В. Лощинин, Д.Я. Баринов, П.С. Мараховский // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. – №5. – С.575-595.

10. Neyub V.A. Method for assessing the chemical reaction between carbon fibre and epoxide binder // *Fibre Chemistry*. 2015. – 47(1). – P.40-42.

11. Nelyub V.A. A study of structure formation in a binder depending on the surface microrelief of carbon fiber / V.A. Nelyub, A.S. Borodulin, L.P. Kobets, G.V. Malysheva // *Polymer Science – Series D*. 2016. – 9(3). –P. 286-289.

12. Чэнь Я. Определение теплофизических свойств эпоксидных материалов в процессе их отверждения / Я. Чэнь, П.С. Мараховский, Г.В. Малышева // *Труды ВИАМ*. 2018. – №9. – С.21-26.

13. Baurova N.I. Manifestation of a synergistic effect in technological heredity / N.I. Baurova, V.A. Zorin, V.M. Prikhodko // *Polymer Science – Series D*. 2016. – 9(2). – P. 209-211.

14. Ammar M. Gelation and isoconversional kinetic analysis of synthesis of lignin–resorcinol–glyoxal resin curing / M. Ammar, R. Khiari, M.N. Belgacem et al. // *Iranian Polymer Journal*. 2015. – 24(11) – P. 919-925.

15. Núñez L. TTT cure diagram for an epoxy system diglycidyl ether of bisphenol A/1, 2 diamine cyclohexane/calcium carbonate filler / L. Núñez, F. Fraga, A. Castro et al. // *Polymer*, 2001. – 42(8). – P. 3581-3587.

16. Ramis X. Curing of a thermosetting powder coating by means of DMTA, TMA and DSC / X. Ramis, A. Cadenato, J.M. Morancho et al. // *Polymer*, 2003. – 44(7) – P. 2067-2079.

17. Маунг П.П. Обработка технологии изготовления рефлектора космической антенны / П.П. Маунг, Г.В. Малышева // *Все материалы. Энциклопедический справочник* 2017. – №5. – С.11-15.

18. Полежаев А.В. Исследование реакции конденсации фурфурола с ацетоном / А.В. Полежаев, И.В. Бессонов, В.А. Нелюб и др. // *Энциклопедия инженера-химика*. 2013. – №1. – С.36-43.

19. Полукеева А.В. Оптимизация состояния инновационной активности промышленного предприятия на основе метода «Идеальной точки» // *Экономинфо*, 2017. – № (1-2).

20. Лисецкий Ю.М. Композиционный метод формирования элементной базы корпоративной интегрированной информационной системы / Ю.М. Лисецкий, В.Е. Снитюк // *Математические машины и системы*, 2016. – №2.

21. Бойко А.П. Задача многокритериального выбора оптимального метода векторного квантования параметров линейного предсказания / А.П. Бойко, Д.А. Улахович // *Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета – СПб.: ЛЭТИ*, 2016. – № 3. –С. 10-14.

22. Вишнеков А.В. Расчет ценности альтернатив для метода «идеальной точки» в многокритериальных задачах принятия решения для ситуационных центров / А.В. Вишнеков, И.П. Карпова, Е.С. Ферапонтова // *Качество. Инновации. Образование*, 2010. – С. 56-60.

Optimization of Curing Mode of Epoxy Resin-based Composites

Chen Yangyang

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia
yangyangchen@mail.ru

Malysheva G.V.

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia
malyin@mail.ru

Abstract. Techniques for determining the thermophysical properties of epoxy binders depending on their curing process, i.e. when the phase state changes. The epoxy composition based on epoxy resin and modified aliphatic polyamine was used as an object of research. Experimental studies have been carried out to determine changes in the thermophysical properties of epoxy binders in the process of their hardening. The algorithm for determining the mode of curing thermosetting binders. Mathematical modeling of the curing process of the epoxy binder was carried out at different heating rates by the finite element method. The experimental data obtained were used as initial data for modeling. When using

the results of mathematical modeling, the kinetics of the curing process was optimized depending on different heating rates by the ideal point method. And it was found that the best option is the heating rate before gelation starts at 3K/min, the heating rate after gelation is 5 K / min, and the temperature of drying is 98 ° C.

Keywords: optimization of the curing process; curing kinetics; thermal properties of epoxy binders; modeling; polymeric composite material.

Многокритериальная оптимизация технологии нанесения металлических покрытий на углеродные ленты

Нелюб В.А.

МГТУ имени Н.Э. Баумана

Москва, Россия

admin@emtc.ru

Аннотация. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований деформационно-прочностных характеристик элементарных нитей с нанесенным на них металлическим покрытием. Приведены результаты оптимизации толщины металлического покрытия на углеродной ленте ЛУП. Оптимизацию проводили методом взаимных уступок. В качестве критериев оптимизации использовали следующие показатели: себестоимость, линейная плотность, деформация и адгезионная прочность в системе полимерная матрица-элементарная нить. Установлено, что при увеличении толщины металлического покрытия с 50 до 200 нм имеет место линейное увеличение всех показателей за исключением адгезионной прочности, величина которой имеет экстремальную зависимость. В результате проведенной оптимизации установлено, что наилучшие значения по всем критериям будут получены для покрытия из нержавеющей стали при толщине 100 нм. Приведены результаты использования металлизированных углеродных лент в качестве армирующего материала при ремонте поврежденных трубопроводов в зимний период.

Ключевые слова: оптимизация, металлизация, углеродная лента, углепластик.

ВВЕДЕНИЕ

При производстве деталей из полимерных композиционных материалов, широкое распространение получили углеродные ткани, ленты и волокна [1, 2]. По своим механическим характеристикам они существенно превышают все известные конструкционные материалы. Известно [3-5], что по величине удельной прочности и удельной жесткости, углеродные волокна в десятки раз превышают алюминиевые и титановые сплавы. Области применения углепластиков с каждым годом постоянно расширяются, что связано с комплексом их уникальных теплофизических свойств [6, 7]. Создание новой техники приводит к постоянному росту нагрузок, в том числе и тепловых, что требует совершенствования эксплуатационных характеристик существующих материалов [8, 9].

Для модификации свойств углеродных тканей используются самые различные технологии. Наибольшее распространение в промышленности получила технология нанесения на поверхность углеродных волокон и тканей аппретов [10-12]. Основное назначение аппретов это улучшения топологии поверхности армирующего наполнителя, что обеспечивает лучшее смачивание и растекание связующего, а также позволяет перераспределять напряжения на межфазной границе, что приводит к повышению механической прочности углепластиков. Однако, составы аппретов,

как правило, являются ноу-хау, что не позволяет оптимизировать выбор полимерной матрицы с учетом химической природы аппрета. Как следствие этого, достаточно часто теплоустойкость связующего существенно превышает теплоустойкость аппрета, что в итоге снижает все характеристики, в том числе и теплофизические свойства композиционного материала.

Еще одним методом, позволяющим регулировать в широких пределах свойства углепластиков, является технология металлизации углеродных тканей. Большой объем исследований по использованию метода магнетронного напыления для металлизации текстильных материалов выполнен учеными Ивановского государственного химико-технологического университета, в работах которых [13-15] приведены данные, показывающие влияние технологических режимов напыления (ток разряда, состав и давление плазмообразующего газа, материал подложки и др.) на эксплуатационные свойства текстильных материалов. Авторами работ [16, 17] получены покрытия из алюминия, титана, меди, серебра, нержавеющей стали, латуни, бронзы на поверхности текстильных материалов из природного и синтетического сырья. В работах [18-20] приведены данные по нанесению тонких металлических покрытий на технические текстильные материалы. В результате их обработки плазмой пониженного давления, получают материалы с более высокими механическими свойствами, например, прочность при межслоевом сдвиге таких композитов на 15-20% выше по сравнению с аналогичными без металлического покрытия.

Основной целью металлизации является изменение микроструктуры и физико-химических свойств поверхности углеродных наполнителей, что позволяет регулировать их реакционную способность, биосовместимость, теплофизические свойства и др. [21, 22]. Разработка углепластиков с комплексом новых функциональных свойств позволит существенно повысить конкурентноспособность изделий за счет повышения эффективности использования углепластиков, а также позволит повысить их долговечность.

Применяемые в научной практике термин «функциональные материалы» не имеют научно-обоснованного определения. Отсутствует методика их формализованного представления, что связано с недостаточным уровнем знаний о закономерностях придания известным материалам новых свойств, благодаря которым будут получены новые области их применения. Свойства металлизированных углеродных тканей и углепластиков на их основе исследуются экспериментальными методами, которые являются

трудоемкими и дорогостоящими. Создание адекватных математических моделей позволит существенно сократить путь от идеи до опытно-конструкторского образца.

Целью настоящей работы является разработка методики оптимизации толщины и типа металлического покрытия на углеродной ленте с целью создания углепластиков с функциональными свойствами.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований использовалась отечественная однонаправленная углеродная лента ЛУП, на которую методом магнетронного распыления наносили металлическое покрытие из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Перед нанесением металлического покрытия проводили плазмохимическую обработку углеродной ленты, что позволяло повысить прочность сцепления металла с углеродной лентой [20].

Для оценки толщины напыляемого покрытия, одновременно с углеродной лентой, в установке магнетронного распыления обрабатывали подложки из полированного кремния, размером 20x20 мм. Толщину слоя металла оценивали на атомно-силовом микроскопе марки SOLVER 47PRO. На кремниевую пластинку наносили полосу фоторезистора шириной 1 мм. После нанесения металлического покрытия фоторезистор удаляли путем растворения и по образовавшейся ступеньке на границе металл-кремний с хорошей точностью (несколько нм) оценивали толщину металлического слоя.

Для проведения механических испытаний углеродную ленту разделяли на элементарные нити, испытания которых проводили на разрывной машине фирмы Textechno марки Favimat+. Особенностью данного оборудования являлась его высокая точность и возможность, наряду с величиной разрушающего напряжения при растяжении и деформации, определять величину линейной плотности.

Величину адгезионной прочности оценивали методом pull-out. Изготовление образцов проводилось на установке Fimabond, производства фирмы Textechno с использованием специальных тиглей, наружный диаметр которых составлял 4 мм. Точность погружения элементарной нити в связующее контролировалась с помощью трех камер, которыми оснащена установка Fimabond. После погружения элементарной нити в связующее на глубину 2 мм, на этой же установке проводили процесс отверждения. Используемое оборудование отличалось очень высокой точностью и позволяло фиксировать в специальных прецизионных приспособлениях элементарную нить, диаметром от 1 до 10 мкм. Нагружение проводили при скорости движения захватов 0,1 мм/мин.

В качестве связующего использовался импортный состав, состоящий из эпоксидной смолы и аминного отвердителя.

Модель элементарной нити строили в программе Siemens NX, все расчеты проводили в программном комплексе NX/Nastran. При построении геометрической модели принимали, что диаметр элементарной нити равен 6 мкм, ее длину варьировали от 10 до 100 мкм. К модели прикладывали нагрузку 200-5000 сН в виде распределенной растягивающей силы. С противоположной стороны образца использовалась заделка. При проведении моделиро-

вания напряженно-деформированного состояния элементарной нити с металлическим покрытием в работе использован метод решения обратных задач, при котором определялись значения перемещений при известной величине разрушающей нагрузки, величину которой находили экспериментально.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки адекватности созданных расчетных моделей в работе первоначально проводилось сравнение теоретических и экспериментальных данных. При проведении экспериментальных исследований определяли величину максимальной деформации, при которой происходит разрушение элементарной нити. При проведении теоретических – оценивали величину перемещений.

В результате проведенных исследований установлено, что величина деформации элементарной нити без металлического покрытия составляет 0,78%. Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными менее 0,5%, что подтверждает высокую точность созданной модели. Теоретически найденное значение деформации элементарной нити с покрытием из нержавеющей стали, толщиной 50 нм составляет 0,67%, тогда как экспериментальное – 0,73%. Аналогичным образом изменяются значения деформаций при дальнейшем увеличении толщины покрытий. Характер полученных теоретических зависимостей соответствует общим закономерностям, полученным в результате экспериментальных исследований, однако по своим количественным оценкам они различаются, что, вероятно, связано с большим разбросом толщин, нанесенных металлических покрытий.

Значения толщин металлических покрытий определялось тремя способами:

- по разности диаметров, измерение которых проводилось непосредственно на установке Favimat+;
- с помощью атомно-силового микроскопа при нанесении соответствующих покрытий на пластину из кремния;
- с помощью атомно-силового микроскопа путем непосредственного измерения топологии поверхности элементарных нитей.

Полученные результаты, приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Толщина металлического покрытия | |
|--------------------------------------|----------------------|
| Используемое оборудование | Толщина покрытия, нм |
| На установке Favimat+ | 80 |
| На пластине из кремния | 87 |
| Непосредственно на элементарной нити | 60 |

В результате проведенных исследований установлено, что покрытие из нержавеющей стали приводит к увеличению среднего диаметра элементарной нити с 5950 нм (для исходной нити) до 6010 нм – для покрытий из нержавеющей стали. По значениям изменения диаметра до и после нанесения покрытий определяем его толщину.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, используемые для оптимизации толщины металлического покрытия, приведены в табл. 2.

Значение себестоимости нанесения металлических покрытий указано при использовании опытно-промышленной установки магнетронного распыления ММР-1800М, оснащенной 4 магнетронами с объемом вакуумной камеры 15 м³.

Таблица 2

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, используемые при оптимизации

| Толщина покрытия, нм | Критерии | Значение |
|----------------------|----------------------------------|----------|
| 10 | Максимальные перемещения, мм | 0,246 |
| 50 | | 0,231 |
| 100 | | 0,21 |
| 150 | | 0,1935 |
| 200 | | 0,177 |
| 10 | Плотность, текс·10 ⁻⁵ | 4,86 |
| 50 | | 5,7 |
| 100 | | 6,5 |
| 150 | | 7,2 |
| 200 | | 8 |
| 10 | Адгезионная прочность, МПа | 90 |
| 50 | | 110 |
| 100 | | 120 |
| 150 | | 100 |
| 200 | | 85 |
| 10 | Себестоимость руб/м ² | 190 |
| 50 | | 230 |
| 100 | | 270 |
| 150 | | 310 |
| 200 | | 350 |

Анализ полученных результатов показал, что величина адгезионной прочности без металлического покрытия составляет 85 МПа. При использовании углеродной ленты с покрытием толщиной 100 нм, величина адгезионной прочности увеличивается практически на 30% (до 120 МПа). Значения перемещений при повышении толщины металлического покрытия, снижаются а величина плотности, наоборот, повышается.

Оптимизацию толщины металлического покрытия на углеродной ленте проводили методом взаимных уступок. При использовании данного метода первоначально применяли первый по значимости критерием и определяли его экстремальное значение. Для выбранного критерия назначали величину его допустимого отклонения («уступка»). В соответствии с используемой «уступкой» задача решается еще раз, но при использовании второго (по значимости) критерия при условии, что отклонение первого критерия от его оптимального значения не будет превосходить величину «уступки». Далее назначается «уступка» для второго критерия и задача решается с третьим критерием и т.д.

Выделим критерии для которых оптимальными являются их минимальные значения, это перемещения, плотность и себестоимость и критерии, для которых оптимальными будут наибольшие величины, это адгезионная прочность. За величину уступки по каждому из используемых критерием примем величину $\delta=10\%$.

Расположим критерии в порядке возрастания их значи-

мости: перемещения; плотность; себестоимость и адгезионная прочность. Таким образом, величина адгезионной прочности принята в качестве главного критерия. Все остальные критерии являются вспомогательными.

Исходя из выбранной уступки, равной 10% от наилучшего значения данного критерия, определяем величину перемещений:

$$f_1(x) = 0,177 + \frac{\delta}{100} = 0,19$$

Найденная величина перемещений будет являться ограничением для следующих критериев. С учетом данных табл. 2 определяем оптимальную толщину металлического покрытия по использованному критерию.

$$f_1(x) \leq 0,19, \text{ т.е. } x_{\text{опт}} \geq 150$$

Минимальное значение плотности, при таком ограничении, равно 7,2 и многократно превосходит проигрыш по главному критерию, что доказывает правомочность выбранной уступки. Выигрыш по себестоимости также превосходит проигрыш по перемещению во много раз. Поскольку направленность критериев себестоимости и линейной плотности одинаковые, то нет необходимости выбирать уступку по критерию себестоимости. С учетом уступки, величина адгезионной прочности будет равна 100 МПа, что является проигрышем относительно максимального его значения 120 МПа при толщине 100 нм. Однако если рассматривать адгезионную прочность в качестве главного критерия и выбрать его оптимальное значение 120 МПа, то проигрыш по критерию перемещения составит 16%. При такой уступке значение перемещения будет равно 0,21, что хуже первоначального значения перемещения (0,177) в 0,8 раз. Поскольку этот коэффициент меньше 1, то потери от такой уступки по главному критерию не велики и можно увеличить уступку до 16%.

При такой уступке будет иметь место следующее ограничение:

$$f_1(x) \leq 0,19; x_{\text{опт}} \geq 100.$$

При таком ограничении значение линейной плотности будет равно 6,5. Выигрыш по линейной плотности будет в 45 раз превышать проигрыш по перемещению. Значение себестоимости будет равно 270, а выигрыш по себестоимости также во много раз превосходит проигрыш по перемещению. Таким образом, в результате проведенных расчетов установлено, что оптимальные характеристики по всем критериям (перемещение, плотность, себестоимость и адгезионная прочность) будут при толщине покрытия 100 нм.

Углеродная лента, с нанесенным покрытием из нержавеющей стали была использована в настоящей работе в качестве армирующего материала для ремонта трубопровода [21, 22]. Отличительной особенностью используемой технологии являлось выполнение всех технологических операций непосредственно на улице при минусовой температуре, в том числе и проведение процесса отверждения. Для каждой трубы изготавливали два банджа: из обычной углеродной ленты и из металлизированной. В качестве объекта исследований использовали фрагменты трубы из нержавеющей стали диаметром 25 мм. Длина фрагментов трубы, используемой в качестве образца, составляла 150 мм. На всех образцах с помощью дисковой фрезы были получены сквозные трещины, шириной 5 мм и длиной 50 мм.

Качество проведенного ремонта оценивали визуально, путем осмотра и обнаружения (или отсутствия) утечек: через каждую из отремонтированных труб с помощью переходников подавали холодную воду под давлением 0,1 МПа и если в течение 10 мин утечки воды не происходило, то вместо холодной воды подавали горячую с температурой +50 °С. Полученные результаты приведены в табл. 3. Для сравнения, наряду с покрытием из нержавеющей стали, было использовано покрытие из титана.

Таблица 3

Результаты испытаний на герметичность элементов трубопроводов

| Материал | Результаты испытаний |
|--|---|
| Углеродная лента без металлизации | Утечка при подаче холодной воды через 1,5 мин |
| Углеродная лента с покрытием из нержавеющей стали, толщиной 100 нм | Утечек нет |
| Углеродная лента с покрытием из нержавеющей стали, толщиной 10 нм | Утечка при подаче холодной воды через 3,5 мин |
| Углеродная лента с покрытием из титана, толщиной 100 нм | Утечек нет |
| Углеродная лента с покрытием из титана, толщиной 10 нм | Утечка при подаче холодной воды через 3,2 мин |

Анализ результатов, приведенных в табл. 3 показал, что при использовании металлизированной углеродной ленты позволяет обеспечить герметичность конструкции в условиях ее изготовления при отрицательных значениях температуры окружающей среды. Анализ труб после проведения испытаний на герметичность показал, что при уменьшении толщины металлического покрытия имеет место снижение герметичности.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено, что металлизация углеродной ленты позволяет существенно изменить характеристики углепластиков, в том числе и придать им функциональные свойства.

Анализ полученных результатов показал, что величина адгезионной прочности без металлического покрытия составляет 85 МПа. При использовании углеродной ленты с покрытием толщиной 100 нм, величина адгезионной прочности увеличивается практически на 30% (до 120 МПа). Значения перемещений при повышении толщины металлического покрытия, снижаются а величина плотности, наоборот, повышается.

Оптимальное значение толщин, определенное методов взаимных уступок, по критериям минимальной себестоимости, плотности и значениям перемещений и максимальной адгезионной прочности, составляет 100 нм.

С использованием углеродной ленты с металлическим покрытием из нержавеющей стали проведено изготовление

бандажей для ремонта поврежденных трубопроводов в условиях их изготовления в зимний период времени. Установлено, что металлизация позволяет обеспечить герметичность соединения.

Результаты настоящей работы получены в рамках проекта по теме «Научные исследования по разработке композиционных материалов со структурой управляемого хаоса и их применение в высокотехнологичном производстве» по заданию № 11.7291.2017/БЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. – СПб.: Издательство «Научные основы и технологии», 2013. – 720 с.
2. Баженов, С.Л. Полимерные композиционные материалы / С.Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 352 с.
3. Левит Р.М. Электропроводящие химические волокна. – М.: Химия, 1986. – 200 с.
4. Баурова Н.И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб.пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – 264 с.
5. Малышева Г.В. Теоретические основы процессов формования изделий из стекло- и углепластиков // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). 2017. – №1 (1). – С.58-60.
6. Баурова Н.И. Технологическая наследственность при производстве деталей машин из полимерных композиционных материалов: монография / Баурова Н.И., Зорин В.А.. – М.: МАДИ. 2018. – 220 с.
7. Композиционные материалы: справочник / под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
8. Скороход В.В. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: в 3-х т. – Т. 2. Передовые технологии производства / В.В. Скороход, Н.А. Никифоров, С.В. Резник и др. /под ред. С. В. Резника.– М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 296 с.
9. Мэттьюс Ф. Композитные материалы / Ф. Мэттьюс, Р. Ролингс. – М.: Техносфера. – 2004. – 408 с.
10. Бейдер Э.Я. Аппретирование углеродных волокон – наполнителей термопластичных карбопластиков / Э.Я. Бейдер, Г.Н. Петрова, М.И. Дыкун // Труды ВИАМ (Электронный журнал). 2014. – № 10.
11. Горбаткина Ю. А. О некоторых параметрах, определяющих прочность границы раздела в системах полимер-волокно // Клеи. Герметики. Технологии.– 2008.– № 10.– С. 17–19.
12. Горберг Б.Л., Иванов А.А., Мамонтов О.В., Стегин В.А. Способ модификации поверхности текстильного материала // Патент на изобретение № 2398045 от 27.08.2010.
13. Горберг Б.Л., Иванов А.А., Мамонтов О.В., Стегин В.А. Способ изготовления антимикробного текстильного материала // Патент на изобретение № 2426559 от 31.05.2010

14. Горберг Б.Л., Белова И.Ю., Веселов В.В., Иванов А.А., Мамонтов О.В., Стегнин В.А. Многослойный теплоизолирующий материал // Патент на изобретение № 2415622 11.05.2010

15. Гайнутдинов Р.Ф. К вопросу применения низкотемпературной плазмы для обработки текстильных материалов / Р.Ф. Гайнутдинов, А.Ф. Гайсин // Вестник Казанского технологического университета. 2017. – Т. 20., № 2. – С. 72-73.

16. Гаппаров Х.Г. Виды и способы металлизации текстильных материалов для пошива специальной одежды / Х.Г. Гаппаров, Я.Я. Хомидов, Г.К. Файзиева // Молодой ученый. 2016. – № 11 (115). – С. 310-313.

17. Бесшапошникова В.И. Разработка многослойного электропроводящего текстильного материала / В.И. Бесшапошникова, И.Н. Жагрина, Л.А. Липатова, Е.Д. Змеева // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. – № 1 (367). – С. 83-88.

18. Берлин Е.В. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. / Е.В. Берлин, Л.А. Сейдман – М.: Техносфера, 2010. – 528с.

19. Берлин Е.В. и Сейдман Л.А. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением. М.: Техносфера. 2014. – 256 с.

20. Нелюб В.А. Технология металлизации углеродных тканей и свойства углепластиков на их основе // Технология металлов. 2018. – №3. – С.7-10.

21. Нелюб В.А., Коноплин А.Ю. Материалы и технологии, эффективные в условиях Арктики при проведении ремонтных работ // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. – №6. – С.25-28.

22. Нелюб В.А. Прочность клеевых соединений, изготовленных при отрицательных значениях температур / В.А. Нелюб, А.Ю. Коноплин // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. – №9. – С.20-23.

Multi-criteria Optimization of the Technology of Applying Metallic Coatings on Carbon Tapes

Nelyub Vladimir

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

yangyangchen@mail.ru

Abstract. The results of theoretical and experimental studies of the deformation-strength characteristics of the filaments coated with a metal coating are given. The technique is shown and the results of optimization of the thickness and material of the metal coating on the carbon fiber tape LUP are given. Optimization was performed by the method of mutual concessions. The following indicators were used as optimization criteria: cost, linear density, deformation, and adhesion strength in the system polymer matrix-filament. It was found that with an increase in the thickness of the metallic coating from 50 to 200 nm, there is a linear in

crease in all parameters except for adhesive strength, the magnitude of which has an extreme dependence. As a result of the optimization performed, it was found that the best values for all The criteria will be obtained for a stainless steel coating at a thickness of 100 nm.

Keywords: optimization, metallization, carbon tape, carbon fiber.

Лицевой керамический кирпич мягкой формовки на основе опоковидного сырья

Божко Ю.А., Лапунова К.А.

Донской государственный технический университет
Ростов-на-Дону, Россия
ovdun_urs@mail.ru, keramik_kira@mail.ru

Постой Л.В.

Волгодонский инженерно-технический институт
филиал национального исследовательского ядерного
университета МИФИ
Волгодонск, Россия
LVPostoj@mephi.ru

Аннотация. Данная статья отражает результаты комплекса исследований по получению лицевого керамического кирпича мягкой формовки с поиском сырья и разработке оптимальной технологии производства. Предложены и сформулированы основные требования к опоковидным породам для производства различных видов изделий стеновой керамики. Они включают в себя рекомендации по химическому составу и таким физико-механическим и технологическим свойствам как плотность в куске, естественная влажность, пористость, минеральный состав, предел прочности при сжатии обожженных образцов, огневая усадка, водопоглощение, средняя плотность и др. В качестве технологии производства нами предложено так называемое «мягкое формование». В его основе лежит принцип заполнения индивидуальных форм керамической массой с определенной пластичностью и связующей способностью. Внешний вид такого кирпича отличается отсутствием ровных граней и сторон и закругленностью углов. Используемый песок для просыпания форм придает особый эффект бархатистости и состаренности кирпичу. На основе результатов лабораторно-технологических исследований и заводских испытаний сделаны выводы о больших перспективах использования опоковидных пород в качестве сырья для производства лицевого керамического кирпича мягкого формования.

Ключевые слова: лицевой кирпич, опоковидные породы, мягкое формование, керамическая масса, влажность, степень измельчения, температура обжига.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос поиска качественного сырья для производства тех или иных видов строительной керамики довольно остро стоит последние десятилетия. Основное керамическое сырье – глинистые породы, отличаются неравномерностью состава и малой мощностью залегания, что приводит к постоянным корректировкам состава шихты, необходимости ввода специальных добавок и, соответственно, изменениям технологических параметров производства [1]. Немаловажным фактором является цвет лицевых изделий. Современные тенденции диктуют моду на лицевой кирпич светлых оттенков: белый, желтый, бежевый, кремевый и их оттенки. Получение таких цветов возможно только из светложущихся пород.

АКТУАЛЬНОСТЬ ВОПРОСА

Месторождения суглинков, как правило, занимают площади пахотных земель, что существенно затрудняет перевод этих земель из сельскохозяйственного в промышленное пользование и в долгосрочной перспективе не рационально. В связи с этим, расширение сырьевой базы керамической промышленности является актуальным вопросом

для производства стеновых изделий. В качестве альтернативного источника сырья нами предложено использование опоковидных пород, которые широко распространены не только на юге России, но и в Поволжье, на Кавказе, центральной части страны, на Урале, в Ленинградской области и многих других регионах. Они не использовались ранее при производстве стеновой керамики в силу малой изученности своих свойств. На сегодняшний день разведаны крупные месторождения опок и опоковидных пород, составлена карта их залегания, определены их основные литологические разновидности, предложена классификация в качестве сырья для производства керамических изделий [1-3].

Основной целью проведения комплекса исследований является разработка наиболее оптимальной технологии производства исходя из особенностей керамических свойств опоковидного сырья. Также необходимо определить критерии оценки и методики испытаний сырья, оценить необходимость ввода корректирующих добавок и экономическую эффективность предлагаемых разработок в этом направлении [4].

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения керамических свойств опоковидных пород был проведен комплекс широкомасштабных лабораторно-технологических исследований. Установлено, что из каждой отдельной литологической разновидности опоковидных пород возможно производство материалов и изделий с огромным диапазоном свойств в зависимости от некоторых технологических аспектов – степени измельчения исходного сырья, влажности керамической массы, температуры обжига и времени выдержки при максимальной температуре. В некоторой степени, вышеперечисленные факторы являются взаимозависимыми. Например, при снижении температуры обжига для сохранения прочности изделий достаточно увеличить степень измельчения сырья. Также при увеличении степени уплотнения сырца достаточно снизить температуру обжига, и прочность изделий не изменится. Данные особенности опоковидных пород являются значимыми факторами в условиях производства широкой номенклатуры изделий [5].

Для проведения лабораторных исследований были отобраны пробы 10 месторождений опоковидных пород юга России. Масса каждой пробы составляла более 500 кг и не имела остатков растений и почвы. Пробы опок высушивали в закрытом помещении до воздушно-сухого состояния, а затем измельчали на щековой и молотковой дробилках до

необходимого зернового состава. Отобранные пробы опоквидных пород были изучены на предмет определения вещественного состава, изучения дообжиговых и обжиговых свойств, а также проводились наблюдения за структурными и фазовыми превращениями при воздействии высоких температур [6-7].

Для полной результативности проведенных лабораторных исследований, необходимо было провести опытно-промышленные испытания. Полученные изделия позволили оценить такие важные технико-эксплуатационные характеристики, как прочность на сжатие и изгиб, морозостойкость, водопоглощение и некоторые другие.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изучив имеющиеся нормативные документы, касающиеся требований к сырью для производства керамических изделий, мы выяснили, что к опоквидным породам определенных требований не предъявляется. В рекомендациях по применению запасов месторождений и прогнозных ресурсов кремниевых пород говорится, что легковесный кирпич может производиться на основе опок и опоквидных пород, которые содержат более 30% опаловой составляющей, более 20% глинистой составляющей, менее 25% песчаных компонентов и не менее 10% карбонатов. Также, суммарное содержание SiO_2 должно быть не более 85%, CaO – не более 7%, а содержание глинозема варьируется от 3 до 15%. При этом объемная масса должна быть 0,9-1,2 г/см³. Мы считаем, что эти данные не вполне корректны и не отвечают современным требованиям. Важным отличительным признаком опоквидных пород от трепелов является их объемная масса, которая составляет 1,1-1,8 г/см³. Если даже учитывать лишь один этот фактор, то можно сделать вывод, что опоки и опоквидные породы не отвечают требованиям нормативных документов. Однако, ГОСТ 648-73 уже отменен и понятие легковесный кирпич не применяется [8].

Проведенные ранее исследования позволяют нам сделать вывод о пригодности большей части литологических разновидностей опок и опоквидных пород в качестве сырья для производства стеновых керамических изделий [9]. Их применение оправдано как в чистом виде, так и в комплексе с корректирующими добавками. По качеству полученных изделий можно определить пригодность сырья и возможность получения стеновых материалов с заданными техническими и эксплуатационными характеристиками.

Нами разработаны и сформулированы главные требования, которые рекомендуется выполнять при оценке качества опоквидных пород в качестве основы для производства керамических изделий. Они приведены ниже.

1. Химический состав должен быть следующий:

- количество диоксида кремния (SiO_2) должно быть не более 85%, а свободного кварца менее 25%;
- суммарное содержание оксидов алюминия и титана ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$) – не менее 5%;
- суммарное содержание оксидов кальция (CaO) и магния (MgO) – не более 15%;
- сумма соединений серы в пересчете на SiO_3 не более 1%, в том числе сульфидной серы не более 0,3%;
- сумма оксидов железа ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) – не более 10%;
- сумма оксидов калия и натрия ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) – не 2-6%.

2. Важно определить такие технологические свойства опоквидных пород как плотность в куске, естественная влажность, пористость, минеральный состав, предел прочности при сжатии образцов, огневая усадка, водопоглощение, плотность и прочность обожженных образцов. При этом, фракционный состав не должен превышать наибольшую крупность зерен 2,5 мм, а количество фракции 1 мм должно составлять не менее 70%. При этом:

- естественная влажность, которая определяется по результатам испытаний отобранных проб, не регламентируется;
- предел прочности при сжатии образцов, отформованных при оптимальных параметрах, должен достигать не менее 1,5МПа;
- огневая усадка, которую характеризует уменьшение линейных размеров образцов, должна быть не более 7%;
- водопоглощение обожженных образцов должно быть в пределах от 6 до 28%;
- среднюю плотность не регламентируют.

Окончательную оценку всем видам опоквидного сырья можно дать лишь при проведении заводских испытаний. Кроме того, необходимо ориентироваться на кирпич со сквозными пустотами, прочность которого изначально меньше. Максимальная температура обжига опоквидного сырья может доходить до 1100 °С, в зависимости от состава исходного сырья [2-3, 10-11].

Естественно, данные требования носят рекомендательный характер и требуют детального обсуждения узкими специалистами керамической отрасли, а также геологами.

Так как опоквидные породы имеют оттенки от серого до желтого, то лицевой кирпич на их основе получается также светлых тонов, что очень востребовано на рынке. Также растущей популярностью в России пользуется кирпич с эффектом состаренности временем. По сути, его внешний вид напоминает старинный кирпич, произведенный вручную. За рубежом такая технология называется «soft-mud», что дословно переводится как жидкая грязь. У нас в России нет закрепленной терминологии для данного способа производства, поэтому используют термины «ручное формование» или «мягкое формование». В основе данного метода производства лежит работа с пластичными глинами, влажность которых колеблется от 25 до 35%. Технические параметры таких кирпичей отличаются от тех, что произведены методом экструзии. Например, морозостойкость гораздо выше, что позволяет им лучше переносить суровый российский климат. Внешний вид кирпичей мягкой формовки отличается закругленностью углов, отсутствием ровных граней и сторон. Также, за счет просыпания форм песком (для предотвращения прилипания к форме), поверхность обретает бархатистость, складки и углубления произвольной формы [12].

Флагманами в производстве оборудования для технологических линий мягкого формования является нидерландская компания De Voer. Они производят полный цикл оборудования различных мощностей [13].

Принцип технологии мягкого формования заключается в наполнении индивидуальных форм керамической массой с определенной пластичностью. Нужная консистенция достигается за счет применения различных видов дробилок, мельниц, терки глины и нескольких смесителей, которые

представляют собой большие чаны с медленно вращающейся горизонтальной осью. На ней находится выдавливатель и так называемые грабли, которые срезают глину и проходят через водяную массу. Выдавливатель давит на конце смесителя мягкую массу глины через автоматически закрываемое отверстие в боковой стороне смесителя. По транспортирующей ленте керамическая масса поставляется на установку формовки. Затем в пресс-котле происходит последняя гомогенизация, после которой при давлении 1-1,5 бара прессуются формовочные кирпичи. Небольшое количество песка необходимо для обсыпания пресс-форм тонким слоем. При этом песок может быть разным по цвету и размеру частиц, что во многом определяет эстетические характеристики. Песок для обсыпания может храниться как в помещении, так и на улице под навесом, в зависимости от климатических условий. Склад сырья должен хорошо проветриваться, чтобы опокovidные породы достаточно быстро подсушивались. Необходимо предусмотреть перевалку сырья. В летнее время запасы сырья не должны быть меньше, чем на 10 дней работы завода, а в зимнее время – до 3 месяцев [14].

Формовочные ленточные прессы, произведенные компанией De Voeg, могут комбинироваться с различными элементами в зависимости от производимой продукции.

1. Для кирпича различных видов добавляется буфер прессы со стоящими осями с прямым приводом, пресс-блок с гидравлическим приводом для оптимального движения по временным параметрам



Рис. 1. Ленточный пресс De Voeg с буфером прессы

2. Для имитации состаренного кирпича к имеющейся установке подключается бросающее устройство, которое наполняет формы, а затем пресс-блок надавливает на них. При этом обеспечивается минимальная рециркуляция песка и формовочной массы (рис. 2).



Рис. 2. Ленточный пресс De Voeg с системой ручной формовки

3. Для получения лицевого кирпича с эффектом водных капель (Waterstruck) подключается специальное устройство на уже имеющуюся установку. С его помощью можно получать фактурные лицевые кирпичи без обсыпания песком. Отличается высокой производительностью (рис. 3).



Рис. 3. Ленточный пресс De Voeg с оборудованием Waterstruck

4. Для максимальной имитации состаренности кирпича применяются устройства Hubert, которые бросают шар глины в форму (рис. 4). Также в керамическую массу можно добавлять различные виды песка по зерновому составу и цвету. Количество и размеры выпускаемого кирпича легко корректируются [13].



Рис. 4. Ленточный пресс De Voeg с бросающим устройством Hubert

Процесс сушки и обжига схож с аналогичным процессом при формировании изделий ленточным прессом. Из-за ограниченной жесткости влажного сырца он не может сушиться на лотках. Для этого необходимо использовать стальные плиты или деревянные доски, на которые отформованный кирпич кладут на пастель. Данные конструкции изготовлены из нержавеющей стали и цветных металлов. В зависимости от сушильной камеры, процесс может занимать от 24 до 48 часов [14-16].

Следующим этапом является обжиг сырца. Он представляет собой процесс обработки при высоких температурах, при котором происходит превращение в камневидное тело, противостоящее механическим, физическим и химическим воздействиям. При постепенном нагревании при определенных температурах происходит ряд сложных физико-химических преобразований, в том числе переход опала в кристобалит. Для обжига применяют, как правило, туннельные или кольцевые печи. Туннельные имеют прямой полуциркулярный канал, по которому изделия на вагонетках движутся навстречу теплоносителю, преодолевая стационарные зоны обжига. Печь условно поделена на несколько зон: зона подогрева с температурой 50-800 °С, зона обжига 800-1050 °С и зона охлаждения до температуры 50 °С. Разгрузка готовых изделий происходит уже за пределами канала печи.

На этапе обжига необходимо четкое исполнение выбранного режима тепловой обработки, состоящего из следующих этапов: досушка (до 200 °С), подогрев (200-800 °С), взвар (от 800 °С до максимальной температуры) и охлаждение (до 50 °С).

Как показали проведенные нами испытания, наиболее пригодными для производства лицевого керамического кирпича мягкой формовки являются глинисто-карбонатные опоки. Однако при корректировке состава и вводе добавок пригодными являются почти все опоковидные породы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные нами лабораторно-технологические исследования и полужавовские испытания, а также имеющийся производственный опыт подтвердили, что опоковидные породы являются перспективным сырьем для лицевого керамического кирпича мягкой формовки. Также установлено, что в зависимости от каждого конкретного месторождения опоковидных пород необходимо корректировать технологические параметры производства для выпуска лицевого кирпича. Практически невозможно с первого раза получить качественные опытные образцы кирпича, необходимо проведение трех этапов полужавовских испытаний с предварительными лабораторными исследованиями [3, 17-18].

Установлено, что к основным параметрам технологического процесса относят влажность керамической массы, давление формования, степень измельчения сырья и время выдержки при максимальной температуре обжига.

Данные проведенных исследований имеют практическое значение для отрасли стеновой керамики. В силу широкой распространенности опоковидных пород во многих

регионах нашей страны, их использование для производства керамического кирпича с применением ресурсосберегающих технологий будет экономически выгодно и технологически обосновано как на новых заводах, так и на действующих [19-20].

Предложенная технология мягкого формования является наиболее оптимальным методом производства лицевого кирпича с эффектом состаренности временем на основе опоковидных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котляр В.Д. Опоки – перспективное сырье для стеновой керамики / В.Д. Котляр, Б.В. Талпа // Строительные материалы. – 2007. – № 2. – С. 31–33.
2. Котляр В.Д. Классификация кремнистых опоковидных пород как сырья для производства стеновой керамики / В.Д. Котляр // Строительные материалы. – 2009. – № 3. – С. 36–39.
3. Котляр В.Д. Вещественный состав и дообжиговые керамические свойства глинистых опок / В.Д. Котляр, Д.И. Братский, А.В. Устинов // Инженерный вестник Дона. Электронный журнал (<http://www.ivdon.ru>) – 2010. – № 4.
4. Котляр В.Д. Перспективы развития производства керамического кирпича полусухого прессования / В.Д. Котляр, Ю.В. Терехина, Ю.И. Небежко // Строительные материалы. – 2011. – № 2. – С. 6-7.
5. Божко Ю.А. Роль кирпича в современной архитектуре / Ю.А. Божко, К.А. Лапунова // Строительство и архитектура – 2015: материалы Междунар. науч.-практ. конф./ РГСУ. – Ростов н/Д, 2015. – С. 288-290.
6. Ашмарин Г.Д. Обоснование эффективности компрессионного формования керамических строительных материалов / Г.Д. Ашмарин, В.В. Курносков, С.Е. Беляев, В.Г. Ласточкин // Строительные материалы. – 2011. – № 2. – С. 8-9.
7. Котляр В.Д. Особенности физико-химических преобразований при обжиге опоковидного сырья / В.Д. Котляр, К.А. Лапунова // Строительные материалы. – 2016. – № 5. – С. 40-42.
8. Божко Ю.А. Особенности процесса прессования порошков на основе опоковидного сырья / Ю.А. Божко, К.А. Лапунова // Вестник Кыргызско-Славянского университета. – 2018. – №4. – С. 85-88.
9. Deplazes A. Constructing architecture: materials, processes, structures // Publishers for Architecture. – 2005. – P. 508.
10. Ашмарин Г.Д. Производство керамических стеновых изделий методом полусухого прессования. Аналитический обзор. – М.: ВНИИ НТИиЭПСМ, 1990. – 58 с.
11. Котляр В.Д. Прессуемость порошкообразных масс на основе опок // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №3. – С. 54-56.
12. Божко Ю.А. Особенности спекаемости опоковидных пород при производстве изделий стеновой керамики / Ю.А. Божко, К.А. Лапунова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – №1. – С. 65-73.

13. <http://www.deboermachines.nl> (дата обращения 18.11.2018).

14. Fernandez J. Material Architecture: Emergent materials for innovative buildings and ecological construction. – Architectural Press. – 2006. P. 332.

15. Козлов А.В. Перспективы использования кремнистых опоковидных пород для производства клинкерного кирпича низкотемпературного спекания / А.В. Козлов, О.И. Животков, К.А. Лапунова // Строительные материалы. – 2018. – №4. – С. 13-16.

16. Котляр В.Д. Методика испытания камневидного сырья для производства стеновых керамических изделий компрессионного формования / В.Д. Котляр, Ю.В. Терехина, А.В. Котляр // Строительные материалы. – 2014. – № 2. – С. 24-27.

17. Божко Ю.А. The pressing process of powders on the basis of siliceous opoka-like rocks / Ю.А. Божко, К.А. Лапунова, Г.А. Козлов // Materials and Technologies in Construction and Architecture. – Switzerland. – 2018. – С. 515-519.

18. Лапунова К.А. облицовочного кирпича мягкой формовки в современной архитектуре / К.А. Лапунова, Ю.А. Божко // Дизайн. Материалы. Технология. – 2018. – №1. – С. 61-65.

19. Котляр В.Д. Изделия стеновой керамики на основе опок и угольных шламов / В.Д. Котляр, Г.А. Козлов, К.А. Лапунова // Procedia Engineering. – 2016. – №150. – С. 1452-1458.

20. Барабанщиков Ю.Г. Строительные материалы и изделия / Ю.Г. Барабанщиков // М.: Издательский центр «Академия». – 2008. – С. 107-108.

Ceramic Brick Front Soft Molding on the Basis of Opoka-like Raw Materials

Bozhko Yu.A., Lapunova K.A.

Don state technical University
Rostov-on-Don, Russia
ovdun_yrs@mail.ru, keramik_kira@mail.ru

Postoy L.V.

Volgodonsk Engineering and Technology Institute MEPhI
Volgodonsk, Russia
LVPostoj@mephi.ru

Abstract. This article reflects the results of a set of studies to obtain a facial ceramic bricks of soft molding with the search for raw materials and the development of optimal production technology. Proposed and formulated the basic requirements for opoka-like rocks for the production of various types of products ceramic wall. They include recommendations on chemical composition and such physical-mechanical and technological properties as the density in the piece, natural moisture content, porosity, mineral composition, the limit of compressive strength of annealed samples, firing shrinkage, water absorption, average density, etc. as the production technologies we have proposed the so-called "soft-mud". It is based on the principle of filling individual forms of ceramic

mass with a certain plasticity and binding capacity. The appearance of this brick is characterized by the absence of smooth faces and sides and rounded corners. Used sand for spilling forms gives a special effect of velvety and aging brick. Based on the results of laboratory and technological research and production tests the conclusions about the great prospects of the use of opoka-like rocks as raw material for production of ceramic facing brick soft molding.

Keywords: face brick, opoka-like rocks, soft molding, ceramic weight, humidity, degree of grinding, calcination temperature.

Физико-химические свойства энергосберегающих трехслойных панелей для энергоэффективных жилых и общественных объектов крупнопанельного и каркасно-панельного домостроения

Смолий В. А., Косарев А. С.

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»
Новочеркасск, Россия
vikk-toria@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена актуальность разработки современных экологичных энергоэффективных трехслойных стеновых панелей для энергоэффективных жилых и общественных объектов крупнопанельного и каркасно-панельного домостроения, позволяющей решить спектр проблем в области энергосбережения, экологии и рационального природопользования. Приведены оптимальные температурно-временные режимы и состав шихт для синтеза теплоизоляционных плит из ячеистого стекла и пористого заполнителя для легких бетонов и теплоизоляционных засыпок, а также сравнительная характеристика синтезированного ячеистого стекла и традиционных теплоизоляционных материалов. Для прогнозирования теплоизоляционных свойств энергосберегающих трехслойных панелей для энергоэффективных жилых и общественных объектов крупнопанельного и каркасно-панельного домостроения рассчитан суммарный коэффициент теплопроводности всей конструкции. Установлено, что синтезированные энергосберегающие трехслойные панели для энергоэффективных жилых и общественных объектов крупнопанельного и каркасно-панельного домостроения не уступают по своим физико-химическим свойствам традиционным теплоизоляционным материалам, в т.ч. пеностеклу, а по показателям прочности превосходят в несколько раз.

Ключевые слова: трехслойные строительные панели, ячеистое стекло, теплоизоляционные плиты, заполнитель пористый для легких бетонов, энергосбережение, ресурсосбережение.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей энергетики является повышение энергетической эффективности гражданского и промышленного строительства, т.к. ее решение будет содействовать снижению объема потребления топливно-энергетических ресурсов, а, следовательно, и уменьшению количества отходов, образующихся на электростанциях. Строительный комплекс является фактически главным звеном в решении проблемы энергосбережения больших городов, т.к. минимизация тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий и сооружений – один из важнейших путей экономии топливно-энергетических ресурсов. Главное направление снижения тепловых потерь – увеличение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций за счет применения эффективных современных теплоизоляционных материалов (ТИМ).

Все современные теплоизоляционные материалы (пенополистирол, пенополиуритан, минераловатные плиты и маты, пеностекло, пенобетон и др.) в основном используются для внутренней изоляции зданий и сооружений посредством размещения их между слоями стеновых материалов. Однако наружная теплоизоляция более эффективна в связи с тем, что защищает от воздействия атмосферных осадков и сырости на внешние участки стен; способствует сдвигу точки росы в изолятор, что практически полностью исключает появление грибка и плесени; увеличивает прочность стеновой конструкции. Основные виды наружной изоляции стен на сегодняшний день включают: специальные экраны, выполняющие как защитные и декоративные функции (так называемая «навесная фасадная облицовка») и. напыление материала (пенополиуретан). В обоих случаях в качестве теплоизоляционных материалов используются органические горючие материалы, относящиеся к классу горючести Г2-Г4 и имеющие срок эксплуатации не более 25 лет. Поэтому необходимо дополнительное утепление фасадов с помощью многослойных ограждающих конструкций, где в качестве утеплителя применяется эффективный ТИМ. В зависимости от расположения теплоизоляционного материала существуют три основных варианта ограждающих конструкций: системы с утеплителем с внутренней стороны ограждающей конструкции; системы с утеплителем с внешней стороны ограждающей конструкции; системы с утеплителем внутри ограждающей конструкции.

В многоэтажном домостроении распространение получили системы с ТИМ внутри ограждающей конструкции. Это достаточно недорогой способ возведения ограждающей конструкции, обладающий рядом несомненных преимуществ, таких как: сравнительно небольшая толщина и, соответственно, вес стеновой конструкции; высокая тепловая эффективность; огнестойкость. Однако, трехслойные стены, кроме достоинств, обладают и рядом недостатков, таких как: высокая трудоемкость и многостадийность их возведения, а также недостаточно изученный и проверенный вопрос поведения и долговечности различных типов теплоизоляционных материалов.

В связи с ужесточением строительных норм к теплоизоляции зданий и требований пожарной и экологической безопасности к строительным ТИМ, они должны обладать це-

лым комплексом свойств: высоким тепловым сопротивлением, экологической безопасностью (отсутствием выделения вредных веществ при эксплуатации), пожаробезопасностью, стойкостью к бытовым воздействиям, механической прочностью, простотой применения и низкой стоимостью, а срок их эксплуатации должен соответствовать сроку службы здания. Теплоизоляционные материалы можно условно разделить на два основных вида - органические, к ним относятся разнообразные полимеры (вспененный полиэтилен, пенополистирол, пенополиуретан и др.) и неорганические (минеральные и шлаковая вата, пеностекло, пено- и газобетон). Все они в целом справляются с задачей теплоизоляции зданий, но при этом имеют ряд очевидных и подчас весьма опасных недостатков. Так, представленные на рынке органические ТИМ обладают горючестью, низким температурным интервалом применения, недолговечностью, высоким дымообразованием при горении, способностью к выделению токсичных веществ, отсутствием возможности утилизации и переработки. Неорганические ТИМ отличаются слабой водостойкостью и морозостойкостью, а также недолговечностью. Кроме того, различным видам ТИМ присвоены разные категории опасности для здоровья человека. По большому счету, рынок ограничен горючими и небезопасными пенопластами и недолговечными, боящимися влаги, волокнистыми материалами. Но самое главное, нормативный срок службы и тех и других составляет в среднем 20-30 лет, что значительно ниже срока эксплуатации зданий.

Разработка материала, обладающего всеми преимуществами популярных ТИМ и лишённого их недостатков, позволит при комплексном подходе к вопросам технологии, менеджмента и инвестирования со временем вытеснить традиционно используемые и небезопасные горючие теплоизоляционные материалы. Одним из таких направлений исследований является разработка трехслойных стеновых панелей на основе материалов из ячеистого стекла (теплоизоляционные плиты и наполнитель пористый для легких бетонов и теплоизоляционных засыпок). Разработка современных экологичных энергоэффективных трехслойных стеновых панелей для энергоэффективных жилых и общественных объектов крупнопанельного и каркасно-панельного домостроения является чрезвычайно актуальной, т.к. позволит решить спектр проблем в области энергосбережения, экологии и рационального природопользования [1-17].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В трехслойных стеновых панелях с утеплителем (ГОСТ 31310-2005), в качестве среднего теплоизоляционного использованы экспериментальные образцы теплоизоляционных плит из ячеистого стекла на основе шлака Новочеркасской ГРЭС, а в качестве внутреннего и наружного слоев – экспериментальные образцы конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона по ГОСТ 25820-2000 с пористым наполнителем на основе шлака Новочеркасской ГРЭС. Наружный слой продукта предусматривает возможность применения декоративного покрытия. По результатам исследований и подбора составов и технологических параметров синтеза экспериментальных образцов энергосберегающих трехслойных панелей для энергоэффективных жи-

лых и общественных объектов крупнопанельного и каркасно-панельного домостроения в лабораторных условиях, установлено, что оптимальными являются следующие:

а) состав шихты для синтеза теплоизоляционных плит: шлак Новочеркасской ГРЭС – 30 мас. %, стеклобой – 60 мас. %, порообразователь – 10 мас. %. Температурно-временной режим синтеза: двухступенчатый, загрузка в печь при температуре 600 °С, нагрев в течение 30 мин. до температуры 850 °С, выдержка в течение 90 мин. – процесс вспенивания (порообразования), охлаждение в течение 30 мин. до температуры 600 °С, выдержка в течение 30 мин. – стабилизация структуры (отжиг) и охлаждение в течение 210 мин. до температуры 50 °С;

б) состав шихты для синтеза наполнителя пористого для легких бетонов и теплоизоляционных засыпок: шлак Новочеркасской ГРЭС – 20 мас. %, стеклобой – 70 мас. %, порообразователь – 10 мас. %. Температурно-временной режим синтеза: одноступенчатый, загрузка в печь при температуре 600 °С, нагрев в течение 60 мин. до температуры 820 °С, выдержка в течение 30 мин. – процесс вспенивания (порообразования), охлаждение в течение 180 мин. до температуры 50 °С.

Синтез теплоизоляционных плит из ячеистого стекла и наполнителя пористого осуществлялся порошковым методом, включающим приготовление тонкодисперсной шихты, брикетирование или гранулирование образцов, термическую обработку. В результате термообработки формируется ячеистая структура стекла. Образцы представляют собой стекломатрицу с распределенной в ней газовой фазой. На основе химического состава стекломатриц ячеистого стекла по аддитивным формулам А. Аппена рассчитаны их физико-химические свойства: плотность, прочность при сжатии и растяжении, вязкость, температурный коэффициент линейного расширения, поверхностное натяжение. Плотность, прочность на сжатие и коэффициент теплопроводности установлены также экспериментальными исследованиями. Сравнительная характеристика основных физико-химических свойств синтезированных и традиционных строительных материалов приведена в табл. 1-2

Таблица 1

Сравнительная характеристика синтезированного ячеистого стекла и традиционных теплоизоляционных материалов

| Параметр | Ячеистое стекло | Плиты из минеральной (базальтовой) ваты | Пенополистирол (пенопласт) | Пеностекло |
|--|-----------------|---|----------------------------|------------|
| Средняя плотность, кг/м ³ | 140 - 600 | 50 - 200 | 25- 150 | 150-400 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | 0,063-0,14 | 0,048 - 0,07 | 0,038 - 0,05 | 0,07-0,1 |
| Прочность на сжатие, МПа | 0,91 - 4,53 | 0,03 - 0,15 | 0,04 - 0,2 | 0,1-1,5 |

Таблица 2

Сравнительная характеристика синтезированного пористого заполнителя и традиционных теплоизоляционных материалов

| Параметр | Пористый заполнитель | Керамзит | Вспученный перлит | Вспученный вермикулит | Пенополистирол гранулированный |
|--|----------------------|---------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Насыпная плотность, кг/м ³ | 130 - 400 | 250 - 800 | 50 - 600 | 100 - 200 | 6 - 30 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | 0,060 - 0,100 | 0,080 - 0,180 | 0,052 - 0,093 | 0,055 - 0,065 | 0,037 - 0,054 |
| Прочность на сжатие, МПа | 0,910 - 4,530 | 0,600 - 5,500 | 0,100 - 0,600 | не нормируется | 0,005 - 0,026 |

Для прогнозирования теплоизоляционных свойств энергосберегающих трехслойных панелей для энергоэффективных жилых и общественных объектов крупнопанельного и каркасно-панельного домостроения необходимо рассчитать суммарный коэффициент теплопроводности всей конструкции (рис. 1).

Наиболее трудно прогнозируется теплопроводность легких бетонов с заполнителями. Основной причиной является сложность многокомпонентной структуры, формирующейся в процессе изготовления и твердения бетона, зависящей от специфики технологий производства и твердения материала.

Максимальную λ_{max} , Вт/(м·К), и минимальную λ_{min} , Вт/(м·К), теплопроводность бетона как системы, состоящей из двух компонентов – раствора и крупного заполнителя, можно рассчитать, применяя метод электроанalogии так, как если бы растворная часть и заполнитель располагались послойно вдоль или поперек направления теплового потока.

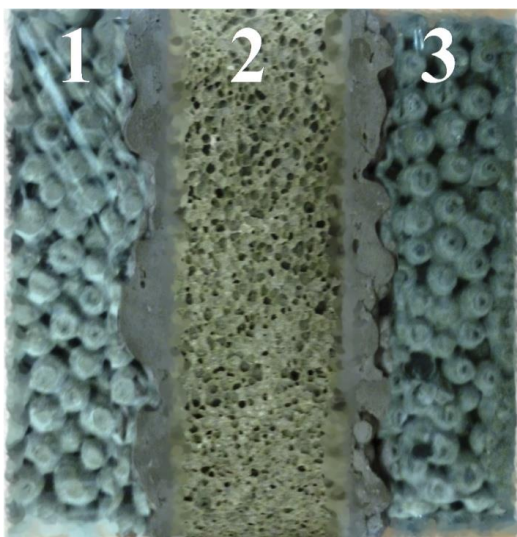


Рис. 1. Лабораторный образец энергосберегающей трехслойной панели для энергоэффективных жилых и обще-

ственных объектов крупнопанельного и каркасно-панельного домостроения: 1 – внутренний слой; 2 – теплоизоляционный слой; 3 – внешний слой

Максимальное значение теплопроводности получается при расположении этих слоев вдоль направления теплового потока, формула (1), а минимальное – поперек, формула (2) [18-22].

$$\lambda_{max} = \lambda_m \varphi_m + \lambda_L (1 - \varphi_m), \quad (1)$$

$$\lambda_{min} = (\lambda_m \cdot \lambda_L) / (\lambda_L \varphi_m + \lambda_m (1 - \varphi_m)), \quad (2)$$

где λ_m – коэффициент теплопроводности растворной части бетона Вт/(м·К); φ_m – объемная доля бетона в 1 м³; λ_L – коэффициент теплопроводности заполнителя для бетона, Вт/(м·К).

Для ориентировочных расчетов эффективной теплопроводности λ , Вт/(м·К), принята средняя величина между значениями (3), рассчитанными по формулам (1) и (2):

$$\lambda = (\lambda_{max} + \lambda_{min}) / 2 \quad (3)$$

Коэффициент теплопроводности растворной части бетона равен $\lambda_m = 1,75$ Вт/(м·К); коэффициент теплопроводности заполнителя для бетона равен $\lambda_L = 0,06$ Вт/(м·К); объемная доля бетона в 1 м³ составляет $\varphi_m = 0,6$.

$$\lambda_{max} = 1,75 \cdot 0,6 + 0,06 \cdot 0,4 = 1,074 \text{ Вт/(м·К);}$$

$$\lambda_{min} = (1,75 \cdot 0,06) / (0,06 \cdot 0,6 + 1,75 \cdot 0,4) = 0,143 \text{ Вт/(м·К);}$$

$$\lambda = 0,608 \text{ Вт/(м·К).}$$

Суммарный коэффициент теплопроводности синтезируемых энергосберегающих трехслойных панелей представляет собой частное от суммы толщин слоев и суммы показателей толщин каждого слоя, деленных на соответствующие коэффициенты теплопроводности материалов. Коэффициенты теплопроводности теплоизоляционного и наружных слоев всей конструкции, соответственно, равны 0,080 и 0,608 Вт/(м·К) [18-22]. Линейные размеры экспериментальных образцов энергосберегающих трехслойных панелей для энергоэффективных жилых и общественных объектов крупнопанельного и каркасно-панельного домостроения:

1) внутренний слой ((350x350x 100; 125; 150)±5 мм): экспериментальный образец конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона плотностью не более 1000 кг/м³;

2) теплоизоляционный слой ((350x350x100)±5 мм): экспериментальный образец теплоизоляционной плиты из ячеистого стекла;

3) наружный слой ((350x350x 100; 125; 150)±5 мм): экспериментальный образец конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона плотностью не более 1000 кг/м³ с декоративной отделкой.

Расчет коэффициента теплопроводности производился для энергосберегающих трехслойных панелей толщиной 300, 350 и 400 мм.

$$\lambda_{300} = (0,1+0,1+0,1)/(0,1/0,608 + 0,025/0,47 + 0,1/0,08 + 0,025/0,47 + 0,1/0,608) = 0,3/1,59 = 0,18 \text{ Вт/(м·К).}$$

$$\lambda_{350} = (0,125+0,1+0,125)/(0,125/0,608 + 0,025/0,47 + 0,1/0,08 + 0,025/0,47 + 0,125/0,608) = 0,35/1,67 = 0,21 \text{ Вт/(м·К).}$$

$$\lambda_{400} = (0,15+0,1+0,15)/(0,15/0,608 + 0,025/0,47 + 0,1/0,08 + 0,025/0,47 + 0,15/0,608) = 0,4/1,75 = 0,23 \text{ Вт/(м·К).}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Полученные результаты расчета коэффициентов теплопроводности энергосберегающих трехслойных панелей для энергоэффективных жилых и общественных объектов

крупнопанельного и каркасно-панельного домостроения не превышают показателя, определенного техническим заданием 0,35 Вт/(м·К).

На основе расчетных показателей физико-химических свойств многослойных теплоизоляционно-декоративных стеклокомпозиционных материалов можно заключить, что будут получены стекломатериалы, удовлетворяющие основным требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам. Кроме того, синтезируемые многослойные теплоизоляционно-декоративные стеклокомпозиционные материалы не уступают по своим физико-химическим свойствам традиционным теплоизоляционным материалам, в т.ч. пеностекло, а по показателям прочности превосходят в несколько раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косарев А. С. М. Технологические особенности получения ячеистого стекла, применяемого в качестве теплоизоляционного слоя в силикатном многослойном композиционном теплоизоляционно-декоративном материале / А. С. Косарев, В.А. Смолий, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман // *Техника и технология силикатов*. - 2016. - № 4. - С. 2 – 7.
2. Смолий В.А. Влияние золошлаковых материалов на температурно-временные параметры синтеза теплоизоляционного силикатного материала / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев // *Техника и технология силикатов*. - 2016. - № 4. - С. 25 – 29.
3. Смолий В.А. Исследование спектрофотометрических характеристик декоративного слоя многослойного силикатного композиционного теплоизоляционно-декоративного материала / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, А.С. Косарев, Л.В. Климова // *Техника и технология силикатов*. - 2017. - № 4. - С. 23 – 28.
4. Смолий В. А. Зависимость теплоизоляционных и прочностных свойств легкого бетона от фракционного состава пористого заполнителя / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев // *Экология промышленного производства*. - 2017. - № 4. - С. 13 – 15.
5. Яценко Е.А. Ресурсосберегающая технология теплоизоляционно-декоративного стеклокомпозиционного материала на основе золошлаковых отходов / Е.А. Яценко, А.П. Зубехин, В.А. Смолий и др. // *Стекло и керамика*. - 2015. - № 6. - С. 34 – 38.
6. Смолий В.А. Разработка технологии производства эффективного энергосберегающего ячеистого теплоизоляционного строительного стекломатериала / В.А. Смолий, А.С. Косарев, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки*. - 2015. - № 4 (185). - С. 128 – 132.
7. Яценко Е. А. Исследование макро- и микроструктуры пеностекол на основе шлаковых отходов ТЭС / Е.А. Яценко, В.А. Смолий, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки*. - 2012. - № 6. - С. 127 – 130.
8. Смолий В.А. Влияние гранулометрического состава шихты на технологические и физико-химические свойства гранулированного пористого силикатного заполнителя / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев // *Стекло и керамика*. - 2017. - № 8. - С. 12 – 15.
9. Смолий В.А. Зависимость скорости формирования пористой структуры теплоизоляционного силикатного материала от содержания золошлаковых отходов / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, А.С. Косарев, Б.М. Гольцман // *Экология промышленного производства*. - 2016. - № 3. - С. 2 – 5.
10. Яценко Е.А. Исследование факторов, влияющих на свойства и структуру пеношлакостекла / Е.А. Яценко, А.П. Зубехин, Б.М. Гольцман и др. // *Стекло и керамика*. - 2014. - № 4. - С. 3 – 6.
11. Зубехин А. П., Голованова С. П., Яценко Е. А. и др. Основы технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов: учеб. пособие / под ред. А. П. Зубехина. – М.: КАРТЭК, 2010. – 308 с.
12. Лотов В. А. В. Кинетика процесса формирования пористой структуры пеностекла / В.А. Лотов, Е.В. Кривенкова // *Стекло и керамика*. - 2002. - № 3. - С. 14 – 17.
13. Машкин Н.А. Строительные материалы. Краткий курс: учеб. пособие. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2012. – 200 с.
14. Смолий В.А., Яценко Е.А., Косарев А.С., Гольцман Б.М. Силикатный многослойный композиционный теплоизоляционно-декоративный материал / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, А.С. Косарев, Б.М. Гольцман // *Научное обозрение*. - 2017. - № 22. - С. 16-23.
15. Пеностекло (производство и применение) / Ф. Шилл: пер. с чеш. канд. техн. наук Г. М. Матвеева. - М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. – 307 с.
16. Казьмина О.В. Пеностеклокристаллические материалы на основе природного и техногенного сырья / О.В. Казьмина, В.И. Верещагин, А.Н. Абияка. - Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2014. - 245 с.
17. Смолий В.А. Математическое планирование при оптимизации режимов синтеза ячеистого теплоизоляционного стекломатериала / В.А. Смолий, А.С. Косарев, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, Н.А. Вильбицкая // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. - 2017. - № 1 (193). - С. 80-85.
18. Назиров Р.А. Моделирование теплопроводности легких бетонов на крупном заполнителе / Р.А. Назиров, А.Н. Волков, Л.М. Фаткулина-Яськова // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2013. – № 2. – С. 238–246.
19. Строительная теплотехника ограждающих частей здания: научное издание / К.Ф. Фокин; [под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина]. - 5-е изд., пересмотр. - М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 250 с.
20. Малявина Е.Г. Теплотери здания. Справочное пособие. - М.: АВОК-ПРЕСС, 2007 – 150 с.
21. Ананьев А.И. Теплотехнические показатели строительных материалов и конструкций / А.И. Ананьев, О.А. Хоров, Л.Д. Евсеев, Т.А. Ухова, В.Н. Ярмаковский // *Строительный эксперт*. – 2005. – № 16 (203). – С. 17–23.
22. Малявина Е.Г. Теплотери здания: справочное пособие. – 2-е изд., испр. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2011. 144 с.

Physical and chemical Properties of Energy-saving Three-layer Panels for Energy-efficient Residential and Public Objects of Large-Panel and Frame-panel Housing Construction

Smoliy V.A., Kosarev A.S.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
"Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)"
Novocherkassk, Russia
vikk-toria@yandex.ru

Abstract. The relevance of the development of modern environmentally friendly energy-efficient three-layer wall panels for energy-efficient residential and public facilities of large-panel and frame-panel housing construction, allowing to solve a range of problems in the field of energy saving, ecology and rational environmental management is considered. The optimal temperature-time regimes and the composition of the charge for the synthesis of heat-insulating plates of cellular glass and porous aggregate for lightweight concrete and heat-insulating fillings, as well as a comparative characteristic of the synthesized cellular glass and traditional heat-insulating materials are given. To predict the thermal insulation properties of energy-saving three-layer panels for energy-efficient residential and public facilities of large-panel and

frame-panel housing construction, the calculated total coefficient of thermal conductivity of the entire structure. It was established that the synthesized energy-saving three-layer panels for energy-efficient residential and public facilities of large-panel and frame-panel housing construction are not inferior in their physical and chemical properties to traditional heat-insulating materials, including foam glass, and in terms of strength exceed several times.

Keywords: three-layer building panels, cellular glass, heat-insulating plates, porous aggregate for lightweight concrete, energy saving, resource saving.

Исследование влияния структуры огнеупорной футеровки на эксплуатационные свойства обжиговых печей

Лонзингер Т.М., Скотников В.А., Сухарев А.М.

ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Челябинск, Россия

lonzingertm@susu.ru

Аннотация. Проведено исследование влияния структуры огнеупоров на термомеханические свойства футеровки оборудования туннельных печей. Футеровка вагонеток подвергается воздействию нагрузки, распределенной равномерно по всей площади и наиболее опасных для хрупких материалов растягивающих термических напряжений. Величина растягивающих термических напряжений зависит от материала и структуры футеровки. Исследованы механизмы разрушения изделий из шамота и наливных бетонов. Минералого-петрографическим анализом шамотного огнеупора после службы в качестве футеровки вагонеток установлено метасоматическое взаимодействие футеровки с парогазовой составляющей печи, а также с металлом вагонеток. Монолитные изделия из низкоцементных бетонов с корундовым наполнителем обладают высокой прочностью и стойкостью к истиранию. Суммарная величина напряжений сжатия и термического расширения для них составляет 3,08 МПа, что в 2 раза меньше, чем у шамота. При проведении научно-исследовательской работы по оптимизации состава футеровки вагонеток разработана технология изготовления двухслойных бетонных блоков, сочетающих преимущества составов на основе корунда и шамота. Химический и гранулометрический состав бетонов нижнего теплоизоляционного слоя на основе шамота и верхнего упрочняющего слоя на основе электрокорунда были подобраны таким образом, чтобы обеспечить близкие значения коэффициентов линейного термического расширения и предотвратить возможное разрушение по границе между слоями при эксплуатации.

Ключевые слова: структура, огнеупорная футеровка, термомеханические свойства, электрокорунд, шамот, повышение эксплуатационных характеристик.

ВВЕДЕНИЕ

Используемое в обжиговых печах оборудование для перемещения материалов, чаще всего представляет собой вагонетки, защищенные от воздействия высоких температур огнеупорной футеровкой. Режим работы печей обжига определяет условия службы огнеупоров для футеровки вагонеток [1-3]. Материалы, используемые для изготовления футеровки, подвергаются воздействию сжимающей нагрузки от обжигаемых изделий, периодического нагрева и охлаждения при отсутствии термического удара. Разрушение футеровки вагонеток может вызвать падение изделий, нарушение их целостности, а в некоторых ситуациях и полную остановку печи. Стоимость футеровки при частых ремонтах значительно повышается [4], так как кроме затрат материалов требует привлечения квалифицирован-

ного персонала. Поэтому задача повышения качества футеровки вагонеток, а, следовательно, и увеличения сроков эксплуатации [5] является актуальной для предприятий.

Традиционно для футеровки вагонеток применяют шамотный кирпич и фасонные шамотные блоки [6-8]. Слой теплоизоляции создают на подине вагонетки укладкой легковесного литого огнеупорного кирпича. Кирпич укладывают всухую с пересыпкой из мелкодисперсной шамотной крошки (менее 0,8 мм). Необходимо отметить, что использование легковесного кирпича возможно только в нижнем слое кладки на уровне фасонных блоков из-за низкой прочности при температуре выше 1000°C [9-11].

Современные неформованные огнеупоры до недавнего времени в обжиговых печах не использовались [12], хотя в металлургии они в значительной мере вытеснили традиционные формованные изделия [13-15]. Среди неформованных огнеупоров наблюдается рост доли производства и потребления огнеупорных низкоцементных бетонов и изделий из них.

Производители низкоцементных бетонов в последние годы отдают предпочтение изготовлению монолитных изделий из данного вида огнеупоров [16, 17] и поставке готовых к использованию, прошедших сушку и термообработку деталей металлургических агрегатов потребителю. Для потребителя подобная система поставок не менее выгодна, так как изготовитель, обладая полной информацией об условиях службы данного вида монолитных изделий, подбирает оптимальные режимы укладки бетонной массы и термообработки, что гарантирует высокое качество изделий.

Наливные футеровки металлурги называют «вечными», так как для их ремонта достаточно убрать с поверхности разрушенные участки и вновь залить их бетонной смесью. Разбирать полностью футеровку не требуется.

Отличительной особенностью низкоцементных бетонов является повышенная термическая стойкость, обусловленная фрагментарной структурой [18, 19], за счет чего увеличивается продолжительность эксплуатации.

При изготовлении футеровок вагонеток возможно использование монолитной и монолитно-блочной технологии.

Преимущества монолитной технологии заключаются в простоте изготовления, отсутствии специально изготовленных форм, длительном сроке эксплуатации, простоте проведения ремонтов, при которых на поврежденный уча-

сток достаточно нанести новый слой бетона [19, 20]. Недостатком этой технологии является необходимость в проведении процессов сушки и обжига по строго установленному режиму для того, чтобы избежать возможного растрескивания покрытия [21, 22].

При монолитно-блочной технологии футеровки вагонеток кладка на подине вагонетки изготавливается из заранее отлитых в деревянные формы на виброустановке, просушенных и обожженных блоков из низкоцементного бетона. Данная технология позволяет стабилизировать качество литых блоков при сохранении простоты изготовления футеровки.

Выбор варианта технологии зависит от имеющегося технологического оборудования, квалификации персонала, необходимой частоты ремонтов и т.д.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является изучение влияния структуры огнеупорной футеровки на термомеханические свойства футеровки оборудования туннельных печей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовали разработанные образцы огнеупорных изделий с регулируемой структурой. Методика исследования включала определение термомеханических свойств огнеупорных изделий в лабораторных условиях и промышленные испытания.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор материалов и структуры огнеупорной футеровки зависит от условий её эксплуатации. Поэтому при выполнении исследований провели расчёт величины напряжений, действующих на огнеупорное покрытие вагонетки.

Вес материалов, загружаемых на вагонетку, определяется прочностью колёсных пар и обычно не превышает 4 тонн. При этом футеровка подвергается воздействию нагрузки, распределенной равномерно по всей площади. Вычисляли величину возникающих при этом сжимающих напряжений по формуле (1):

$$\sigma_s = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

где P – вес обжигаемых огнеупоров, кг; S – площадь, на которую уложены огнеупоры, m^2 ; Площадь вагонетки равна $2,46 m^2$.

После подстановки величины нагрузки и площади в формулу (1) получим, что сжимающие напряжения равны $1,63 MPa$.

Кроме сжимающих напряжений, на футеровку действуют наиболее опасные для хрупких материалов, растягивающие термические напряжения

Рассчитали величину термических напряжений при расширении по трем осям по формуле (2):

$$\sigma = \frac{E\alpha}{1-\mu} \times \Delta T, \quad (2)$$

где E – модуль Юнга, ГПа; α – коэффициент линейного термического расширения, $град^{-1}$; μ – коэффициент Пуассона; $\Delta T = T_1 - T_2$ – градиент температуры, $^{\circ}C$

Максимальный градиент температуры, равный $400^{\circ}C$ появляется при установке вагонетки в печь. Дальнейший нагрев происходит медленно с постоянной скоростью, поэтому величина термических напряжений в процессе нагрева уменьшается. В табл. 1 приведены значения прочностных характеристик наиболее распространенных материалов для футеровки обжиговых печей и величины термических напряжений, рассчитанные по формуле (2) для градиента температуры $400^{\circ}C$.

Таблица 1

Значения прочностных характеристик для футеровки вагонеток

| | Материал футеровки | E, ГПа | α , град ⁻¹ | μ | σ_t , МПа |
|---|---|--------|-------------------------------|------------------|------------------|
| 1 | Шамот | 2,04 | $4,5-6 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^8$ | 3,68-4,89 |
| 2 | Электрокорунд | 3,80 | $8 \cdot 10^{-7}$ | $3,7 \cdot 10^8$ | 1,93 |
| 3 | Низкоцементный бетон на основе электрокорунда | 3,74 | $6 \cdot 10^{-7}$ | $3,7 \cdot 10^8$ | 1,45 |

Из данных таблицы видно, что величина растягивающих термических напряжений прежде всего зависит от материала футеровки. Минимальные растягивающие термические напряжения появляются в бетонной футеровке на основе электрокорунда [23, 24].

Важным фактором влияющим на термостойкость является структура огнеупорного покрытия, определяющая процессы передачи тепла.

Условие надежной эксплуатации футеровки можно выразить неравенством (3)

$$\sigma > \sigma_c + \sigma_t, \quad (3)$$

где σ – предел прочности футеровки, Мпа; σ_c – предел прочности при сжатии, Мпа; σ_t – растягивающие термические напряжения, МПа

Для футеровки из шамота сумма разрушающих напряжений составляет $5,31 - 6,52 MPa$, что не позволяет сохранить целостность футеровки в течение длительного времени. Происходит скалывание и растрескивание кладки из шамотного кирпича, особенно фасонных блоков сложной формы.

На рис. 1 показан внешний вид стандартной футеровки вагонеток туннельной печи после разгрузки огнеупоров

Как видно, после каждого цикла эксплуатации стандартная огнеупорная футеровка нуждается в ремонте.



Рис. 1. Внешний вид футеровки вагонеток

В лаборатории были изготовлены методом виброналива из низкоцементного бетона огнеупорные кирпичи на основе электрокорунда и проведены испытания в футеровке вагонетки в течение 10 циклов нагрев-охлаждение.

На рис. 2 приведены фотографии шамотного кирпича ШБ-5 и кирпича из бетона после 10 циклов эксплуатации. На углах кирпича ШБ-5 видны сколы, так как формованные шамотные изделия обладают высокой прочностью, но низкой термостойкостью. Механизм разрушения шамотного кирпича связан с низким сопротивлением изгибающим напряжениям, возникающим при нагреве и охлаждении изделий.

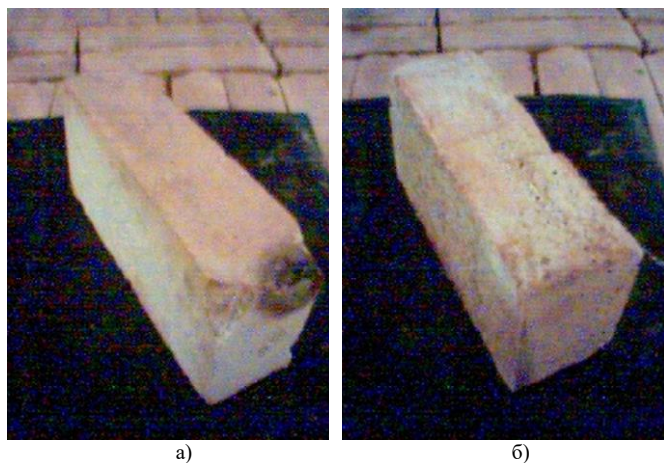


Рис. 2. Внешний вид шамотного кирпича и изделия из низкоцементного бетона после эксплуатации в туннельной печи: а – кирпич ШБ-5, б – наливное изделие из низкоцементного бетона

На рисунке 3а показан излом шамотного кирпича после 10 циклов эксплуатации.

При минералого-петрографическом изучении шамотного огнеупора после службы в качестве футеровки вагонеток установлено метасоматическое взаимодействие футеровки с парогазовой составляющей печи, а также с металлом вагонеток. Результатом такого взаимодействия является образование железистых «выплавок» размером до 1 мм, окруженных измененной зоной огнеупора размером до 5 мм. В этих зонах происходит формирование «микродруз», сложенных вторичными минералами типа железистого кордиерита $2\text{FeO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ($N_g=1,555$) и лейцита $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$. Основная масса огнеупора интенсивно перекристаллизована, результатом чего является рекристаллизация стекла с ростом кристаллов муллита до 7 мкм, а так же вторичных кристаллов полевого шпата.

Описанные изменения приводят к образованию многочисленных усадочных трещин, формирующих из огнеупора так называемый «сухарь», который легко рассыпается при незначительных нагрузках. Ширина усадочных трещин колеблется от 10 до 150 мкм, расстояние между трещинами 500 – 1000 мкм, т. е. огнеупор является интенсивно трещиноватым, причем наблюдается некоторая параллельная направленность трещин по отношению к плоскости. Этот факт свидетельствует о формировании трещин под нагрузкой с последующим сколом части огнеупора.

На рис. 3б показан излом образца наливного изделия из бетона после эксплуатации в тех же условиях, что и шамотного кирпича. Интенсивно развитой трещиноватости не наблюдается, однако присутствует волосовидная сеть микротрещин, развитых около крупных зерен. Матрица бетона со специальными шаровидными добавками фрагментарна, достаточно эластична, но также подвержена вторичной рекристаллизации, что делает ее хрупкой и «сухारेвидной». На поверхности изделия сколы и разрушения не отмечены. У низкоцементного бетона и изделий из него отсутствует усадка, а при нагреве происходит расширение на 0,1 %, которое способствует «залечиванию» трещин и повышению термостойкости огнеупора.

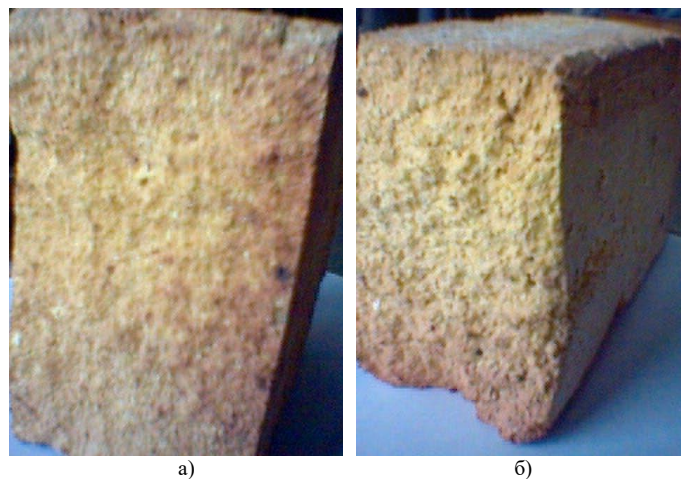


Рис. 3. Излом огнеупора после службы двухслойного образца: а) шамотный огнеупор, б) наливное изделие

Проведенные исследования показали, что монолитные изделия из низкоцементных бетонов с корундовым наполнителем обладают высокой прочностью и стойкостью к истиранию. Суммарная величина напряжений сжатия и термического расширения для них составляет 3,08 МПа, что в 2 раза меньше, чем у шамота.

Недостатком данного вида бетонов применительно к футеровке вагонеток является высокая плотность, которая приводит к увеличению веса и высокая стоимость материала наполнителя.

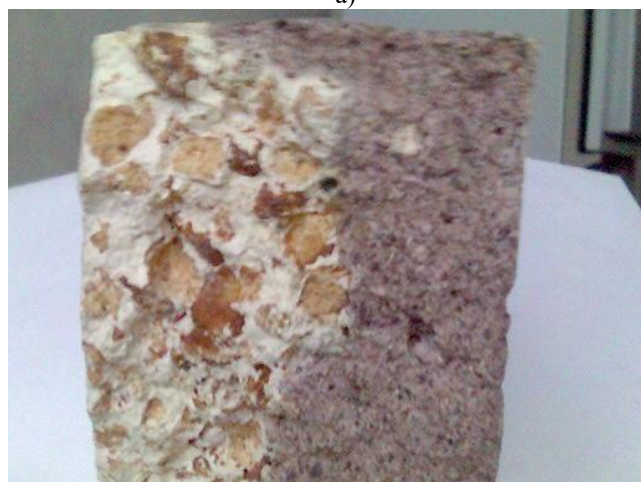
При проведении научно-исследовательской работы по оптимизации состава футеровки вагонеток разработана технология изготовления двухслойных бетонных блоков, сочетающих преимущества составов на основе корунда и шамота. Термомеханические и химические свойства шамота позволяют использовать его при рабочих температурах в туннельных печах в качестве наполнителя для неформованных огнеупоров. Одним из преимуществ шамотного наполнителя является его высокая пористость и относительно низкий удельный вес, поэтому шамот был использован в качестве наполнителя теплоизоляционного слоя бетона.

Химический и гранулометрический состав бетонов нижнего теплоизоляционного и верхнего упрочняющего слоя на основе электрокорунда были подобраны таким образом, чтобы обеспечить близкие значения коэффициентов линейного термического расширения и предотвратить возможное разрушение по границе между слоями при эксплуатации.

На рис. 4 представлен внешний вид (а) и излом (б) двухслойного бетонного блока, изготовленного по разработанной технологии и обожженного в туннельной печи при температуре 1300°C в течение 6 суток. На рис. 5 показана структура разработанных бетонов в упрочняющем и теплоизоляционном слоях.

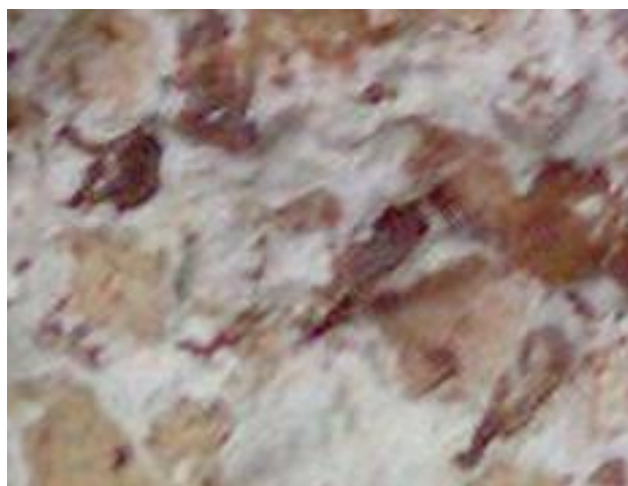


а)

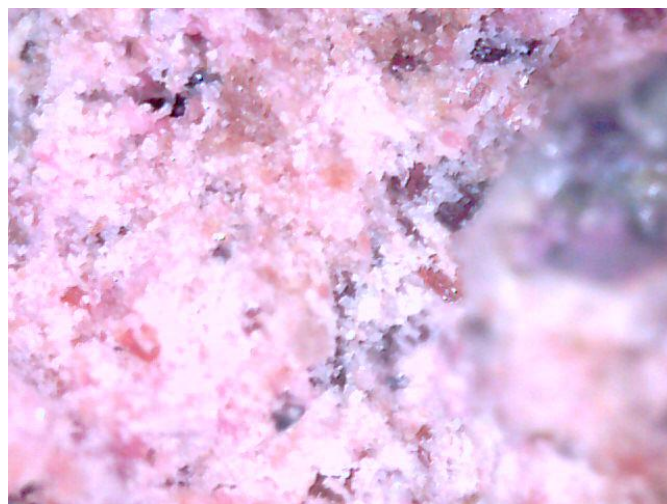


б)

Рис. 4. Внешний вид двухслойного образца: а) внешний вид блока, б) излом блока



а)



б)

Рис. 5. Структура теплоизоляционного (а) и упрочняющего слоя (б) бетона

В табл. 2 приведены термомеханические характеристики двухслойной футеровки.

Таблица 2

Основные характеристики образцов из двухслойного бетона

| Наименование показателя | Значение показателя |
|---|---------------------|
| Предел прочности при сжатии, МПа | 33,9 |
| Предел прочности при изгибе, МПа | 3,74 |
| Кажущаяся плотность, г/см ³ | 2,35 |
| Время затвердевания, час | 24 |
| Усадка, % | - 0,56 |
| Температура деформации под нагрузкой, °С: | |
| t_{max} | 1380 |
| $t_{0,6}$ | 1460 |
| t_4 | 1560 |

Данные таблицы показывают, что двухслойная футеровка обладает сравнительно низкой плотностью и высокой прочностью. Себестоимость огнеупорной футеровки низкая, что также является её положительным свойством.

Проведенные эксперименты показали, что футеровка вагонетки должна состоять на две трети из бетона на основе шамота и на одну треть из низкоцементного высокоглиноземистого бетона. При такой структуре огнеупорного покрытия достигается эффект теплоизоляции за счет использования шамотного бетона на крупнозернистой основе. Рабочая поверхность футеровки имеет высокую прочность и стойкость к истиранию.

По разработанной технологии была изготовлена монолитная двухслойная футеровка для вагонетки, которая без промежуточных ремонтов эксплуатировалась в течение 6 месяцев в туннельной печи обжига огнеупорных изделий.

Выводы

1. При выполнении исследований установлены причины разрушения футеровки оборудования туннельных печей. Проведён расчёт величины напряжений, действующих на огнеупорное покрытие вагонетки.

2. Установлено, что величина разрушающих напряжений составляет 5,31–6,52 МПа, поэтому целостность футеровки не сохраняется в течение длительного времени. Происходит скалывание и растрескивание кладки из шамотного кирпича, особенно фасонных блоков сложной формы.

3. Исследования, показали, что монолитные изделия из низкоцементных бетонов с корундовым заполнителем обладают высокой прочностью и стойкостью к истиранию. Суммарная величина напряжений сжатия и термического расширения для них составляет 3,08 МПа, что в 2 раза меньше, чем у шамота.

4. Для оптимизации состава и структуры футеровки разработаны двухслойные бетонные блоки, сочетающие преимущества составов на основе корунда и шамота. При сформированной структуре огнеупорного покрытия достигается эффект теплоизоляции за счет использования бетона с крупнозернистым заполнителем на основе шамота. Рабочая поверхность футеровки из низкоцементного бетона с корундовым заполнителем имеет высокую прочность и стойкость к истиранию. Монолитная двухслойная футеровка для вагонетки, изготовленная по разработанной технологии, без промежуточных ремонтов эксплуатировалась в течение 6 месяцев в туннельной печи обжига огнеупорных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердышев В.Ф. Комплексная оперативная диагностика тепловой работы туннельных печей / В.Ф. Бердышев, Р.Э. Найденев, В.Г. Саркисова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2006. - №3. – С. 69.

2. Ракутина Д.В. Совершенствование тепловой работы туннельных печей для обжига керамических изделий: автореф. канд. техн. наук. – Иваново, 2006. – 26 с.

3. Тютин Н.А. Высокотемпературная туннельная печь для сушки и обжига шпинельсодержащих огнеупоров / Н.А. Тютин, Ю.А. Левченко, А.А. Скочилов, М.Ю. Ванюков // Новые огнеупоры. – 2006. - №4. – С. 26-27.

4. Ахтямов Р.Р. Оптимизированные конструкции футеровок вагонеток для обжига керамического кирпича // Строительные материалы. – 2013. – №12. – С. 56-58.

5. Хессе Валентина. Факторы, влияющие на срок службы огнеупорных материалов при производстве строительного кирпича и клинкера // Строительные материалы. – 2011. – №7. – С. 34-35.

6. Александров И.Э. Разработка и эксплуатация огнеупоров для футеровки вагонеток обжига строительного кирпича / И.Э. Александров, Э.С. Мамбетшаев, Т.Х. Басимова // Стекло и керамика. – 2006. – №9. – С. 15-16.

7. Баранова Т.Ф., Степанова Е.А., Шункина Н.И. Шихта для изготовления огнеупорных изделий // Патент России №2412133. 2011. Бюл. №5.

8. Fomichev N.A. Refractory concrete blocks for lining tunnel kiln cars / N.A. Fomichev, A.N. Abyzov, V.P. Bogatyrev, A.A. Ginter, N.F. Bugaev, E.I. V'yunnikova // Refractories and Industrial Ceramics. – 1968. – vol. 9. – P. 546-548.

9. Баранова Т.Ф., Поклад В.А., Меньшиков И.Б. Вагонетка для туннельной печи // Патент России №2403520. 2010. Бюл. №31.

10. Тропинова И.В. Метод ремонта вагонеток туннельных печей / И.В. Тропинова, А.М. Тропинов // Новые огнеупоры. – 2007. – №5. – С. 15-19.

11. Хлыстов А.И. Теоретические и технологические принципы повышения долговечности огнеупорных футеровочных материалов: автореф. доктора техн. наук. – Самара, 2004. – 26 с.

12. Шахов И.И. Опыт применения огнеупорных бетонов для промышленных печей / И.И. Шахов, Н.К. Позднякова // Новые огнеупоры. – 2006. – №11. – С. 18-21.

13. Пономарева А.А. Статистический анализ современного состояния металлургического комплекса Российской Федерации, перспективы развития отрасли / А.А. Пономарева, Д.С. Линиченко // Актуальные проблемы и перспективы развития государственной статистики в современных условиях: Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции (Саратов, 21-25 декабря 2017 г.). – Саратов, 2018. – С. 45-46.

14. Очагова И.Д. Направления развития огнеупорной промышленности и мировая черная металлургия / И.Д. Очагова // Новые огнеупоры. – 2008. – №5. – С. 78-81.

15. Пивинский Ю.Е., Черватова А.В., Рожков Е.В. Литой кремнеземистый керамобетон // Патент России №2141460. 1999.

16. Шахов И.И. Блочная футеровка вагонеток туннельных печей для обжига керамических изделий / И.И. Шахов, Н.К. Позднякова, А.А. Дорожкин // Строительные материалы. – 2007. – №11. – С. 74-77.

17. Колосанов О.Д., Лим Ю.В., Гришпун Е.М., Гороховский А.М. Вагонетка обжиговой печи // Патент России №107580. 2011. Бюл. №33.

18. Гнедаш Е.Е. Состояние и перспективы развития технологий жаростойких композиционных материалов / Е.Е. Гнедаш, А.К. Акчурин, И.В. Стефаненко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2018. – №9(219). – С. 56-61.

19. Хлыстов А.И. Опыт применения жаростойких бетонов в футеровках тепловых агрегатов в машиностроении / А.И. Хлыстов, А.С. Бахчев, А.А. Павлов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2006. – №1. – С. 45-48.

20. Мигаль В.П. Неформованные огнеупорные материалы для металлургической промышленности / В.П. Мигаль, А.П. Маргишвили, В.В. Скурихин, Г.В. Русакова, П.Е. Алексеев // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. - №4-5. – С. 27-34.

21. Евстигнеев А.И. Решение проблем формообразования в литье по выплавляемым моделям / А.И. Евстигнеев, И.Г. Сапченко // Литейное производство. – 2012. – №9. – С. 40-43.

22. Перфилов В.А. Влияние нагрева на изменение трещиностойкости и долговечности жаростойких и обычного бетона: автореф. канд. техн. наук. – Волгоград, 1992. – 23 с.

23. Григорьевский В.В. Влияние нагрева на изменения трещиностойкости и хрупкости жаростойких и обычного бетона: автореф. канд. техн. наук. – Волгоград, 2004. – 22 с.

24. Тотурбиев Б.Д. Корундовый жаростойкий бетон с повышенными эксплуатационными свойствами / Б.Д. Тотурбиев, А.А. Порсуков // Бетон и железобетон. – 2006. - №4. – С. 13-14.

Study of the Influence of Refractories Structure on the Thermomechanical Properties of Tunnel Kiln Equipment Lining

Lonzinger T.M., Skotnikov V.A., Sukharev A.M.
South Ural State University (National Research University)
Chelyabinsk, Russia
lonzinger@susu.ru, sukharevam@susu.ru

Abstract. A study of the influence of refractories' structure on the thermomechanical properties of the lining of the equipment of tunnel kilns has been carried out. The lining of kiln trolleys is subjected to mechanical stress distributed evenly over the entire area and most dangerous to brittle materials as well as to tensile thermal stresses. The magnitude of the tensile thermal stress depends on the material and structure of the lining. The mechanisms of destruction of products made of fireclay and liquid concrete have been studied. Mineralogical and petrographic analysis of fireclay refractories having been used as trolley lining has established metasomatic interaction of the lining with the vapor-gas component of the kiln, as well as with the metal of the trolleys. Monolithic products made of low-cement concrete with corundum filler are characterised by high strength and resistance to abrasion. The total value of compression and thermal expansion stresses for them is

3.08 MPa, which is half the value of those of fireclay. When conducting research to optimize the composition of trolley lining, technology has been developed for manufacturing two-layer concrete blocks combining the advantages of compositions based on corundum and fireclay. The chemical and granulometric composition of fireclay-based concrete in the lower thermal insulation layer and electrocorundum-based concrete in the upper reinforcing layer were selected in such a way as to ensure similar values of linear thermal expansion coefficients and prevent possible destruction along the boundary between the layers during operation.

Keywords: structure, refractory lining, thermomechanical properties, electrocorundum, fireclay, increased performance.

Физико-химические исследования и оценка пригодности диатомита Черноярского месторождения для синтеза пеностекла

Яценко Е.А., Смолий В.А., Чумаков А.А.

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Новочеркасск, Россия

e_yatsenko@mail.ru; vikk-toria@yandex.ru

Аннотация. Методами микроскопического анализа исследована макро- и микроструктура, определен элементный, гранулометрический и минералогический состав диатомита Черноярского месторождения. В результате комплексного термического анализа с использованием дифференциально-сканирующего калориметра установлены интервалы непрерывной дегидратации диатомита, а так же полиморфные превращения кварца и других минералов. Физико-химическими методами исследования установлено, что диатомит Черноярского месторождения, содержащий аморфный кремнезем, кварцит, глинистые примеси, опал и незначительные количества кальцита, слюды, цеолита, является перспективным сырьем для синтеза пеностекла.

Ключевые слова: диатомит, сырье, пеностекло, химический состав, структура, рентгенофазовый анализ, дифференциально-термический анализ, дисперсность.

ВВЕДЕНИЕ

Пеностекло – современный теплоизоляционный стекломатериал с пористостью до 90%. Пеностекло обладает рядом преимуществ перед другими теплоизоляционными строительными материалами (экологичность, негорючесть, низкая плотность и высокая прочность, отличные теплоизоляционные свойства и пр.), позволяющими применять данный материал повсеместно. Однако его применение ограничено ввиду высокой стоимости, так как основу составляет специально сваренное стекло или стеклобой. Разработки ресурсосберегающих технологий, способствующих удешевлению пеностекла в России ведутся в следующих ВУЗах: «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», «Государственный научно-исследовательский и проектный институт азотной промышленности и продуктов органического синтеза», «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет», «Сибирский государственный индустриальный университет», кроме того, имеется ряд патентов российского патентообладателя - Щепочкиной Ю.А. Среди зарубежных лидеров - Китай, США, Япония. Также патентование ведется такими странами, как Венгрия, Корея и Канада. В работах большинства исследователей в качестве основного направления

решения сырьевой задачи предложено использовать различные виды природных материалов, бытовых и промышленных отходов близких по структуре и свойствам к силикатным стеклам [1-24]. Таким образом, поиск качественного и недорогого сырья, пригодного для синтеза пеностекла является актуальной задачей для современной науки и строительной отрасли промышленности.

Цель данной работы – в результате физико-химических исследований оценить состав, свойства и качество диатомита Черноярского месторождения, а также спрогнозировать возможность синтеза на его основе пеностекла.

СТРУКТУРА И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДИАТОМИТА ЧЕРНОЯРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Диатомиты Черноярского месторождения (Хабаровский край) состоят преимущественно из панцрей колоннальных диатомей рода *Melosira*, цементирующего опала и, в незначительном количестве, глинистых примесей. На рисунке 1 приведены микрофотографии диатомита, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа и энергодисперсионного спектрометра.

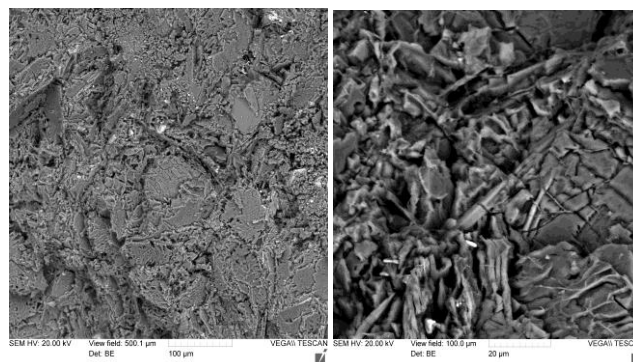


Рис. 1. Микрофотографии диатомита Черноярского месторождения

Как видно из рисунка 1 исследуемый диатомит обладает биогенно-шламовой структурой, скелеты диатомей сильно разрушены и превращены в шлам. Биогенная структура кремнезема обуславливает аномальные свойства, по сравнению с искусственно полученным аморфным диоксидом кремния и мелкокристаллическим кварцем. Поэтому температура плавления кремнезема, содержащегося в диатомите,

ниже (1500-1550 °С), чем температура плавления кварца (1713-1728 °С), что позволяет снижать температуру варки стекла. В составе диатомита имеется небольшое количество растительных остатков, а также редкие частички обогащённые оксидами железа. Известковых включений не наблюдается.

Химический состав диатомита Черноярского месторождения представлен в таблице 1.

Таблица 1

Результаты химического анализа диатомита Черноярского месторождения (% по массе)

| Материал | Массовое содержание, % | | | | | |
|-------------------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | п.п.п |
| Диатомит Черноярского месторождения | 76,19 | 6,76 | 3,54 | 1,04 | 0,92 | 11,55 |

По содержанию Al₂O₃ в прокалённом состоянии проба диатомитов Черноярского месторождения относится к группе кислого сырья. По содержанию красящих оксидов (Fe₂O₃ и TiO₂) в прокалённом состоянии проба относится к группе с высоким содержанием красящих оксидов.

В связи тем, что в производстве стекломатериалов нежелательным является содержание в большом количестве водорастворимых солей щелочных и щелочноземельных металлов, были проведены исследования по наличию данных соединений в составе диатомита. Результаты исследования представлены в таблице 2.

Таблица 2

Содержание водорастворимых солей, мг·экв/ 100 г породы

| Материал | Катионы | | | | Анионы | | | Сум ма, мг·э кв |
|-------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | |
| Диатомит Черноярского месторождения | 0,79 | 0,56 | 0,95 | 0,43 | 1,28 | 0,43 | 1,02 | 5,46 |

В результате исследования установлено, что диатомит Черноярского месторождения относится к сырью со средним содержанием водорастворимых солей.

РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИАТОМИТА ЧЕРНОЯРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Рентгенофазовый анализ диатомита (рисунок 2) показал, что его аморфная составляющая представлена разновидностью опала, которая выражена дифракционными отражениями с размытыми максимумами в области малых и средних углов, кристаллическая же составляющая представлена примесью кварца.

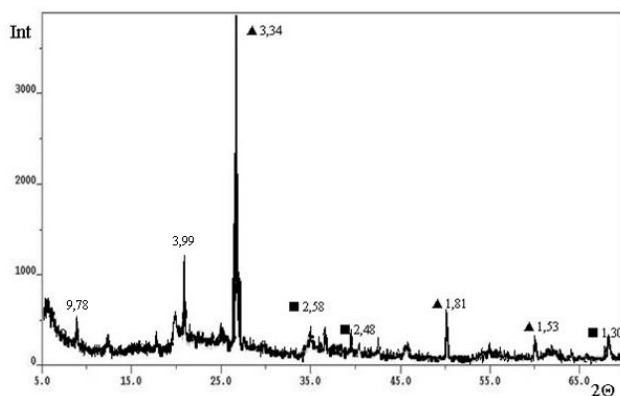


Рис. 2. Рентгенограмма диатомита Черноярского месторождения (■ - глауконит, ▲ – кварц)

Значительная часть диатомита Черноярского месторождения представлена аморфным кремнеземом, глинистыми минералами, кварцем, его полиморфными модификациями в составе опалов и полевых шпатов. Небольшой пик 408 нм говорит о том, что рентгеноаморфный опал в процессе диагенеза переходит в кристобалит и процесс этот находится в начальной стадии. Наиболее интенсивные и отчетливые пики принадлежат α-кварцу – 334, 181, 153 нм, наблюдается небольшой пик характерный для глауконита – 248 нм. Обобщённые результаты изучения минералогического состава диатомита Черноярского месторождения представлены в таблице 3.

Таблица 3

Минералогический состав диатомита Черноярского месторождения

| Структура породы | Минералогический состав (по данным петрографии), % | | | | | | | | | |
|----------------------|--|-----------------------------|---------------|-----------|-------|-------|---------|---------|-------------------|---------------------------|
| | Опал дегрированный | Глинистые минералы, смектит | Полевые шпаты | Глауконит | Кварц | Слюда | Кальцит | Цеолиты | Гидроксиды железа | Органика углефицированная |
| Органоно-перлитовая, | 38-40 | 22-25 | ≈ 1 | 6-7 | 13-14 | 3-4 | 1-2 | 1-2 | 2-3 | ≈ 2 |

При определении технологических свойств диатомита большое значение имеет поведение материала при нагревании. Термический анализ позволяет по процессам, происходящим при нагревании и охлаждении установить вещественный состав материала, а также прогнозировать оптимальный режим обжига изделий. Наряду с ДТА проводится и ДТГ, который дает возможность устанавливать изменения массы в образце при нагревании. При этом ТГ – кривая, представляющая собой график зависимости изменения массы вещества от времени или температуры. Кривая ДТГ регистрирует скорость изменения массы вещества как функцию от

времени или температуры внешней среды. В результате комплексного термического анализа с использованием дифференциально-сканирующего калориметра (ДСК) (рисунок 3) установлено, что эндотермический эффект с максимумом при 94,1 °С соответствует удалению адсорбционной воды. Это подтверждается термогравиметрическим анализом, указывающим на плавную непрерывную дегидратацию диатомита Черныярского месторождения при нагревании, причем основная масса воды удаляется в интервале температур 94-425 °С.

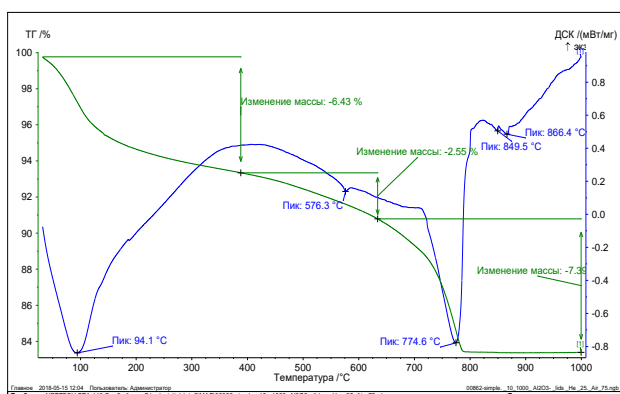


Рис.3. Дериватограмма диатомита Черныярского месторождения

Небольшой эндотермический максимум при температуре 576,3 °С соответствует полиморфному превращению кварца при переходе α-кварц в β-кварц и подтверждается уменьшением массы на 2,55 %. При переходе атомы кремния сохраняют свои положения в слоях по оси Z, а по направлению осей X и Y смещаются к центрам элементарных трансляций на небольшие величины. Эти фазы имеют родственные пространственные группы, но симметрия в β-кварце выше. В процессе этого полиморфного превращения происходит только снятие искажений и поворот тетраэдров (рисунок 4), а связи Si-O не разрушаются.

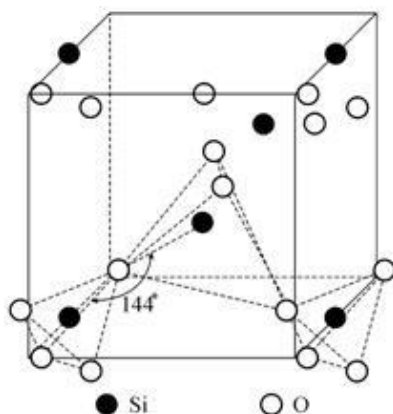


Рис.4. Элементарная ячейка β-кварца и цепь координационных многогранников в ней

Большой эндотермический эффект при 776,4 °С связан с резкой потерей массы (7,35 %) при термической диссоциацией кальцита. При температурах 849,5 и 866,4 °С наблюдаются незначительные пики эндотермических эффектов, соответствующих переходу β-кварца в следующую

полиморфную модификацию β-тридимит (рисунок 5). Координационный многогранник и характер структуры сохраняются, тетраэдры образуют шестичленные кольца, но период ячейки возрастает примерно в полтора раза. Угол связи между тетраэдрами увеличивается до 180 °, причем связь является зеркально симметричной.

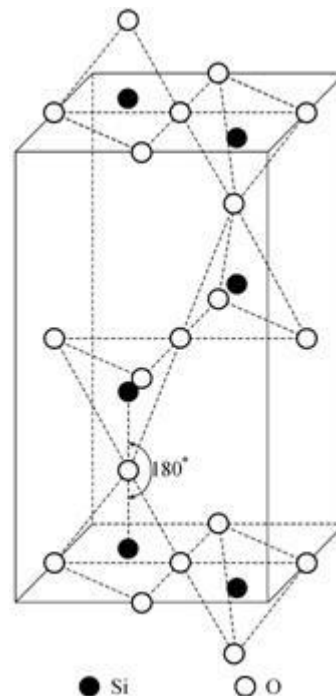


Рис. 5. Элементарная ячейка β-тридимита

ДИСПЕРСНОСТЬ СЫРЬЯ

Также важной характеристикой для технологии производства стекломатериалов, в том числе пеностекла и защитных эмалевых покрытий для нефте- и газопроводов, влияющей на качество шихты является дисперсность сырьевых материалов. Дисперсность сырья необходимо учитывать при подготовке отдельных компонентов шихты, их транспортировке и смешивании. Результаты изучения дисперсности диатомита Черныярского месторождения представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты определения дисперсности диатомита Черныярского месторождения

| Содержание фракций, мм, % | | | | | | | Наименование группы |
|---------------------------|---------|----------|------------|------------|------------|-------------|---------------------|
| > 0,5 | 0,5-0,2 | 0,2-0,09 | 0,09-0,063 | 0,063-0,01 | 0,01-0,005 | 0,005-0,001 | |
| 0,90 | 1,14 | 5,70 | 11,87 | 38,25 | 4,98 | 10,69 | Низкодисперсные |
| | | | | | | 26,47 | |

По гранулометрическому составу исследуемый диатомит Черныярского месторождения является

низкодисперсным, преобладают частицы размером в 0,063-0,01 мм и менее 0,001 мм.

ВЫВОД

Таким образом, близость химического состава к силикатным материалам, высокие значения дисперсности и содержание аморфной фазы в диатомите позволяют предположить возможность не только синтеза пеностекла на его основе, но и снижение температуры вспенивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шилл Ф. Пеностекло. – М.: Стройиздат, 1965. – 308 с.
2. Демидович Б.К. Пеностекло. – Минск: Наука и техника, 1975. – 248 с.
3. Минько Н.И. Перспективы развития технологии и производства и применения пеностекла / Н.И. Минько, О.В. Пучка, М.Н. Степанова // Стекло мира. – 2011. – № 1. – С. 61-62.
4. Минько Н.И. Стеклокристаллическое пеностекло из шлаков / Н.И. Минько, А.И. Кузьменко // Стекло мира. 2011. – № 3. – С. 78-79.
5. Kaz'mina O.V. Physicochemical modeling of composition of foam glass-crystal materials / O.V. Kaz'mina, V.I. Vereshchagin // Glass Physics and Chemistry. – 2015. – Т. 41, № 1. – С. 122-126.
6. Казьмина О.В. Получение пеностекольных материалов на основе золошлаковых отходов тепловых электростанций / О.В. Казьмина, Н.А. Кузнецова, В.И. Верещагин, В.П. Казьмин // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319, № 3. – С. 52-56.
7. Vaisman Y.I. The scientific and technological aspects of foam glass production / Y.I. Vaisman, A.A. Ketov, P.A. Ketov // Glass Physics and Chemistry. – 2015. – Т. 41, № 2. – С. 157-162.
8. Дамдинова Д.Р. Пеностекло на основе стеклобоя и высококристаллических горных пород / Д.Р. Дамдинова, М.М. Зонхийев, Р.Р. Бепле // Научное обозрение. – 2015. – № 8. – С. 191-197.
9. Смолий В.А. Зависимость реакционной и вспенивающей способности композиций органических и неорганических порообразователей ячеистого теплоизоляционного строительного стекломатериала от их соотношения и свойств / В.А. Смолий, А.С. Косарев, Е.А. Яценко // Техника и технология силикатов. – 2015. – Т. 22, № 4. – С. 7-12.
10. Смолий В.А. Разработка составов и технологических параметров синтеза ячеистых теплоизоляционных строительных стекломатериалов с заданной плотностью / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, А.С. Косарев, Б.М. Гольцман // Стекло и керамика. – 2016. – № 6. – С. 22-25.
11. Машкин Н.А. Строительные материалы. Краткий курс: учеб. пособие – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2012. – 200 с.
12. Смолий В.А. Силикатный многослойный композиционный теплоизоляционно-декоративный материал / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, А.С. Косарев, Б.М. Гольцман // Научное обозрение. – 2017. – № 22. – С. 16-23.
13. Пеностекло (производство и применение) / Ф. Шилл: пер. с чеш. канд. техн. наук Г. М. Матвеева. - М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. – 307 с.
14. Казьмина О.В. Пеностеклокристаллические материалы на основе природного и техногенного сырья / О.В. Казьмина, В.И. Верещагин, А.Н. Абияка. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2014. – 245 с.
15. Смолий В.А. Математическое планирование при оптимизации режимов синтеза ячеистого теплоизоляционного стекломатериала / В.А. Смолий, А.С. Косарев, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, Н.А. Вильбицкая // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2017. – № 1 (193). – С. 80-85.
16. Смолий В.А. Исследование спектрофотометрических характеристик декоративного слоя многослойного силикатного композиционного теплоизоляционно-декоративного материала / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, А.С. Косарев, Л.В. Климова // Техника и технология силикатов. – 2017. – № 4. – С. 23 – 28.
17. Смолий В.А. Зависимость теплоизоляционных и прочностных свойств легкого бетона от фракционного состава пористого заполнителя / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев // Экология промышленного производства. – 2017. – № 4. – С. 13 – 15.
18. Смолий В.А. Разработка технологии производства эффективного энергосберегающего ячеистого теплоизоляционного строительного стекломатериала / В.А. Смолий, А.С. Косарев, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. – 2015. – № 4 (185). – С. 128 – 132.
19. Смолий В.А. Влияние гранулометрического состава шихты на технологические и физико-химические свойства гранулированного пористого силикатного заполнителя / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев // Стекло и керамика. – 2017. – № 8. – С. 12-14.
20. Смолий В.А. Исследование спектрофотометрических характеристик декоративного слоя силикатного композиционного теплоизоляционно-декоративного материала / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, А.С. Косарев, Л.В. Климова // Техника и технология силикатов. – 2017. – Т. 24, № 4. – С. 23-28
21. Смолий В.А. Физико-химические закономерности низкотемпературного автоклавного синтеза многослойного силикатного композиционного теплоизоляционно-декоративного материала / В.А. Смолий, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев, Е.А. Яценко // Экология промышленного производства. – 2018. – № 3 (103). – С. 24-26.
22. Smolii V.A. Structure Formation in Cellular Glass Based on Novochoerkassk CHPP Ash-Slag Wastes /. V.A. Smolii, A.S. Kosarev, E.A. Yatsenko, B.M. Gol'tsman // Glass and Ceramics. – 2018. – Vol. 75, № 7-8. – P. 249-253.
23. Ryabova A.V. Protection of steel pipelines with glass-enamel coatings based on silica-containing raw materials of the far east of Russia / A.V. Ryabova, E.A. Yatsenko, L.V.

Klimova, B.M. Goltsman, A.Yu. Fanda // International Journal of Mechanical Engineering and Technology – 2018. –Vol. 9, Issue 10, –P. 769–774

24. Yatsenko E.A.; Goltsman B.M.; Smoliy V.A.; Yatsenko L.A. Perspective and Experience of Use of Glass Fraction of Solid Municipal Waste in the Production of Silicate Heat-Insulating Materials / E.A. Yatsenko; B.M.

Goltsman; V.A. Smoliy; L.A. Yatsenko // 2018 IEEE International Conference "Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development" (WASTE). – 2018. – P. 46-48
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8554153>

Physical-chemical Studies and Evaluation of the Suitability of Chernoyarskoe Deposit's Diatomite for the Synthesis of Foam Glass

Yatsenko E.A., Smoliy V.A., Chumakov A.A.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)"
Novocherkassk, Russia
e_yatsenko@mail.ru; vikk-toria@yandex.ru

Abstract. The macro- and microstructure is investigated by microscopic analysis methods. The elemental, granulometric and mineralogical composition of diatomite of the Chernoyarskoe deposit is determined. As a result of complex thermal analysis using a differential scanning calorimeter, intervals of continuous dehydration of diatomite were studied, as well as polymorphic transformations of quartz and other minerals. Physical-chemical methods of

research have discovered that diatomite of the Chernoyarskoe deposit contains amorphous silica, quartzite, clay impurities, opal and minor amounts of calcite, mica, zeolite, and so this diatomite is a promising raw material for the synthesis of foam glass.

Keywords: diatomite, raw materials, foam glass, chemical composition, structure.

Экспериментальные исследования над моделями аналога лунного реголита

Кузнецов В.А., Кот А.В.
Московский политехнический университет
Москва, Россия
rensi@mail.ru, andrey.cot@gmail.com

Сапрыкин О.А.
Институт геохимии и аналитической химии РАН
Москва, Россия
o.saprykin2018@yandex.ru

Аннотация. В статье приведены результаты проведения натуральных экспериментальных исследований над аналогом лунного реголита, включая нахождения его гранулометрического состава и физико-механических свойств для сравнения с показателями оригинала. Установлено, что основной диапазон размеров частиц аналога находится в таких же пределах, как у лунного реголита. Физико-механические свойства ЛГА-3 схожи с лунным реголитом. Данная смесь ЛГА-3 возможно использовать для дальнейших технологических исследований в качестве земного аналога лунного реголита. В качестве технологических методов консолидации конструкций из реголита предлагаются селективное лазерное сплавление, а также микроволновое и электроимпульсное спекание.

Ключевые слова: луна, реголит, аналог, гранулометрический состав, физико-механические свойства, селективное лазерное сплавление, микроволновое и электроимпульсное спекание.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сформированы задачи по освоению космических объектов и производства, на самом объекте, необходимой инфраструктуры, таких как жилые модули и дорожное покрытие. При строительстве лунной базы использование стандартных технологий неэффективно, ввиду принципиальных различий, как с экономической стороны, так и с эксплуатационной. Доставка грузов на Луну сегодня более чем в 10 раз дороже доставки грузов на низкую околоземную орбиту (НОО) и в три раза дороже доставки на околоземные астероиды группы NEA. [1] Исходя из этого, возникает задача по исследованию возможности повышения экономичности и снижении затрат на транспортировку строительных материалов.

Таким образом, использование космического материала, в качестве строительного, способно изменить концепцию технологического обеспечения лунной программы. Для дальнейшего исследования данного вопроса необходимо знать его структуру и физико-механические свойства. Однако дальнейшая практическая проверка невозможна из-за сложности получения реального образца лунного реголита. Экспериментальные исследования будут производиться на материале аналоге реголита российского производства с последующим сравнением характеристик.

РЕГОЛИТ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРИГИНАЛА И ЕГО АНАЛОГА.

Реголит - несцементированный продукт дробления и переотложения лунных пород, сплошным слоем покрывающий поверхность Луны. Реголит состоит из обломков лунных пород и минералов размером от пылевых частиц до

нескольких метров в поперечнике, стёкол, литифицированных брекчий, фрагментов метеоритов и т. д. [2]

В результате литературного поиска информации о физико-механических свойствах реголита были получены и обобщены данные, указанные на рис. 1 [3] и в табл. 1 [4].

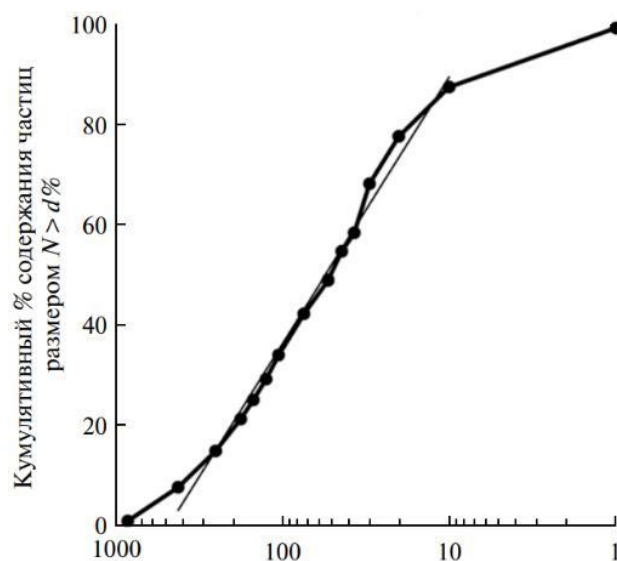


Рис. 1. Кумулятивное весовое содержание частиц больше заданного размера ($N > d$) в %, в зависимости от их размера по суммарным данным для 21 образца реголита, доставленного экспедицией Apollo-17. Тонкой сплошной линией показана аппроксимирующая кривая распределения частиц в диапазоне размеров от 420 до 10 мкм

По гранулометрическим характеристикам типичный лунный реголит представляет собой плохо отсортированный песчано-алевритовый грунт с примесью щебня и глыб. Медианный размер частиц (средний размер частиц, разделяющий образцы реголита на две равных по весу фракции) изменяется в пределах от 40 до 130 мкм со средним значением 70 мкм (Carriger, 1973). [4]

На основе результатов исследований из статьи [3] были определены основные физико-механические свойства лунного реголита и показаны в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства лунного реголита

| Материал | Плотность сухого грунта, г/см ³ | Пористость, % | Кэф. пористости, д.е. | Уплотняемость, д.е. |
|----------------|--|---------------|-----------------------|---------------------|
| Лунный реголит | 3,1 | 45 | 0,86 | 1.00 |

В качестве материала аналога реголита была выбрана разработанная в лаборатории геохимии Луны и планет ГЕОХИ РАН смесь ЛГА-3. Дальнейшее исследование материала аналога проводилось на оборудовании Fritsch Analysette 22 NanoTec Plus. Результатом исследований представлены на рис. 2.



Рис. 2. Дифференциальная и интегральная кривые гранулометрического состава смеси лунного грунта-аналога ЛГА-3

Таблица 2

Физико-механических свойств смеси ЛГА-3

| Материал | Плотность сухого грунта, г/см ³ | Пористость, % | Кэф. пористости, д.е. | Уплотняемость, д.е. |
|----------|--|---------------|-----------------------|---------------------|
| ЛГА-3 | 1,25 | 48,9 | 0,96 | 1,28 |

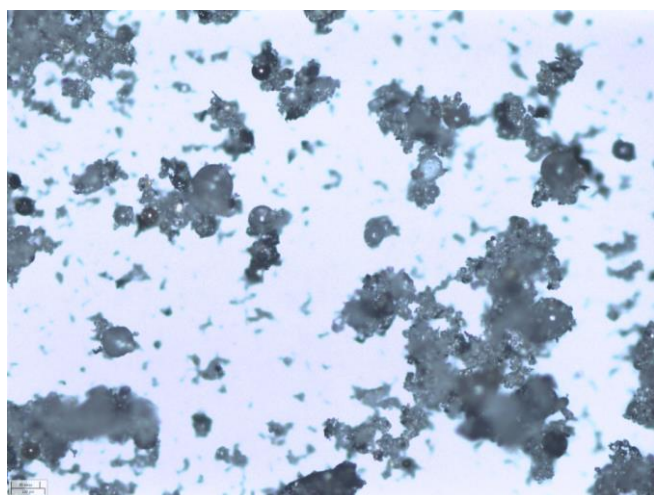


Рис. 3. Фотография порошка аналога реголита.

Исследования порошков методом оптической микроскопии показывает, что образец порошка состоит из частиц весьма близкой к сферической форме с преобладающим

диаметром около 10 – 15 мкм. Около 15% сферических частиц имеют диаметр до 30 – 50 мкм. Поверхность сферических частиц гладкая, блестящая. Изображение с микроскопа представлены на рисунках 2 и 3. Значительная часть мелких частиц объединены в сцементированные конгломераты неправильной формы различного размера (рис.3). Встречаются неизометричные частицы размером до 500 мкм (что характерно и для реголита), например на рис 4.

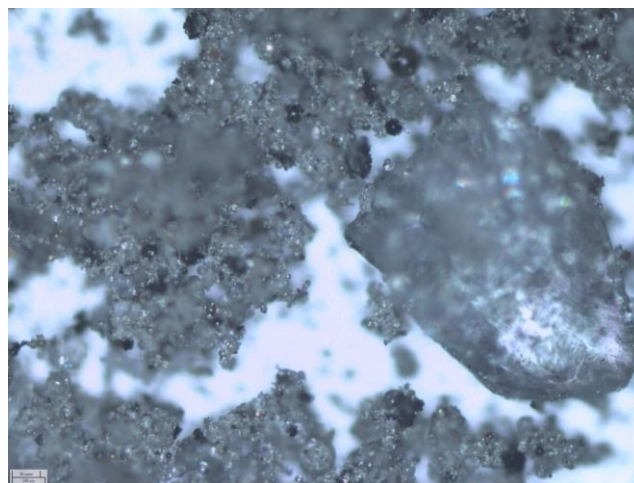


Рис.4. Фотография порошка аналога реголита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1 По данным гранулометрического анализа основной диапазон размеров частиц аналога находится в пределах от 30 до 100 мкм, что характерно и для реголита.
- 2 Физико-механические свойства ЛГА-3 схожи с лунным реголитом.
- 3 Смесь ЛГА-3 возможно использовать для дальнейших технологических исследований в качестве земного аналога лунного реголита.

В качестве технологических методов консолидации конструкций из реголита можно предложить селективное лазерное сплавление, микроволновое и электроимпульсное спекание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майборода А.Д. База на Луне // Техника-молодёжи. – 2017. – №14. – С. 24–30.
2. Реголит: петрографический словарь / ред. В. П. Петров, О. А. Богатиков, Р. П. Петров. – М.: Недра, 1981. – 351 с.
3. Слюта Е.Н. Физико-механические свойства лунного грунта (обзор) // Астрономический вестник. – 2014. – №6. – 366 с.
4. Слюта Е.Н. Физико - механические свойства лунного грунта (обзор) // Астрономический вестник. – 2014. – №6. – С. 358-382.

Experimental Studies of the Properties of the Analogue of the Lunar Regolith

Kuznetsov V.A., Kot A.V.
Moscow Polytechnic University
Moscow, Russia
rensi@mail.ru, andrey.cot@gmail.com

Saprikin O.A.
Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia
o.saprykin2018@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of full-scale experimental studies on the analogue of the lunar regolith, including finding its particle size distribution and physico-mechanical properties for comparison with the original. It is established that the main range of analog particle sizes is in the same range as that of the lunar regolith. Physical and mechanical properties of LGA-3 are similar to lunar regolith. This mixture of LGA-3 can be used for further technological research as a terrestrial analogue of the

lunar regolith. Selective laser fusion, as well as microwave and electric pulse sintering, are proposed as technological methods for consolidating regolith structures.

Keywords: moon, regolith, analogue, particle size distribution, physicomachanical properties, selective laser fusion, microwave and electropulse sintering.

Исследование возможностей применения продувочных методов для изготовления литейных стержней из смесей на основе вторичных полимеров и технических лигносульфонатов

Свинороев Ю.А., Терновский О.А.
Каменский институт (филиал), ЮРГПУ(НПИ)
им. М.И. Платова
Каменск-Шахтинский, Россия
desna.us@yandex.ru, terol2005@mail.ru

Дядичев В.В.
Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
mr.dyadichev@mail.ru

Аннотация. В работе исследована возможность применения в качестве связующих технических лигносульфонатов для изготовления продувочными методами мелких литейных стержней при производстве фасонного чугуна, по аналогии с доминирующим в настоящее время Cold-Box Amin процессом. Показано, что преимуществом лигниновых материалов является их безопасность, проявляемая как на рабочих местах, непосредственно в литейном цеху, так и в обеспечении экологической чистоты в районе расположения предприятия с подобным производством. Указано, что при переходе на предлагаемые лигниновые материалы цена связующих может снизиться на два порядка (с 375 руб. за кг до нескольких десятков рублей, с учетом модифицирования). Предложены экспериментальные составы смесей и проведены их испытания. Установлены количественные характеристики состава песчанолигносульфонатной смеси. По итогам произведена опытная партия стержней, изготовлены качественные фасонные чугунные отливки. Акцентировано особое внимание на необходимость разработки специализированного оборудования, ориентированного на лигниновые связующие.

Ключевые слова: литейный стержень, технические лигносульфонаты, Cold-Box Amin процесс, связующая способность, стержневые смеси, песчанолигносульфонатные смеси, продувочные методы, технологическое оснащение процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее универсальной и старейшей технологией формообразования в машиностроении является литейное производство. В мире, в общем объеме выпуска продукции, на долю отливок в автомобилестроении приходится 8-10%, в тракторостроении – 15-18%, в сельхозмашиностроении, в целом, - 15-20%, а в двигателестроении доля литья доминирует, составляя 70-80% [1], при этом, указанные показатели неуклонно увеличиваются [2].

Иллюстративным является показатель производства отливок в промышленно развитых странах мира: так в США, в 2018 г., этот показатель, в стоимостном выражении, составит 33 миллиарда долларов, при ожидаемом росте производства на 4,7% 2017-2018 и роста 1,8% в 2018-2019 годах. [3], в Германии наблюдаются аналогичные тенденции [4].

Перечисленное, сопровождается ростом требований к качеству отливок [1, 5], усложнению их конструкции, при соблюдении жестких экологических нормативов [6].

За последние 30 лет допуски и припуски на отливки были снижены в 1,5 – 2,0 раза, металлоемкость отливок уменьшилась на 10-20% [1], по некоторым видам этот показатель доходит до 30% [3], что достигается применением разнообразных инновационных методов (литье композиционных материалов).

Дальнейшее развитие литейной отрасли выдвигает новые императивные требования к технологическим процессам, состоящие в создании безопасных, но эффективных технологий на базе накопленного практического опыта и современных научных представлений о физико-химических явлениях, происходящих в процессе производства, с интеграцией инновационных разработок в смежных областях.

АКТУАЛЬНОСТЬ

В настоящее время актуальной является проблема технологически эффективного производства качественных отливок, при минимальной стоимости процесса с приемлемым уровнем выбросов, определяющих безопасность труда на рабочих местах и экологическую обстановку в районе нахождения производства.

Отличительным признаком технологий литья является использование литейных стержней, которые формируют внутренние поверхности тела отливки в процессе ее производства. Указанные элементы изготавливаются из разовых песчаных смесей, представляющих из себя композитный материал, где в качестве наполнителя используется кварцевый песок, а в качестве связующего, как правило, различные смоляные материалы. Именно литейный стержень является доминирующим фактором в обеспечении качества будущей отливки, это: размерная точность, чистота поверхности, наличие газовых раковин и ситовидной пористости в теле отливки, и многие другие показатели определяющие качество. Такое влияние стержней на качество неизменно подчеркивается в разнообразных научных изданиях на протяжении всего периода развития литейного производства, ставшим предметом научных исследований, как в ранние его периоды [7, 8], так и сейчас [5, 9], особое внимание уделяется вопросам безопасности [10].

Технологическая эффективность производства литейных стержней обеспечивается применением продувочных

технологий их изготовления, сочетающих производительность процесса, с высоким качеством, производимых таким образом стержней, обеспечивающих высокое качество отливок. Примером подобного может служить Cold-Box Amin процесс [1, 11]. Однако, не смотря на его тотальное доминирование в современном литейном производстве, о чем свидетельствуют публикации [12, 13, 14], где отмечается возможность изготовления отливок для ракетных двигателей по данной технологии [15], он имеет ряд существенных недостатков. Их содержание состоит в двух основных моментах:

Во-первых, высокой стоимости исходных связующих, применяющихся в процессе. Этот показатель может колебаться в пределах 3,5 – 5,0 евро за кг. связующего (262,5 – 375,0 руб. за кг), и выше, при обеспечении специальных требований по прочности, выбиваемости и т.п. в то время как цена лигносульфонатов составляет 4,5 – 6,0 руб. за кг.

Во-вторых, в повышенной опасности их применения, как для рабочих непосредственно на производстве, так и для района, где расположено предприятие с подобным производством. Причиной тому является природа связующей композиции применяемой в процессе. Связующая система состоит из трех компонентов: компонент А – фенольная смола – вещества первого и второго классов опасности; компонент В – полиизоцианаты – вещества первого класса опасности (к гомологическому ряду этих веществ можно отнести цианистый натрий и цианистый калий), третий компонент, газообразный катализатор – третичные амины, являющиеся канцерогенами, относящиеся к первому классу опасности.

Более детальное знакомство с токсикологией применяемых катализаторов в Cold-Box Amin процессе позволяет констатировать, что амины являются очень токсичными веществами. Опасно как вдыхание их паров, так и контакт с кожей. Амины, например, анилин, способны всасываться через кожу в кровь и нарушать функции гемоглобина, что может привести к летальному исходу. Симптомами отравления крови амином являются посинение кончиков пальцев, носа, губ, одышка, учащенное дыхание и сердцебиение, потеря сознания [16].

Алифатические амины, именно которые и применяются в рассматриваемом процессе, поражают нервную систему, вызывают нарушения проницаемости стенок кровеносных сосудов и клеточных мембран, функций печени и развитие дистрофии [17]. Ароматические амины вызывают образование метгемоглобина, угнетающего центральную нервную систему. Некоторые ароматические амины — канцерогены, способные вызвать рак мочевого пузыря у человека [18]. В работе [19] показано, что даже в малых дозах, при регулярном длительном воздействии, амины оказывают вредное влияние на организм человека, это проявляется в разнообразных аллергических заболеваниях, хронической астме, склонности к опухолевым заболеваниям.

Несмотря на это, благодаря технической оснащенности процесса, накопленному, за истекшие полвека, опыту применения в литейном производстве, именно Cold-Box Amin процесс является основным при производстве мелких и средних стержней при производстве отливок. В тоже время, современные требования к безопасности производ-

ственных процессов принятых в странах Европейского союза [6], делают актуальным поиск альтернатив. К ним можно отнести разработки касающиеся применения лигнинно-содержащих связующих материалов, таких как технические лигносульфонаты (ЛСТ). Подобные технические решения описаны в работах [20, 21], при условии создания соответствующего технологического оборудования, описанного, например, в работе [22], можно было бы создать процесс аналогичный Cold-Box Amin. В этой связи целесообразно провести адаптивные поисковые эксперименты с целью определения принципиальной возможности или не возможности таких технических решений.

В плане безопасности, применение лигнинных продуктов является экологичным, как в контексте указанных перспективных разработок [23], так и в целом по классу лигниносодержащих веществ в целом [24, 25].

Особую остроту, для России, этот вопрос имеет в силу того, что связующие для обеспечения Cold-Box Amin процесса, хотя и производятся в Нижнем Тагиле, на комбинате "Уралхимпласт", но сырьем являются импортные материалы. Доля импорта составляет 98 - 100% [2]. В противоположность этому, ЛСТ и лигнинные материалы вообще имеют отечественную ресурсную базу, вовлечение их в промышленное производство может служить образцом ресурсосбережения [26], импортозамещения [27] и создания новых рабочих мест на российских предприятиях.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Учитывая изложенное, целесообразно исследовать принципиальные возможности применения связующих на основе технических лигнинов для изготовления литейных стержней продувочными методами формообразования и отверждения, обеспечивающими высокую размерную точность стержней, их быстрое отверждение, и достаточную манипуляторную прочность.

Технические лигнины, представленные на рынке материалов России техническими лигносульфонатами (ЛСТ), обладают комплексом преимуществ: низкой стоимостью, с отсутствием тенденций к удорожанию; производятся из возобновляемого растительного сырья в России; экологически безопасны на всех переделах их применения.

Целью исследований является определение/оценка технологических параметров, при которых возможно их применение в качестве связующего материала в производстве отливок.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Фактором сдерживания применения лигниносодержащих веществ (в частности ЛСТ) в качестве связующих материалов в литейном производстве является их низкая связующая способность и нестабильность свойств. Целесообразно рассмотреть теоретические предпосылки возможности повышения прочностных характеристик ЛСТ.

В теоретическом плане, смысл задачи повышения связующей способности ЛСТ состоит в определении и создании таких условий, которые бы приводили к образованию прочной сшивки между полимеризующимися компонентами материала, и к образованию трехмерной полимерной матрицы после отверждения. Именно такое состояние

структуры полимера соответствует максимальной связующей способности материала.

Поскольку связующую способность материала определяем по прочности стандартных "образцов – восьмерок", то для понимания возможных путей ее увеличения необходим полный анализ факторов, которые могут повлиять на этот показатель на всех этапах процесса. Сюда входят операции дозировки связующего, при приготовлении смеси, формовка, сушка.

Учитывая это, в общем случае, повышение связующей способности может быть достигнуто за счет целенаправленного комплекса мероприятий, которые могут включать в себя:

- оптимизацию состава связующего и режимов смешивания, что приведет к равномерному распределению связующего по составу смеси и образованию равномерных пленок на зернах наполнителя;
- оптимизацию режимов уплотнения и формовки;
- подбор веществ, способствующих образованию поперечных сшивок между олигомерными цепями лигносульфоновых кислот в процессе отверждения, т.е. отвердителей ЛСТ, которые бы вводились либо дополнительно, либо выступали как часть стабилизационного комплекса;
- выбор и применение катализаторов;
- оптимизацию режимов сушки (продолжительность, температура).

Конкретизируя задачу, в части изменений непосредственно свойств ЛСТ, необходимо акцентировать внимание на значимость методов модифицирования. Их смысл, в общем случае, состоит в целенаправленном внесении в состав материала специальных веществ, влияние которых приводит к изменению каких-либо свойств.

В классическом представлении процесс структурообразования лигносульфатных веществ идет в несколько последовательно-параллельных стадий [28, 29]. На начальном этапе, в стадии линейной конденсации формируются низкомолекулярные продукты, далее степень сшивки между макромолекулами увеличивается, образуются поперечные углерод-углеродные связи, степень обратимости связей таких структурных составляющих снижается, они способны к набуханию, но уже не растворимы в воде. На завершающих этапах процесса идет формирование трехмерной полимерной сетки, однако большая степень дифференциации молекулярно-массового состава не позволяет получить однородную полимерную матрицу. Наличие в исходном материале сочетаний очень крупных молекулярных агрегатов, с молекулярной массой в сотни миллионов единиц, и агрегатов, в несколько тысяч единиц, приводит к формированию итоговой полимерной матрицы не регулярной структуры. Такое исходное состояние предопределяет образование больших значений внутренних напряжений в образующейся конструкции полимера при отверждении. Интегральной характеристикой такого результата есть низкая прочность литейных стержней и форм.

Такое представление механизма структурообразования ЛСТ приводит к пониманию того, что мероприятия, проводимые для стабилизации свойств ЛСТ, повлияют и на улучшение их связующей способности, что, в свою очередь, теоретически создает предпосылки для расширения возможностей применения ЛСТ в процессах литья.

Учитывая современные тенденции в технологических процессах производства отливок, целесообразно исследовать возможность применения лигносульфатных материалов в продувочных методах формования литейных стержней. Суть подобных методов состоит в том, что по заданной рецептуре в смесителях или бегунах изготавливают смесь, подают в бункер пескострельной машины, выстреливают под давлением в полость стержневого ящика и продувают газом.

В процессе продувки происходит отверждение, так что извлекаемый из ящика стержень готов к применению. В случае обеспечения Cold-Vox Amin процесса продувка осуществляется третичными аминами, в случае смесей на лигносульфонатной основе, в качестве такого газа предлагается опробовать горячий воздух.

В соответствии ранее эмпирически установленным зависимостями [21], предложено принять для проверки на принципиальную возможность осуществления продувочного процесса на смесях с ЛСТ, модификатор из класса неионогенных поверхностно-активных веществ (НПАВ). Количество модификатора в связующем комплексе составляло 5 массовых частей, от количества ЛСТ, что соответствовало оптимальному для него соотношению [21].

Сравнение производили со стандартным составом для Cold-Vox Amin процесса, рекомендуемый производителем комбинатом "Уралхимпласт". В экспериментах использовали материалы производства этого комбината. В качестве наполнителя использовали кварцевый песок марки К02Б, лигносульфонат производства Сокольского ЦБК, в соответствии ТУ 2455-028-00279580-2004. Составы экспериментальных смесей и условия их отверждения приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Составы экспериментальных смесей и условия их отверждения

| Номер состава | Компонентный состав, в количестве массовых частей (м.ч.) | Условия отверждения |
|---------------|--|--|
| 1 | Cold-Vox Amin процесс, соотношение компонента А и компонента В - 50:50 1. Компонент А – 0,9 м.ч. 2. Компонент В – 0,9 м.ч. 3. Остальное наполнитель | Отверждение продувкой третичными аминами, в соответствии с условиями завода производителя (Уралхимпласт) |
| 2 | Смесь на основе ЛСТ модифицированных НПАВ (ЛСТМ) 1. ЛСТМ – 3,2 м.ч. 2. УСК – 0,6 м.ч. 3. Остальное наполнитель | Отверждение продувкой горячим воздухом, с температурой 180 °С |
| 3 | Тоже что в составе 2 | Отверждение продувкой горячим воздухом, с температурой 180°С, с последующей вентиляцией продуктов поликонденсации воздухом имеющим комнатную температуру |

Компоненты приготавливаемых составов смесей имели температуру 20°С, при влажности наполнителя 0,1%, и показателе рН равному 7 единицам.

Приготовление песчано-смоляной смеси осуществляли в следующем порядке: в катковый смеситель, бегуны, за-

сыпали песок, перемешивали в течении минуты, затем добавляли компоненты связующего. Вначале компонент В, с перемешиванием в течении минуты, затем компонент А с таким же временем перемешивания.

Для приготовления лигносульфонатных смесей, первоначально производили модифицирование ЛСТ, из соотношения 5 массовых частей модификатора, 95 массовых частей ЛСТ. После этого готовили соответствующие рецептуре навески материала, и готовили смесь.

Приготовление песчано-лигносульфонатной смеси осуществляли в таком порядке: в смеситель засыпали песок, перемешивали в течении минуты, затем дозировали связующее, модифицированные ЛСТ, перемешивали в течении 3 минут, затем смесь выпускалась и подавалась в бункер пескострельной машины со стержневым ящиком для получения стандартных образцов-восьмерок.

Продувку и получение образцов проводили по следующему режиму: давление в ресивере сжатого воздуха составляло 0,25 МПа, время продувки третичными аминами составляло 5 сек., время вентиляции ящика подогретым воздухом 3с. Доза катализатора соответствовала нормативам.

Получение образцов из смесей на лигносульфонатной основе производили аналогичным образом, с той разницей, что не использовались третичные амины, а вместо них применялся подогретый до температуры 1800С воздух, в случае состава 3, проводилась вентиляция воздухом комнатной температуры.

Изготовленные образцы испытывали на разрыв по методике в соответствии ГОСТ 23409.7-78. Изготовленные, таким образом образцы, испытывали через 0,5; 1; 3 и 24 часа после изготовления. По пять образцов из каждого из испытываемых составов смесей.

Результаты испытаний представлены на рис. 1.

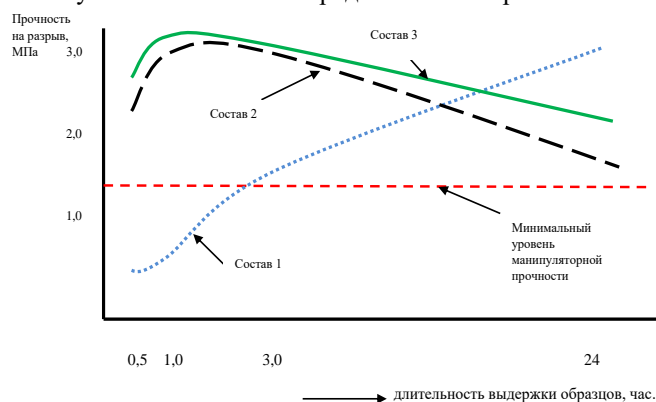


Рис. 1. Результаты испытаний смесей, кривая 1 – по Cold-Box Amin процессу, кривая 2 – для смесей с ЛСТМ с продувкой горячим газом, кривая 3 - для смесей с ЛСТМ с продувкой горячим газом и последующей вентиляцией воздухом

Результаты показали принципиальную возможность применения песчано-лигносульфонатных смесей модифицированных НПВА для применения в производстве литейных стержней продувочными методами формообразования.

Как видно из результатов, процессы структурообразования в разных системах (Amin и лигнин) носят принципно-

ально разный характер: в случае с Amin-процессом, полимеризация запускается в момент продувки катализатором, а в случае с лигнин-процессом протекают процессы поликонденсации с образованием продуктов реакции требующих удаления из системы, например, вентилированием тела стержня воздухом, имеющим комнатную температуру.

По результатам проведенных адаптивных экспериментов была изготовлена опытно-промышленная партия мелких песчаных стержней (см. рис. 2), по условиям отверждения состава 3 (см. табл. 1).



Рис 2. Стержни для производства фасонного чугуна, полученные по продувочной технологии из песчано-лигносульфонатной смеси

Полученные стержни были использованы для производства мелкого фасонного чугуна. Отливки имели чистую поверхность, без какого-либо следа пригара. Стержни после заливки высыпались из полости отливки, что исключало какие-либо трудности с выбивкой и очисткой на этапе финишных операций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Проведенный комплекс исследований показал принципиальную возможность применения лигниносодержащих материалов для применения в смесях, предназначенных для изготовления литейных песчаных смесей при производстве мелкого чугуна.

Установлены концентрационные границы содержания лигносульфонатного связующего в смеси (3,2 м.ч.).

В составе экспериментальных смесей использовались лигносульфонаты, продукты отечественного производства, отличающиеся низкой стоимостью, экологической чистотой и безопасностью в процессе применения.

Установлено, что смеси на основе ЛСТ могут заменить связующие используемые в Cold-Box Amin процессе, что в перспективе может комплексно решать проблемы ресурсоэффективности и импортозамещения. В контексте эффективности: снизить себестоимость литья за счет замены дорогостоящих импортных материалов более дешевыми отечественными. В контексте безопасности: изъять из технологического цикла источники генерирования вредных выбросов.

Разработка требует дальнейших исследований в аспектах оптимизации составов стержневой смеси, их фрагментации для целевого использования по отдельным группам отливок, в зависимости от их сложности (габаритные размеры, масса), вида используемого для производства отливки сплава, требований к качеству литья.

Особое внимание следует уделить вопросам, связанным с технологическим, инструментальным и машинным обеспечением исследованного процесса применения песчано-лигносульфонатных смесей. Целесообразно развивать установленные в данной работе возможности в смесей на лигнинной основе в контексте адаптации "железа" (специализированных инструментов, оборудования, машин) под условия обеспечивающие оптимальные характеристика процесса структурообразования лигнинных связующих композиций, по примеру развития и распространения доминирующего сейчас в данной области производства Cold-Box Amin процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников А.П. Современные тенденции развития технологии в литейном производстве/ А.П. Мельников, Д.М. Кукуй// *Литье и металлургия*. – 2018. - №3 (47). - С. 65-80.
2. Дибров И.А. О проведении XIII международного съезда литейщиков и международной выставки "Литье - 2017" // *Литейщик России* (Челябинск, 19-21 сентября 2017 г.). – Челябинск, 2017. – № 10. – С. 7-14.
3. 2018 Forecast: U.S. Casting Sales to Reach \$33 Billion, A Modern Casting Staff Report: Modern Casting, 2018. - pp. 22-27
4. Попов А. Анализ литейного производства Германии на базе опыта последних проектов Laempe // *Литейщик России*. – 2014. - № 5. - С. 32-37.
5. Батышев А.И. Образование в стальных отливках горячих трещин в зависимости от условий затвердевания Часть III / А.И. Батышев, К.А. Батышев// *Литейное производство* – 2017. - №10. – С. 23-27.
6. The Directive of the European Parliament and Council of the 24-th November 2010 concerning industrial emissions. - 2010.
7. Берг П.П. Качество литейной формы. – Москва: Машиностроение, 1971. – 291 с.
8. Жуковский С.С. Формы и стержни из холоднотвердеющих смесей. / С.С. Жуковский, А.М. Лясс. – Москва: Машиностроение, 1976. – 224 с.
9. Fundamentals of metallurgy. Edited by Seshadri Seetharaman. / Boca Raton Boston New York Washington, DC: Woodhead Publishing and Maney Publishing on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, CRC Press., 2005. – 574 p.
10. Ferrell R. Tracking Down Respirable Silica Exposure. / R. Ferrell, R. Scholz: Modern Casting, 2018. – P. 27-30.
11. Eseyin E. An overview of the applications of furfural and its derivatives Anthonia. / E. Eseyin, H. Philip// *International Journal of Advanced Chemistry.- USA: Steele Department of Sustainable Bioproducts, Mississippi State University*. – 2015. – 3 (2). – P. 42-47.
12. Доценко П. Н. Изготовление отливок в стержневых формах // *Литейщик России*. – 2009. – № 1. – С. 9–13.
13. Попов А. Модернизация литейного производства автомобильной промышленности Японии/ А. Попов// *Литейное производство*. – 2017. – № 4. – С. 36–37.
14. Попов А.М. Литье в стержнях на примерах мирового опыта фирмы "ЛАЕМРЕ" // *ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії*/ – 2010. – № 3 (20). – С. 147-151.
15. Дубровский В. А. Опыт изготовления отливок ракетного двигателя в стержневых пакетах/ В.А. Дубровский, И.А. Арбузов// *Литейное производство*. – 2002. – № 3. – С. 30–34.
16. Löfstedt H. Respiratory symptoms and lung function in foundry workers exposed to low molecular weight isocyanates. / H. Löfstedt, H. Westberg, A.I. Seldén, C. Lundholm, M. Svartengren// *American Journal of Industrial Medicine*. 2009. – is. 52, – P. 455-463.
17. Слюсарь М.П. Ароматические amino- и ниросоединения, Руководство по гигиене труда / под ред. Ф. Г. Кроткова, 2013. - т. 2 (издание 7). – Москва – 250 с.
18. Encyclopedia of occupational health and safety. Geneva: International labour office, 1971. – v. 1. –P. 91 – 93.
19. Löfstedt H. Respiratory symptoms and lung function in foundry workers using the Hot Box method – a 4-year follow-up. / H. Löfstedt, H. Westberg, A.I. Seldén, I.L. Bryngelsson, M. Svartengren // *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. – 2011 – is. 53. – P. 1425-1429.
20. Свинороев Ю.А. О потенциале применения лигносульфонатов в качестве связующих для технологических процессов литья / Ю.А. Свинороев, Р. Бэр, Ю.И. Гутько // *Литейное производство*. – 2016. – №12. – С. 30-33.
21. Svinoroev Yu. New ecological binder materials based on vegetative raw materials processing products/ Yu. Svinoroev, V. Kostrub, O. Klimova// *Teka commission of motorization and power industry in agriculture Lublin university of technology, Volodymyr Dal East-Ukrainian national university of Lugansk*. – Lublin, 2010. – Vol. XV, – P. 227 – 231.
22. Дядичев В.В., Дядичев А.В., Колесников А.В. Экструдер для переработки биологических и разнородных полимерных материалов // Патент на полезную модель России № 178123. 2018. Бюл. № 9.
23. Родіонов О.В. Формування екологічної безпеки підприємств регіону: монографія. / О.В. Родіонов, Ю.О. Свинороев. – Луганськ: видавництво "Ноулідж", 2011. –232 с.
24. Суворов Б.Л. Литейные связующие в массовом производстве: каталог. / Б.Л. Суворов, Р.И. Оглоблина, Е.С. Коравоев и др. – Свердловск: ВНИИОТ ВЦСПС, 1987. – 36 с.
25. Потоцкий Е.П. Учет сочетанного действия комплекса вредных факторов и анализ влияния производственного фактора химической природы на уровень профессионального риска / Е.П. Потоцкий, В.М. Фирсова, Е.А. Сахарова. // *Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия*. – 2018. – № 61 (1). – С.. 35-39.
26. Илларионов И.Е. О применении техногенных отходов в литейном производстве / И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2016. – Т.14, № 4. – С. 36-40.
27. Информационный ресурс, импортозамещение в России: <http://moneymakerfactory.ru/biznes-idei/biznes-nazameschenii-importa>.
28. Спасский А. Е. Повышение свойств смесей химической активацией лигносульфонатов // *Литейное производство*. – 1978. – №7. – С. 19-21.
29. Барамбойм Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений – Москва: Химия, 1971. – 364 с.

The Research of Possibilities of Using Purge Methods for the Manufacture of Casting Cores from Mixtures Based on Secondary Polymers and Technical Lignosulphonates

Svinoroev Y.A., Ternovskiy O.A.
Kamensky Institute (branch) URGPU (NPI)
they. M. I. Platov
Kamensk-Shakhtinsky, Russia
desna.us@yandex.ru, terol2005@mail.ru

Dyadichev V.V.
V.I. Vernadsky Crimean Federal University
Simferopol, Russia
mr.dyadichev@mail.ru

Abstract. The work investigated the possibility of using the technical lignosulfonate as a binder for the manufacture of small cores by blow-off methods in the production of shaped cast-iron casting, similar to the dominant at the present time Cold-Box-Amin process. It is shown that the advantage of lignin materials is their safety, manifested both in the workplace - directly in the foundry, and in ensuring environmental cleanliness in the area of the location of such production. It is indicated, that when switching to the proposed lignin materials, the price of binders can be reduced by two orders of magnitude (from 375 rubles per kg to several tens of rubles, taking into account the modification). Experimental compositions of mixtures are proposed and their tests are

carried out. The quantitative characteristics of the composition of the sand-oligosulfonate mixture are established. As a result, a pilot batch of rods was produced and high-quality shaped cast iron castings were made. Special attention is paid to the demand for develop the specialized equipment, focused on lignin binders.

Keywords: casting core, technical lignosulphonates, Cold-Box-Amin process, binding capacity, core mixtures, sand-oligosulfonate mixtures, purging methods, technological equipment of the process.

Изготовление деталей методом холодной штамповки

Герасимова А.А., Дмитриев В.А.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Москва, Россия

allochka@rambler.ru, dmitrievsla@gmail.com

Аннотация. В работе был проведен анализ существующих технологий изготовления деталей холодной штамповки, разработаны возможные варианты изготовления детали методом холодного выдавливания, были построены 3D-модели переходов вариантов технологии, а также конечно-элементное моделирование возможных вариантов технологии. На основе результатов моделирования, а также на основе аналитических расчетов были определены параметры технологического процесса, которые позволили подобрать соответствующее оборудование и спроектировать конструкцию штамповой оснастки. Технологический процесс одностороннего выдавливания состоял из трех операций: прямого выдавливания стержня, высадки фланца и выдавливания профиля. Для первых двух операций есть возможность применения многопозиционного штампа. Формование осуществлялось в штампе на прессе двойного действия. При применении плавающей матрицы будет возможным изготовить деталь на гидравлическом прессе простого действия.

Ключевые слова: штамповка, оснастка, матрица, моделирование, технологический процесс, наклеп, деталь.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач современной технологии машиностроения является повышение точности и качества заготовок. Наиболее полно эта задача реализуется при использовании процессов, основанных на холодной пластической деформации. К числу наиболее прогрессивных процессов, основанных на холодной пластической деформации, относится холодная объемная штамповка [1-5].

Холодная объемная штамповка является одним из наиболее производительных методов изготовления деталей из сталей, цветных металлов и их сплавов с высокой пластичностью. Этот метод широко применяют в машиностроении, приборостроении и других отраслях металлообрабатывающей промышленности [6-11].

Применение этой технологии позволяет изготавливать детали особо сложных форм, которые невозможно получить, используя другие методы обработки. Формовка металла без разрушения его целостности позволяет увеличить коэффициент использования материала до 95 % даже для деталей сложной конфигурации [12-16].

Такая обработка осуществляется в несколько операций, что обеспечивает постепенное и последовательное изменение формы: от изначальной формы заготовки до требуемой формы изделия. В процессе металлообработки происходит упрочнение материала и снижение его пластичности. Для увеличения пластичности и уменьшения сопротивления последующим деформациям применяют межоперационные отжиги.

Высокое сопротивление деформации приводит к увеличению числа штамповочных переходов, снижению стойкости штамповой оснастки, требует применения технологических смазок, и оборудования повышенной мощности, что приводит к ощутимым первоначальным вложениям в данный метод обработки металла давлением. Затраты должны компенсироваться большей производительностью и возможностью автоматизации [17-19].

Одним из основных факторов, лимитирующих применение процессов холодной штамповки, является разрушение металла в процессе пластической деформации. В настоящий момент не существует общепризнанной методики прогнозирования разрушения металлов при больших пластических деформациях. Критериев разрушения, определяющих момент образования микротрещины или условия ее развития, существует большое количество [20].

Среди отечественных ученых наиболее гибкими и имеющими лучшее соответствие экспериментальным данным считается критерий разрушения В.Л. Колмогорова, учитывающий способность материалов к самозалечиванию дефектов при сложном напряженном состоянии, критерий Деля – Огородникова, учитывающий анизотропию накопления повреждений, и модель накопления поврежденности [21].

Для определения рационального варианта технологического процесса изготовления деталей методом холодного выдавливания сегодня можно эффективно проводить компьютерное моделирование.

Ниже приведены результаты моделирования одного из вариантов холодного выдавливания типовой детали. Для проведения расчета в программном комплексе QForm были приняты следующие технологические данные.

1. Геометрические контуры заготовки и инструментов импортированы из CAD.

2. Заготовка – пластическое тело, инструменты – упругое тело.

3. Оборудование – гидравлический пресс, скорость движения инструментов постоянна.

4. Начальная температура заготовки и инструмента - 20 °С.

5. Коэффициент трения $\mu=0,1$.

6. Моделировалась 1/8 заготовки.

7. Заданы параметры кривой упрочнения, механические и температурные свойства стали 20X [8].

Проведено твердотельное моделирование комплекта инструмента с заготовкой из стали.

Рассмотрены осесимметричные схемы пластической деформации, для этого прорисована половина сечения тел вращения “рис. 1”.

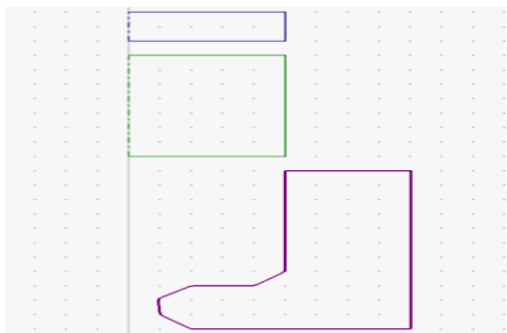


Рис. 1. Верхний инструмент, заготовка и нижний инструмент, модуль QDraft программы QForm

Далее выбрана схема деформации, тип оборудования, начальные температуры заготовки и инструмента, смазка, материал заготовки и инструмента, параметры расчета.

Для закрепления инструмента приняты граничные условия: матрица опирается на нижний торец, причем на опорной поверхности трение принято пренебрежительно малым “рис. 2”.

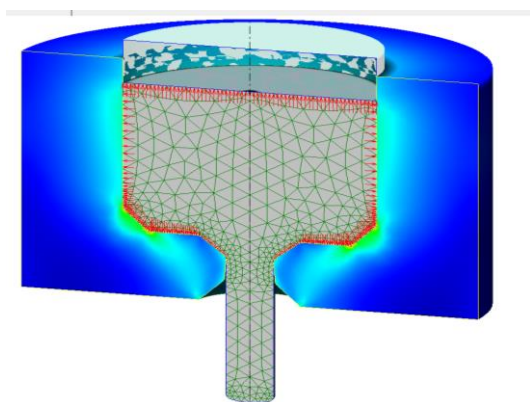


Рис. 2. Сетка конечных элементов и эквивалентных напряжений в матрице

Расчетные значения эквивалентных напряжений в матрице для такой высокой степени холодной деформации при выдавливании прутка могут превышать 5-7 тыс. МПа, что в несколько раз выше допустимых значений для инструментальных сталей, причем даже твердые сплавы, применяемые для сравнительно малых изделий, выдерживают не более 2500-3000 МПа. Моделированием получены поля перемещений тела матрицы и другие параметры “рис. 3” и “рис. 4”.

Опорная нижняя поверхность матрицы в этом виртуальном эксперименте закреплена с возможностью скольжения в радиальном направлении.

Из этого следует, что эквивалентные напряжения превышают допустимые значения, а матрица разрушится при первых циклах обработки. Обычными способами снижения нагрузок в полости матрицы являются увеличение толщины её стенки (рис. 4) и напрессовкой одного или нескольких бандажей “рис. 4”.

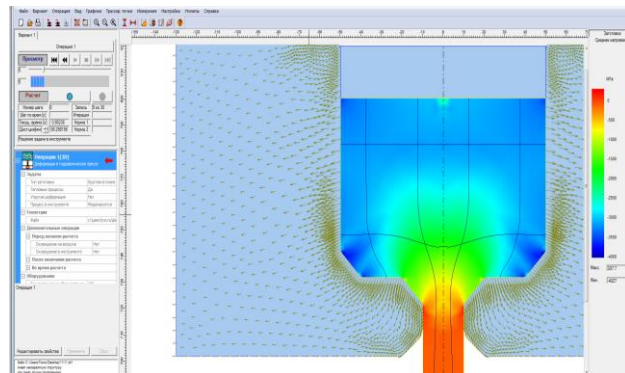


Рис. 3. Поле средних напряжений в металле при холодном выдавливании стали и упругие перемещения точек матрицы под нагрузкой

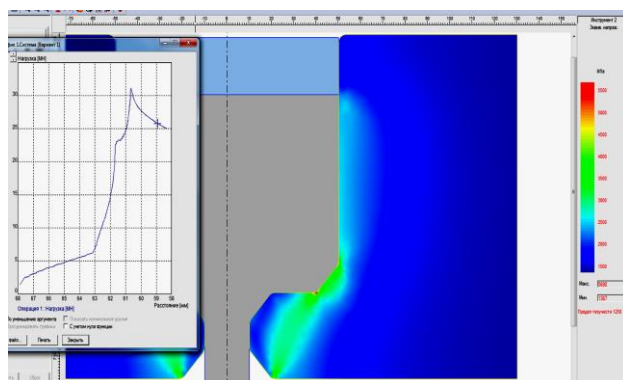


Рис. 4. Эквивалентные напряжения в матрице при двукратном увеличении толщины стенки

Из рисунка выше следует, что при увеличении стенки матрицы с 40 до 80 мм напряжения в ней снижаются до 5700 МПа, но и они значительно превышают допустимые значения. Применение предварительного напряженного конструкцией частично решает проблему прочности высоконагруженного инструмента, однако при широкой амплитуде циклических деформаций на внутренней поверхности матрицы происходит усталостное разрушение инструмента.

В результате проведенного конечно-элементного моделирования процессов холодного выдавливания, определены поля упругих деформаций и эквивалентных напряжений в высоконагруженных деталях оснастки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ возможных вариантов изготовления данной детали методом холодного выдавливания.
2. Технологический процесс одностороннего выдавливания состоит из трех операций: прямого выдавливания стержня, высадки фланца и выдавливания профиля. Для первых двух операций есть возможность применения многопозиционного штампа. Формование осуществляется в штампе на прессе двойного действия.
3. Одностороннее выдавливание может осуществляться за три перехода: прямого выдавливания стержня, высадки

фланца и выдавливания шестерни. При применении плавающей матрицы будет возможным изготовить деталь на гидравлическом прессе простого действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов Е.И. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 2007 – т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. 2007. – 384 с., ил.
2. Малов А.Н. Технология холодной штамповки. 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1969. – 568 с.
3. Навроцкий Г.А. Холодная объемная штамповка: справочник. – М.: Машиностроение, 1973. – 498 с.
4. Рагулин А.В. Принципы конструирования штампов для объемного выдавливания / А.В. Рагулин, А.С. Анюхин, Ю.К. Филиппов, А.В. Кононов // Известия МГТУ. – 2009. – №1. – С.151-156.
5. Герасимова А.А. Оптимизация технологии процессов обработки давлением. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 152 с.
6. Горбатюк С.М. Разработка рабочей модели процесса реиндустриализации производства термической обработки штамповых сталей / С.М. Горбатюк, И.Г. Морозова, М.Г. Наумова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. № 5. – С. 410-415.
7. Gerasimova A.A. Method of steel protection while hot-forming / A.A. Gerasimova, V.V. Devyatiarova, S.E. Kondratenko // Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace. – 2018. – Is. 10(1). – P. 17–21.
8. Николаева Е.А. Основы механики разрушения. – Пермь: Издательство Пермского государственного технического университета, 2010. – 103 с.
9. Воронцов А. Л. Теория штамповки выдавливанием: учеб. пособие: в 2 т. – М.: Машиностроение, 2004. – 721 с.
10. Bardovskiy A.D. Assessing Parameters of the Accelerator Disk of a Centrifugal Mill Taking into Account Features of Particle Motion on the Disk Surface / A.D. Bardovskiy, S.M. Gorbatyuk, A.M. Keropyan P.Y. Bibikov // Journal of Friction and Wear. – 2018. – vol. 39, is. 4. – P. 326-329.
11. Решетникова Е.С. Компьютерная графика в проектировании процесса холодной штамповки болтов с фланцем / Е.С. Решетникова, Д.Ю. Усатый, Т.В. Усатая // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т.4, №2. – С. 60-63.
12. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.
13. Лавриненко Ю.А. Объемная штамповка на автоматах: учеб. пособие / Ю.А. Лавриненко, С.А. Евсюков, В.Ю. Лавриненко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 259 с.
14. Gerasimova A. Application of Gas-Thermal Coatings on Low-Alloyed Steel Surface / A. Gerasimova, S. Gorbatyuk, V. Devyatiarova // Materials Engineering and Technologies for Production and Processing IV, Solid State Phenomena. – 2018. – vol. 284. – P. 1284-1290.
15. Миропольский Ю.А. Холодная объемная штамповка на автоматах. – М.: Машиностроение, 2001. – 456 с.
16. Фомин А. А. Формирование фасонной поверхности заготовки из материала с неоднородными свойствами // Технология машиностроения, 2013. – № 5. – С. 19 – 23.
17. Сосенушкин Е.Н. Прогрессивные процессы объемной штамповки. – М.: Машиностроение, 2011. – 480 с.
18. Zarapin A.Yu. Designing lines for the production of composite materials based on the object-oriented approach / A.Yu. Zarapin, N.A. Chichenev // Heavy Engineering. – 1999. – vol. 6. – P. 16-20.
19. Силаев Е.Ф. Система автоматического проектирования технологических процессов холодной листовой штамповки // Кузнечно-штамповочное производство – 1984. – №2. – С. 17-19.
20. Беляев В.А. Холодная листовая штамповка: учебное пособие. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2008. – 128 с.
21. Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение. – М.: Металлургия, 1997. – 336 с.

Production of Parts by Cold Forming

Gerasimova A.A., Dmitriev V.A.

National University of Science and Technology "MISIS"

Moscow, Russia

allochka@rambler.ru, dmitrievsla@gmail.com

Abstract. In the article the existing production process of parts by cold forming was analyzed, possible options for parts production by cold pressing were developed, 3D models of transitions of technology options were built, and finite element simulation of possible technology options was also built. On the basis of the simulation results, as well as on the basis of analytical calculations, the parameters of the technological process were determined, which made it possible to select the appropriate equipment and design the construction of die tooling. The technological process of one-

side pressing consists of three operations: direct pressing of the rod, upsetting of the flange and pressing of the profile. For the first two operations there is the possibility of using a multi-position stamp. The molding will be carried out in a stamp on a double-action press. Using a floating matrix, it will be possible to produce a part on a simple-action hydraulic press.

Keywords: forming, tooling, matrix, simulation, technological process, work hardening, part.

Исследование влияние толщины материала на свойства холоднокатаной листовой стали с содержанием углерода 0,08%

Белоусов В.Б., Типалин С.А., Калпин Ю.Г.

Московский Политехнический Университет

Москва, Россия

1736113@rambler.ru, Tsa_mami@mail.ru, kalpin@inbox.ru

Аннотация. Проведено исследования по влиянию толщины листовой холоднокатаной стали с содержанием углерода 0,08% на ее свойства. Выполнены эксперименты по растяжению образцов из листовой стали и построены кривые упрочнения материала. Приведен сравнительный анализ изменения коэффициентов, аппроксимирующих кривые упрочнения в зависимости от толщины материала. Приведены сравнения кривых упрочнения материала исходных и отожженных образцов. В ходе экспериментов установлено влияние предварительно накопленной материалом пластической деформации на свойства. Выявлено, что с уменьшением толщины материала изменяются силовые параметры процесса и предельная деформация растяжения. Даны рекомендации для оценки расчетных данных, полученных при моделировании процесса деформирования деталей в специализированных программах. Для прогнозирования изменения свойств материала в процессе замены толщины предложены зависимости аппроксимации коэффициентов кривой упрочнения.

Ключевые слова: изменение толщины, растяжение образцов, кривая упрочнения, накопленная деформация, механические характеристики листа, степень упрочнения материала.

ВВЕДЕНИЕ

Для теоретического расчета технологических параметров процесса формоизменения деталей в процессе штамповки инженеру необходимо знать основные механические свойства листового материала. В настоящее время для разработки технологического процесса деформации сложных деталей, имеющих нелинейную пространственную форму и получаемых глубокой вытяжкой теоретический расчет, не дает надежного прогнозирования положительного результата получения готового изделия. В связи с этим требуется моделирование процесса штамповки с помощью компьютерных программ, алгоритм которых основан на численном моделировании процесса формоизменения [1-5]. Однако при компьютерном моделировании процесса деформации детали, кроме этого, требуется иметь полные данные о изменении интенсивности напряжений в процессе деформации (кривая упрочнения), диаграмму предельного состояния формоизменения, и изменение анизотропии материала на протяжении всего процесса деформации. Если для процесса моделирования предприятие проводит исследования по всему спектру процесса формоизменения для конкретной партии деталей, и проводит моделирование штамповки с использованием этих свойств, то точность расчетов будет максимально приближена к реальной штамповке [6-18]. Однако большинство предприятий

для моделирования используют базу, заложенную в свойствах программного обеспечения или справочных таблицах для конкретной марки материала. Данные компьютерных баз данных и справочных таблиц приводят параметры свойств материала для одной толщины (наиболее часто приводятся свойства листового материала толщиной 1 мм) [19-22]. Однако в процессе получения листового материала в зависимости от его толщины лист претерпевает различную деформацию и следует предположить, что его свойства будут изменяться в зависимости от его толщины. Основными параметрами характеризующих процесс деформации листового материала является параметры кривой упрочнения. В настоящей работе исследован процесс растяжения образцов и приведены коэффициенты характеризующие параметры кривой упрочнения материала в процессе деформации.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал: Сталь 08пс (аналог в США - 1008, странах ЕС - 1.1121). Часть образцов была термообработана. Режим термообработки (Отжиг при температуре 640-660 С, с выдержкой 2 часа и охлаждением с печью).

Проведены эксперименты по растяжению стальных холоднокатаных полос 250x20 мм с толщинами 0,5 мм; 0,7 мм; 1,5 мм; 3 мм.

ВЫБОР МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФОРМУЛЫ АППРОКСИМАЦИИ

В ходе эксперимента замерялось сила растяжения и изменение толщины и ширины образца (с последующем вычислением изменения площади поперечного сечения образца). По полученным данным вычислялись интенсивность напряжений и интенсивность деформации и строилась кривая упрочнения с последующей степенной аппроксимацией.

$$\sigma = A(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (1)$$

Эксперименты проводились для серии с расчетом среднего значения по каждой толщине.

Кривые упрочнения для листового материала строятся, фиксируя величину изменения силы и изменения деформации образца. При этом изменения деформации может происходить двумя способами:

1. Замеряя удлинение образца в процессе нагружения.
2. Фиксируя уменьшение площади поперечного сечения образца в зависимости от воздействующей силы.

Первый способ более простой в осуществлении, однако в процессе такого измерения образец должен иметь большую ширину в зоне захвата, чтобы избежать искажения значений связанных с влиянием зажимов.

Второй способ требует специальных приспособлений, установленных на испытательную машину. Однако, позволяет более точно фиксировать деформацию поперечного сечения и через нее определить деформацию удлинения образца. Кроме этого второй способ позволяет определить коэффициент анизотропии материала. Производилось сравнение аппроксимированных кривых отожженных и не отожженных металлов между собой: Накопленная деформация ϵ_0 имеет существенное значение для не термообработанной стали, так как сталь получена путем прокатки, и чем более тонкий лист металла, тем больше накоплено в нем деформаций.

В теории пластичности для учета влияния изменений свойств материала при его деформировании широко применяется термин «накопленной пластической деформации», или параметр Одквиста. Эта величина является возрастающим параметром процесса деформирования, и ее предельная величина соответствует разрушению. При одноосных процессах НПД определяется суммированием абсолютных значений приращений пластической деформации [7, 8, 24, 25].

$$\epsilon_p \Sigma = \int |d\epsilon_p| \quad (2)$$

При растяжении или сжатии образца разрушению соответствует величина $\epsilon_p \Sigma = \delta$. Отличать ее от текущей пластической деформации

$$\epsilon_p = \int d\epsilon_p \quad (3)$$

имеет смысл только при знакопеременных процессах, когда в некоторые моменты приращение $d\epsilon_p$ имеет знак, противоположный знаку самой пластической деформации, т.е. $\epsilon_p d\epsilon_p < 0$, причем всегда $\epsilon_p \Sigma \geq \epsilon_p$.

Для аппроксимации кривой упрочнения применяется зависимость (1) в которой коэффициент ϵ_0 условно будем считать эквивалентен параметру ϵ_p .

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

При расчёте данного процесса, накопленная деформация определялась, основываясь на полученных графиках. Аппроксимируя данные экспериментов, можно на графике провести линию, уходящую в зону отрицательных значений. Для толщин 3 мм и 1,5 мм, эта величина равнялась $\epsilon_0=0,03$ и $0,04$ соответственно. Для 0,7 мм и 0,5 мм данное значение близко к $\epsilon_0=0,05$.

Методика расчета, следующая [23, 26]:

$$b=b_0-\Delta b \quad (4)$$

$$s=s_0-\Delta s \quad (5)$$

где b_0 и s_0 – ширина и толщина исходного образца соответственно;

$$\Delta b=\Delta_1+\Delta_2 \text{ и } \Delta s=\Delta_3 \quad (6)$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – показатели 1,2,3 индикатора соответственно.

1. Определяем деформацию волокон в главных направлениях:

$$\epsilon_b = \ln \frac{b}{b_0} \quad (7)$$

$$\epsilon_s = \ln \frac{s}{s_0} \quad (8)$$

$$\epsilon_t = \ln \frac{b_0 s_0}{bs} \quad (9)$$

После этого определяем напряжение, возникающее при растяжении образца из зависимости:

$$\sigma_t = \frac{P}{bs} \quad (10)$$

Далее определяем коэффициент анизотропии материала:

$$R = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_s} \quad (11)$$

2. По расчётным данным строятся графики $R=R(\epsilon_t)$, по графикам определяют коэффициенты анизотропии при $\epsilon_t=0,15$ для каждого отдельного испытания.

3. Находим интенсивность деформации:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{2}{3} \chi \frac{2+R}{1+R}} \epsilon_t \quad (12)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{3}{2} \chi \frac{1+R}{2+R}} \sigma_t \quad (13)$$

4. По результатам вычислений строим график $\sigma=\sigma(\epsilon)$.

5. Затем аппроксимируем графики степенной зависимостью и приводим графики с аппроксимированными кривыми

Свойства материалов часто связаны с многими показателями [27-31], но если считать условие деформации стабильными и однородными по толщине, то можно определить среднее значение для конкретного материала. После построения таблицы с коэффициентами аппроксимации построит график и аппроксимируем его линейной зависимостью.

Результаты механических испытаний показали следующее изменение механических свойств образцов в зависимости от толщины материала. Результаты исходных образцов представлены в таблице №1, а образцов после термической обработки в таблице №2.

Таблица №1

Механические характеристики образцов различной толщины в состоянии поставки (без термической обработки)

| Толщина образцов, мм | Предел текучести, МПа | Предел прочности, МПа | Предельная деформация |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 3 | 264 | 430 | 0,18 |
| 1,5 | 257 | 496 | 0,18 |
| 0,7 | 277 | 504 | 0,16 |
| 0,5 | 327 | 501 | 0,13 |

Таблица №2

Механические характеристики образцов различной толщины в отожжённом состоянии (после термической обработки)

| Толщина образцов, мм | Предел текучести, МПа | Предел прочности, МПа | Предельная деформация |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 3 | 242 | 400 | 0,25 |
| 1,5 | 240 | 434 | 0,29 |
| 0,7 | 241 | 456 | 0,30 |
| 0,5 | 287 | 449 | 0,29 |

Результаты экспериментов показали, что подвергнутые термообработке образцы имеют меньший предел текучести и предел прочности. Кроме этого, разброс значений материала в отожженном состоянии незначительный. В процессе отжига происходит также увеличение пластичности материала, и как следствие возрастание предельной деформации образца до разрушения. Также имеет место тенденция по выравниванию коэффициента анизотропии после отжига.

Сравним аппроксимированные графики (степенной зависимости). Результаты сравнений представлены на рисунках 1-4.

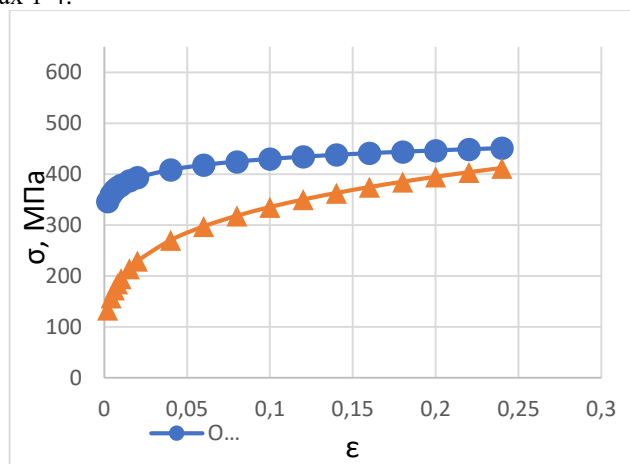


Рис. 1. Сравнение кривых упрочнения для толщины 3 мм

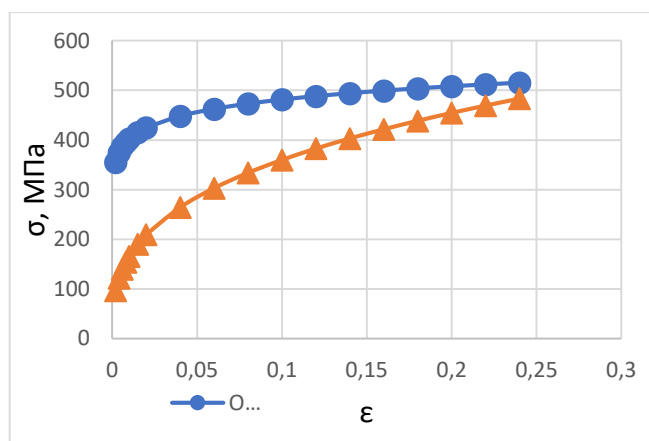


Рис. 2. Сравнение кривых упрочнения для толщины 1,5мм

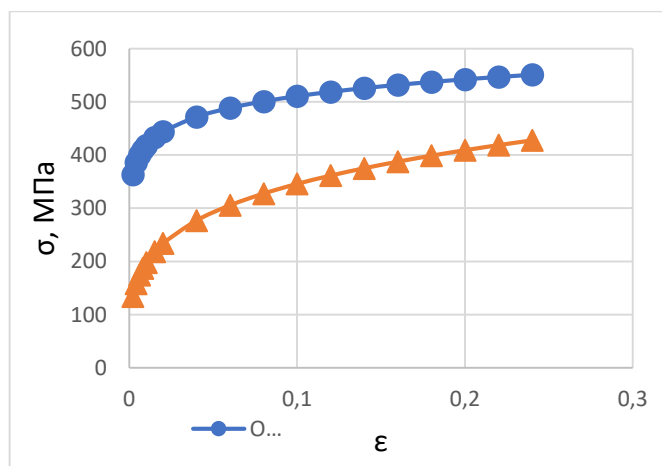


Рис. 3. Сравнение кривых упрочнения для толщины 0,7мм

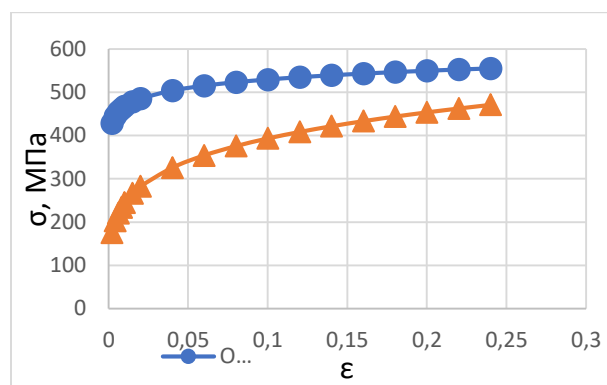


Рис. 4. Сравнение кривых упрочнения для толщины 0,5мм

Коэффициенты кривой упрочнения (1) представленных на рисунках 1-4 сведены в таблицу №3 для образцов состоянии поставки с завода (в исходном состоянии), и в таблицу №4 для отожжённых образцов (термообработанных)

Таблица №3

Значения коэффициентов кривой упрочнения для исходных образцов

| Толщина, мм | A, МПа | n |
|-------------|--------|-------|
| S=3 | 488,2 | 0,055 |
| S=1,5 | 575,7 | 0,078 |
| S = 0,7 | 623,9 | 0,087 |
| S = 0,5 | 599,3 | 0,054 |

Таблица №4

Значения коэффициентов кривой упрочнения для отожжённых образцов

| Толщина,мм | A, МПа | n |
|------------|--------|-------|
| S=3 | 576,6 | 0,235 |
| S=1,5 | 781,1 | 0,336 |
| S = 0,7 | 604,7 | 0,243 |
| S = 0,5 | 631,8 | 0,206 |

Для выявления зависимости изменения коэффициентов кривой упрочнения от толщины в исходном состоянии заготовки были построены графики, представленные на рисунках 5-6.

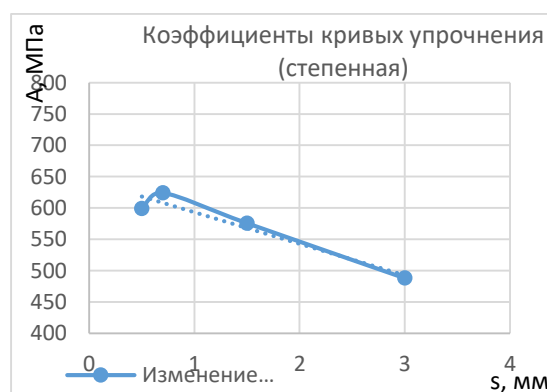


Рис. 5. Зависимость коэффициента A для степенной зависимости от толщины материала S

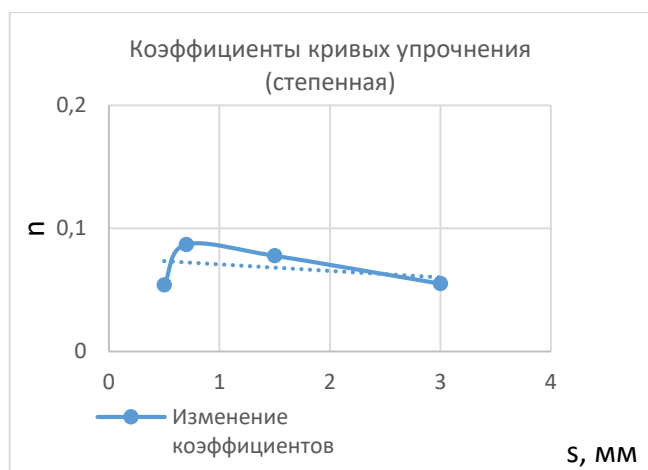


Рис. 6. Зависимость коэффициента степени упрочнения материала n от толщины материала S

Графики были аппроксимированы линейной зависимостью.

Проведенные эксперименты показали, что толщина материала влияет на кривые упрочнения. Формулы, по которым можно прогнозировать изменение параметров кривой упрочнения от толщины материала можно представить в следующем виде:

$$A = 643 - 50 * S; \quad (14)$$

$$n = 0,08 - 0,006 * S; \quad (15)$$

$$\varepsilon_0 = 0,058 - 0,008 * S, \quad (16)$$

где S – толщина деформируемого листа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований нашло подтверждение утверждение, что для одной марки материала его свойства различны при разной толщине листа. Построены кривые упрочнения для каждой толщины металла в нескольких состояниях (после производства на сталепрокатных предприятиях и отожженные образцы). Приведены графики и получены формулы по которым можно аппроксимировать данную марку материала для определения основного набора толщин выпускаемой промышленностью в холоднокатаном состоянии. Выявлено, что с увеличением толщины материала коэффициенты кривой упрочнения уменьшаются. На основании экспериментальных данных предложены линейные зависимости изменения коэффициентов кривой упрочнения от толщины материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Petrov M. Umformen eines Verbundwerkstoffes aus Stahlblechen / M. Petrov, S. Tupalin, J. Bast, P. Petrov, N. Kosatschjov, S. Guk. // Konstruktion. – 2012.
2. Tupalin S. Experimental study of V-bending process of steel-polymer-steel sheets at room temperature / S. Tupalin, M. Nikitin, N. Shpunken. // Computer Methods in Materials Science. – 2008.
3. Типалин С.А. Пружинение многослойного материала / С.А. Типалин, Б.Ю. Сапрыкин // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – Т. 2, №2(16).
4. Wen T, Daxin E (2004) Application of FEM on the study of material flowing deformation rule in the process of rectangular cup drawing. Mod Manuf Eng 4.

5. Tupalin, S.A., Petrov, M.A., Shpunken, N.F. To the influence of the deformation speed on hardening process during the cold sheet forming // Solid State Phenomena – 2018. – 284 p.

6. Bouvier S, Alves JL, Oliveira MC, Menezes LF (2005) Modeling of anisotropic work-hardening behavior of metallic materials subjected to strain-path changes. Comp Mat Sci 32. – P. 301–315

7. Калпин Ю.Г. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением / Ю.Г. Калпин, В.И. Перфилов, П.А. Петров, В.А. Рябов, Ю.К. Филиппов – М: МГТУ: «МАМИ», 2007. – 113 с.

8. Верещагин П.В. Механические испытания: методические рекомендации к вып-ю лаб. практикума - М: АГТУ им. И.И. Ползунова, 2014 – 45 с.

9. Гречников Ф.В. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Ф.В. Гречников, А.Н. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др. под ред. А.Г. Овчинникова.. М.: Машиностроение, 1985. – 184с.

10. Tomasz Trzepieciński, Hirpa G. Lemu, Investigation of anisotropy problems in sheet metal forming using finite element method, 2011. – 13 p.

11. Banabic D, Bunge H-J, Pohlandt K, Tekkaya AE (2000) Formability of Metallic Materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

12. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Часть 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.

13. Hill R (1948) A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proc R Soc Lond Ser A 193

14. Чудина О.В. Выбор материалов и методов упрочнения деталей транспортного машиностроения: учеб. пособие / О.В. Чудина, Г.В. Гладова. – М.: МАДИ, 2015. – 120 с.

15. Brunet M, Morestin F, Walter-Leberre H Failure analysis of anisotropic sheet-metals using non-local plastic damage model. J Mat Proc Technol. 2005. – 170 p.

16. Van Houutte P. Anisotropic plasticity. In: Hartley P, Pillingar I, Sturgess C (eds) Numerical modeling of material deformation process: research, development and applications. Springer-Verlag, London, 1992.

17. Адамеску Р.А. Анизотропия физических свойств металлов / Р.А. Адамеску, П.В. Гельд, Е.А. Митюшов – М: Металлургия, 1985. – 136 с.

18. Zhiying C, Xianghuai D (2009) The GTN damage model based on Hill'48 anisotropic yield criterion and its application in sheet metal forming. Comp Mat Sci, 2009. – 44 p.

19. Бернштейн М.Л. Механические свойства металлов / М.Л. Бернштейн, М.А. Займовский— М.: Металлургия, 1979. — 496 с.

20. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1979. – 520 с.

21. Шпунькин Н. Ф. Исследование свойств многослойных листовых материалов / Н.Ф. Шпунькин, С.А. Типалин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – №1.

22. Арышенский Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / под ред. Ф.В. Гречникова. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.

23. Михеев В.А. Анизотропные материалы: электронное учебное пособие / В.А. Михеев, В.М. Зайцев – С. СГАУ им. Академика С.П. Королева, 2012. – 79 с.

24. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.

25. Адамеску Р.А. Анизотропия физических свойств металлов / Р.А. Адамеску, П.В. Гельд, Е.А. Митюшов. – М.: Металлургия, 1985. – 136 с.

26. Шпунькин Н.Ф. Совершенствование методов штамповки автокузовных деталей обтяжкой с растяжением и определения штампуемости листа: диссертация ... кандидата технических наук. – Москва, 1981. – 180 с.

27. Типалин С.А. Определение накопленной деформации в процессе выдавливания технологической канавки // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – №8.

28. Радионова Л.В. Исследование процесса старения холоднокатаного и горячеоцинкованного проката из высоко-

прочных автомобильных марок стали для холодного деформирования / Л.В. Радионова, Ю.М. Субботина, Р.А. Лисовский // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т.4, №1. – С. 27-35.

29. Tipalin S. Numerical and experimental investigation of deep drawing of sandwich panels / S. Tipalin, M. Petrov, B. Saprikin, N. Kosatchyov, N. Shpunkin, P. Petrov // Key Engineering Materials. – 2014. – P. 1627-1636.

30. Petrov M.A., Basyuk T.S., Petrov A.N., Petrov P.A. Experimental investigations on the relation of the lubricant's flash point and quality of the piston made from aluminium alloy for its application in internal combustion engines. / Key Engineering Materials, – 2015. – Vol. 651 – 653. – P. 297 – 304.

31. Petrov M. Numerical investigation of the hot isothermal process and force size-effect of a clutch-half forming / M. Petrov., P. Petrov, V. Voronkov, D. Grishin // Key Engineering Materials. – 2014 – vol. 611-612 – P. 1608 – 1616.

How the Material Thickness Affects 0.08% Carbon Cold-Rolled Sheet Steel

Belousov V.B., Tipalin S.A., Kalpin Yu.G.

Moscow Polytechnic University

Moscow, Russia

1736113@rambler.ru, Tsa_mami@mail.ru, kalpin@inbox.ru

Abstract. The authors hereof have studied how the thickness of 0.08% carbon cold-rolled sheet steel affects its properties. They experimented with tensioning such sheets and plotted the metal hardening curves. The paper presents comparative analysis of how the material thickness affects the coefficients approximating the hardening curves. A comparison of the hardening curves of control and annealed specimens is given. Experiments have identified the effects that the pre-accumulated plastic strain has on the material properties. It is revealed that lower thickness alters the force parameters of the process and affects the ultimate tensile strain.

The paper formulates recommendations on using the estimates obtained by the software simulation of the deformation process. Hardening-curve coefficients approximation functions are proposed in order to predict how changing the thickness would affect the material properties.

Keywords: altered thickness, specimen tensioning, hardening curve, accumulated strain, mechanical properties of the sheet, hardening degree.

Новые каталитические системы на основе платиновых катализаторов

Курунина Г.М., Иванкина О.М., Бутов Г.М.

Волжский политехнический институт (филиал), ВолГТУ

Волжский, Россия

galina1@mail.ru, butov@volpi.ru

Аннотация. В статье представлен метод получения 1% платиновых катализаторов, содержащих оксиды редкоземельных элементов РЗЭ и результаты исследования катализаторов методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгенофазового анализа (РФА) и термического анализа (ДТА-ТГА).

Ключевые слова: катализатор, оксиды редкоземельных элементов, гидрирование, платина, активная фаза.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие нефтехимической промышленности влечет за собой улучшения в производственных процессах других отраслей промышленности, которые напрямую зависят от нее. С помощью гетерогенного катализа в промышленности основного органического и нефтехимического синтеза осуществляют процессы гидрирования, дегидрирования, многие реакции окисления, гидратации и дегидратации и другие.

Большое внимание в последние годы уделяется катализаторам гидрирования различных органических соединений. Особое место среди них занимают нанесенные оксидные катализаторы (на основе оксидов кобальта [1-2]), или нанесенные металлические катализаторы (рутениевые [3-5], никелевые [6-11], палладиевые [12-15] платиновые [16-18]). Носители повышают активную поверхность, увеличивают термостойкость и механическую прочность катализатора. Также при производстве нанесенных катализаторов, возможно контролировать размеры и структуру металлических частиц [19-22]. В качестве носителей обычно используют оксиды алюминия, кремния, хрома и другие природные и синтетические материалы.

В продолжение данных работ важно оценить структуру поверхности и термостойкость некоторых исследуемых нами платиновых катализаторов, содержащих оксиды РЗЭ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследованы структура поверхности и термостойкость 1% платиновых катализаторов, нанесенных на оксиды РЗЭ (самария, тербия и иттербия). Образцы катализаторов получены по разработанной нами методике.

Равномерность распределения активных компонентов по поверхности катализатора была оценена на растровом сканирующем микроскопе JSM-6390.

Для исследования распределения размера частиц катализаторов провели рентгенофазовый анализ (РФА) поверхности на дифрактометре ARLX'TRA (Cu-анод, $K\alpha$ – излучение). Регистрацию дифрагированного излучения вели в

пошаговом режиме в интервале углов $2\theta = 5^\circ - 80^\circ$ шагом $0,020^\circ$ по 2θ при экспозиции 0,6 с на точку.

Термостойкость образцов катализаторов исследовали с помощью методов дифференциально-термического анализа (ДТА) и термогравиметрического анализа (ТГА). Исследования осуществлялись на дериватографе Q - 1500 системы Паулик. Термогравиметрический анализ проводили в режиме линейно-политермического нагрева со скоростью $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ в потоке атмосферного воздуха, подаваемого со скоростью 2,5 мл/мин, максимальная температура нагрева составляет 800°C , навеска вещества 380 - 440 мг.

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ 1% Pt/Sm₂O₃ (Tb₂O₃, Yb₂O₃) КАТАЛИЗАТОРОВ

В стакан помещали расчетный объем платинохлоридоводородной кислоты ($\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), добавляли 20 мл воды и перемешивали в течение 20 мин. Одновременно готовили суспензию носителя (оксида РЗЭ) в 20 мл воды. Затем к суспензии носителя добавляли раствор кислоты. Пропитку носителя раствором соли платины проводили при перемешивании в течение 30 минут, после чего суспензию выливали в фарфоровую чашку и сушили до постоянного веса при температуре $105 \pm 1^\circ\text{C}$. После высушивания катализатор измельчали и просеивали через сито с размером ячеек 100 мкм.

Данный метод получения новых 1%Pt-катализаторов отличается технологической простотой и не требуют специального оборудования. Учитывая, что активация катализатора происходит перед его использованием, сроки хранения катализатора можно не регламентировать, при этом не требуется и создание специальных условий для его хранения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Равномерность распределения активных компонентов по грануле катализатора была оценена на растровом сканирующем микроскопе JSM-6390. На рис. 1 приведены снимки поверхности с размерами частиц 1%Pt/Sm₂O₃, 1%Pt/ Tb₂O₃, 1%Pt/ Yb₂O₃ катализаторов.

Анализ полученных снимков поверхности катализаторов позволил установить распределение их частиц по размерам (рис.2). Из гистограммы 2а, соответствующей 1%Pt/Sm₂O₃ катализатору видно, что около 70% частиц имеют размер 0,5 нм. Для 1%Pt/Yb₂O₃ катализатора (2б) также имеется выраженный максимум в распределении размеров (около 60 %), который соответствует частицам с диаметром 0,5 нм. У катализатора 1% Pt/Tb₂O₃ (2в) 40%

частиц имеют размер 0,5 нм, на долю частиц с размерами 1,0 и 2,0 нм приходится 25 и 27% соответственно.

Таблица 1

Результаты ДТА и ДГА образцов катализаторов

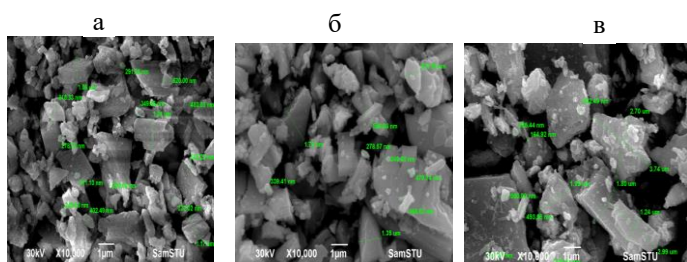


Рис. 1. Микрофотографии (СЭМ) структур катализаторов (а) 1%Pt/Sm₂O₃, (б) 1%Pt/Tb₂O₃, (в) 1%Pt/Yb₂O₃

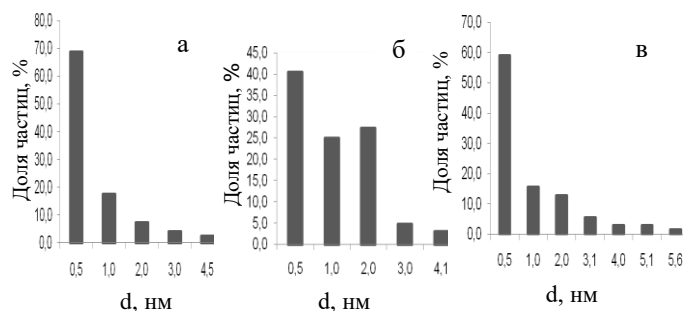


Рис. 2. Распределение частиц по размерам для катализаторов (а) 1%Pt/Sm₂O₃, (б) 1%Pt/Tb₂O₃, (в) 1%Pt/Yb₂O₃

Рентгенофазовый анализ показал, что рефлексы на дифрактограммах, полученных порошковых катализаторов, идентичны известным из базы данных Power derdiffraction file (PDF-2) [23]. По данным РФА найдено наличие оксидов самария, тербия и иттербия со степенью окисления +3, кроме того, следует отметить, что кроме вышеуказанных соединений имеется сложный набор типичных фаз носителя, а платина находится в ультрадисперсном состоянии.

Рентгенограмма 1%Pt/Sm₂O₃ катализатора указывает на наличие оксида самария с параметрами решетки 3.748×3.748×5.790, 90×90×120, ячейка имеет гексагональную форму. Рентгенограмма 1%Pt/Tb₂O₃ катализатора подтверждает присутствие оксида тербия с параметрами решетки 5.270×5.270×5.270, 90×90×90, ячейка имеет кубическую форму. Рентгенограмма 1%Pt/Yb₂O₃ катализатора подтверждает присутствие оксида иттербия с параметрами решетки 10.436×10.436×10.436, 90×90×90, ячейка имеет кубическую форму.

Термическая стабильность изучаемых катализаторов исследована методом ДТА - ТГА. Результаты, полученные после обработки дериватограмм испытанных катализаторов, представлены в таблице.

Как видно из данных таблицы, катализаторы теряют массу при температурах выше 100 °С во всем интервале температур, при этом максимальная потеря массы происходит при нагревании вплоть до 290 - 300°С. Следует отметить также наличие эндо- и экзотермических процессов при нагревании. Протекание эндотермических процессов, по-видимому, связано с удалением адсорбционной воды, которая не уходит из образцов при их сушке. Потеря массы катализаторов в исследуемом интервале температур составляет 5,82 - 9,87%.

| № | Наименование образца | Интервал температурных эффектов, °С | | | | | | Потеря массы Δm, % |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|----------|-----------------|--------|----------|--------------------|
| | | Эндотермический | | | Экзотермический | | | |
| | | на начало | ко нец | максимум | на начало | ко нец | максимум | |
| 1 | 1%Pt/Sm ₂ O ₃ | 100 | 200 | 120 | 200 | 300 | 290 | 9,87 |
| | | 300 | 370 | 345 | | | | |
| | | 370 | 475 | 450 | | | | |
| 2 | 1%Pt/Tb ₂ O ₃ | 100 | 200 | 130 | 200 | 390 | 250 | 7,12 |
| | | 380 | 500 | 410 | | | | |
| | | 500 | 600 | 570 | | | | |
| 3 | 1%Pt/Yb ₂ O ₃ | 100 | 200 | 135 | 200 | 600 | 278 | 5,82 |
| | | 400 | 430 | 415 | | | 350 | |

Проведены исследования эффективности полученных платиновых катализаторов, нанесенных на оксиды РЗЭ в реакциях гидрирования ряда органических соединений: нитробензола [17], бензальдегида [24], *n*-нитротолуола [25], *n*-нитрофенола [26]. Новые каталитические системы показали свое преимущество в сравнении с платиновыми катализаторами на Al₂O₃. Платиновые катализаторы, нанесенные на оксиды РЗЭ, увеличили скорость реакции гидрирования в 4,0 - 4,5 раз по сравнению с катализатором сравнения - 1%Pt/Al₂O₃. Гидрирование проводилось в мягких условиях (t = 18-25 °С, P = 0,1 мПа). Среда: вода, вода-этанол, этанол.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1. Разработан метод получения 1% платиновых катализаторов, содержащих оксиды РЗЭ, которые показали эффективность в реакциях мягкого гидрирования ряда нитросоединений и бензальдегида.

2. С помощью сканирующей электронной микроскопии исследована структура поверхности 1% Pt/Sm₂O₃ (Tb₂O₃, Yb₂O₃) полученных катализаторов. Метод получения катализаторов позволяет равномерно распределить платину по гранулам носителя и сформировать каталитически активные центры.

3. По данным РФА ячейка оксида самария имеет гексагональную форму, оксиды тербия и иттербия кубическую форму, а платина находится в ультрадисперсном состоянии.

4. Исследование образцов катализаторов методами ДТА-ТГА показало, что они обладают высокой термической стабильностью и могут быть использованы в химических процессах, в которых температура реакции не превышает 300 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубрицкая Н.Г., Козлова О.В., Королькова О.Г., Юрченко Э.Н., Фирсов О.П. Способ приготовления катализатора для гидрирования кетонов и альдегидов // Патент России № 2050195. 1995.

2. Буркеев М.Ж., Синтез и каталитические свойства полимер иммобилизованных наночастиц кобальта и нике-

ля./ М.Ж. Буркеев, Т.О. Хамитова, Д. Хавличек, Е.М. Тажбаев, С.Ж. Давренбеков, Г.Е. Кожобекова // Катализ в промышленности. – 2018. – 18(3). – С.8-15.

3. Долуда В.Ю. Исследование трехфазного гидрирования нитробензола до анилина в присутствии рутениевого катализатора / В.Ю. Долуда, А.Е. Филатова, Э.М. Сульман, В.Г. Матвеева, С.П. Михайлов, А.И. Сидоров, Ю.Ю. Косивцов // Катализ в промышленности. – 2018. – 18(4). – С. 41-47.

4. Панкина Г.В. Особенности формирования Co-Ru/MgO/Al₂O₃-катализаторов синтеза Фишера-Тропша: магнитный метод оценки размера частиц Co / Г.В. Панкина, П.А. Чернавский, А.Ю. Крылова, В.В. Лунин // Кинетика и катализ. – 2007. – т. 48, №4. – С. 606-610.

5. Chary V.R., Srikanth Ch.S. Selective Hydrogenation of Nitrobenzene to Aniline over Ru/SBA-15 Catalysts // Catalysis Letters. – 2009. – Vol. 128. – No. 1-2. – P. 164-169.

6. Ильясов И.Р. Синтез и исследование палладиевых катализаторов, нанесенных на композит δ -Al₂O₃/Ni. / И.Р. Ильясов, М.В. Назаров, А.А. Ламберов // Катализ в промышленности. – 2014. – №6. – С. 50-58.

7. Касьянова Л.З. Никелевый катализатор гидрирования ненасыщенных углеводородов / Л.З. Касьянова, Р.Р. Даминев, О.Х. Каримов, Э. Х. Каримов, Д. В. Бакке, М.Ю. Черезов // Башкирский химический журнал. – 2016– Т. 23 № 1. – С. 30-33.

8. Бербен Питер Хильдегардус (NL), Реккер Тьяллинг(NL). Никелевый катализатор для реакции гидрирования // Патент России № 2330718. 2008. Бюл. №22.

9. Сабирова З.А., Никелевые катализаторы на основе пористого никеля для реакции паровой конверсии метана / З.А. Сабирова, М.М. Данилова, В.И. Зайковский // Кинетика и катализ – 2008, – Т. 49 № 3. – С. 449-456.

10. Зорина Г.И. Изучение активности нанесенных никелевых катализаторов, модифицированных добавками Mo, Cr, Al, в реакции гидрирования альдегидов / Г.И. Зорина, Г.М. Курунина, Г.М. Бутов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2014. – № 1. – С. 22-24.

11. Попов Ю.В., Мохов В.М. Способ получения первичных или вторичный спиртов // Патент России № 2519950. 2014.

12. Бельская О.Б., Влияние природы углеродного носителя и содержания палладия на свойства катализаторов Pd/C в реакции гидрирования бензальдегида / О.Б. Бельская, Р.М. Мироненко, В.А. Лихолобов // Теоретическая и экспериментальная химия. – 2012. –Т. 48, № 6. – С. 359-363.

13. Eremenko N.K. Highly dispersed palladium on carbon nanofibers for hydrogenation of nitrocompounds to amine / N.K. Eremenko, O.Yu. Podyacheva, Z.R. Ismagilov, I.I.Obraztsova, A.N. Eremenko, L.S. Kibis, D.A. Svintsitskiy. // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2015. – Т. 17, № 2. – P. 101-103.

14. Баева Г.Н. Специфика каталитических свойств нанесенных наночастиц палладия в гетерогенно-каталитических реакциях / Г.Н. Баева, И.С. Машковский, А.Ю. Стахеев, Н.С. Телегина // Российский химический журнал. – 2009. – Т.53, № 2.– С. 68-78.

15. Аль-Вадхав Х.А. Синтез палладиевых нанокатализаторов на силикагеле для селективного гидрирования

фенилацетилена. // Катализ в промышленности. – 2015. – № 15(2). – С. 68-72.

16. Гебауэр-Хенке Э., Сравнительное исследование катализаторов Ir/Ga₂O₃, Pt/Ga₂O₃ и Ru/Ga₂O₃ в реакции селективного гидрирования кротонового альдегида / Э. Гебауэр-Хенке, Я. Фарботко, Р. Туруде, Я. Рынковский // Кинетика и катализ. – 2008. –Т. 49, № 4. – С. 599-606.

17. Hydrogenation of aromatic nitro compounds on the 1 % Pt catalysts containing oxides of rare earth elements (REE) // Butov G.M., Zorina G.I., Kurunina G.M.: 21st International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2014 and 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, PRES 2014 21. – 2014. –P. 236-239.

18. Куц С.Д. Влияние способа подготовки оксида графита на активность нанесенного платинового катализатора в жидкофазном гидрировании / С.Д. Куц, Н.С. Куюнко // Известия Академии Наук. Серия химическая. – 2017. – Т.66, № 4. – С. 652-660.

19. Образцова И.И. Кинетика реакции гидрирования нитробензола на палладиевом катализаторе, нанесенном на наноалмаз / И.И. Образцова, Н.К. Еременко, Ю.Н. Велякина // Кинетика и катализ. – 2008. – Т.49., № 3.– С. 422-428.

20. Новалихина М.Д., Разработка и использование в промышленности новых катализаторов гидрирования / М.Д. Новалихина, О.В. Крылов // Кинетика и катализ. – 2001. – 42, № 1. – С. 86–98.

21. Suresh G. et al. Tailoring the synthesis of supported Pd catalysts towards desired structure and size of metal particles //Physical Chemistry Chemical Physics. – 2010. – Т. 12. – №. 18. – С. 4833-4842.

22. Meille V. Review on methods to deposit catalysts on structured surfaces //Applied Catalysis A: General. – 2006. – Т. 315. – С. 1-17

23. Powder diffraction file (PDF-2). International centre for diffraction data. Release 2008 (Pennsylvania, USA).

24. Бутов Г.М. Жидкофазное гидрирование бензальдегида на 1% платиновых катализаторах, нанесенных на оксиды редкоземельных элементов. / Г.М. Бутов, Г.И. Зорина, Г.М. Курунина // Хим. пром. сегодня. – 2009. –№ 2. – С. 3-6.

25. Бутов Г.М., Изучение влияния концентрации этилового спирта на скорость гидрирования п-нитротолуола на платиновых катализаторах, нанесённых на оксид гадолиния / Г.М. Бутов, Г.И. Зорина, Г.М. Курунина // Известия Волгоградского государственного технического университета (Сер. Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов): Межвуз. сб. науч. ст./ ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – Вып. 6. – № 2 (50). – С. 87-90.

26. Зорина Г.И. Гидрирование ароматических нитросоединений с различными функциональными группами, на 1%Pt катализаторах, содержащих оксиды РЗЭ / Г.И. Зорина, Г.М. Курунина, Г.М. Бутов // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета. – 2013. – № 2(2). – С.79 – 84.

Novel Catalytic Systems based on Platinum Catalysts

Kurunina G.M., Ivankina O.M., Butov G.M.

Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) of VSTU

Volzhsky, Russia

galina1@mail.ru, butov@volpi.ru

Abstract. The paper presents a method for the production of 1% platinum catalysts containing oxides of rare-earth elements (REE); it also dwells upon the results of analyzing such catalysts by scanning electron microscopy (SEM), x-ray diffraction analysis (XDA), and thermal analysis (DTA-TGA).

Keywords: catalyst, oxides of rare-earth elements, hydrogenation, platinum, active phase.

Износостойкость и характеристики поверхности трения металла покрытий с нитридо-боридным легированием

Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С.А.

Омский Государственный Технический Университет

Омск, Россия

weld_techn@mail.ru, alesha-los@yandex.ru, froze8@mail.ru

Аннотация. Исследованы износостойкость и характеристики поверхности трения металла покрытий с нитридо-боридным легированием. Объектом исследования являлась сталь наплавленная порошковой проволокой содержащей 15% хрома, 0,5% нитрида бора, 1,25% диборида титана и 0,5% диборида циркония. Установлено, что среднее значение относительного износа за испытание составило 0,00416 г/м, что в 1,8 раза меньше чем у металла покрытия без боридов. Среднее значение линейного износа составило 0,0122 мм/м, что в 1,9 раза меньше чем у металла покрытия без боридов. Среднее значение момента трения за весь путь трения в 339 м составило 20,96 Н·м. Коэффициент трения составил 0,425. Твердость такого металла достигает максимального значения в 57 HRC. Микротвердость структурных объектов составляет для матрицы 617-648 HV, эвтектики 764-847 HV и упрочняющих фаз 1128-1247 HV. Показано, что структура металла представляет собой железо-хромистую мартенситную матрицу с эвтектической составляющей, образованной на базе боридов (Fe, Cr)₂B и высокопрочного нитрида ε-(Fe, Cr)₂-3N, являющихся эффективным препятствием для скольжения дислокаций в условиях пластического деформирования поверхности при изнашивании.

Ключевые слова: наплавка, порошковая проволока, легирование, бориды, структура, твердость, износостойкость.

ВВЕДЕНИЕ

Износостойкие покрытия играют важную роль в повышении надежности работы технологических машин. Одним из интенсивно развивающихся направлений в области упрочнения быстроизнашивающихся деталей и элементов конструкций является наплавка покрытий порошковыми проволоками.

Высокую износостойкость металла наплавленных покрытий можно получить комбинируя твердорастворное упрочнение и упрочнение частицами второй фазы (карбидами, нитридами, боридами, интерметаллидами) в матрице на основе железа. В этом отношении довольно широкое применение для легирования аустенитных, аустенитно-ферритных и мартенситных коррозионно-стойких сталей нашёл азот [1-9]. Такое легирование повышает способность к деформационному упрочнению, существенно увеличивает способность металла сопротивляться распространению трещин и его износостойкость.

В месте с тем, другим эффективным методом упрочнения металла является легирование его бором [10-13]. При наплавке для этого используют такие соединения бора как ферробор, карбид бора, диборид хрома и др. [13-17]. Установлено положительное влияние диборидов титана и циркония на износостойкость хромоникелевых мартенситно-

стареющих сталей наплавленных порошковыми проволоками [18-22]. Особый интерес представляет использование для этих целей нитрида бора, являющегося вследствие сходства ряда свойств, электронным аналогом углерода [23]. Ранее авторами показана эффективность использования в хромистых порошковых проволоках комплекса соединений бора и азота, обеспечивающих получение износостойкого наплавленного металла [24, 25].

В тоже время современное состояние проблемы изнашивания требует знаний основных закономерностей упрочнения и разрушения поверхностных слоев металла при его фрикционном нагружении.

Исходя из этого, целью настоящей работы является исследование износостойкости и характеристик поверхности трения металла наплавленного хромистой порошковой проволокой с комплексом соединений бора и азота.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали влияние боридно-нитридного легирования на износостойкость и трибологические свойства хромистой стали, полученной наплавкой порошковой проволокой состава: 15% Cr; 0,5% BN; 1,25% TiB₂; 0,5% ZrB₂. Для сравнения исследовали сталь без боридов.

Наплавку осуществляли на пластины из стали Ст3 размером 200×50×10 мм опытными порошковыми проволоками диаметром 2,4 мм в аргоне в три слоя. Исследовался металл в состоянии наплавки.

Испытания в условиях адгезионного изнашивания пар металл-металл осуществляли при трении скольжения без смазки по схеме палец – вращающийся диск (контртело), на машине трения УМТ-2168. На диск производилась кольцевая наплавка покрытым электродом марки ОК Wearode 55 HD (70X10ГС), обеспечивающего твердость металла покрытия 56-59 HRC. После шлифовки по наплавленному покрытию осуществляется контакт с образцами в виде пальца, торец которого наплавлен исследуемым составом. Высота наплавленного слоя составляла 6 мм. На каждый состав испытывалось три образца. Испытание проводили при нагрузке F = 0,75 кН и частоте вращения диска контртела 100 об/мин. После каждых 300 оборотов диска производилось взвешивание образцов. Путь трения образца (пальца) составлял 113 м.

Металлографические исследования наплавленного металла проводили на оптическом микроскопе AXIO Observer A1m (Carl Zeiss). Микроструктура выявлялась химическим травлением в реактиве состава: CuSO₄ – 4 г; HCl – 20 мл; H₂O – 20 мл.

ДюрOMETрические исследования проводили на образцах из металла после наплавки с помощью твердомеров ТК-2 по методу Роквелла и Shimadzu HМV-2 по методу Виккерса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЯ

Результаты испытаний на адгезионное изнашивание металла покрытий без боридов и легированного боридными соединениями приведены в табл. 1–2. Основные трибологические свойства наплавленного металла покрытия без боридов и легированного боридными соединениями приведены в табл. 3.

Металл покрытия без боридов выдержал всего 600 оборотов при пути трения 226 м. Средний массовый износ образцов уже после 300 оборотов составляет 1,029 г. После 600 оборотов массовый износ составил уже 1,70 г, при этом износ по длине достиг 5,33 мм, значение которого сопоставимо с длиной наплавленной части пальца. Поэтому образцы были сняты с дальнейших испытаний.

Таблица 1

Массовый износ образцов металла, гр.

| Кол-во оборотов | Покрытие без боридов | | | | |
|---------------------|----------------------|-----------|-----------|------------------|--------------------------|
| | Образец 1 | Образец 2 | Образец 3 | Среднее значение | Относительный износ, г/м |
| 300 | 0,965 | 1,1382 | 0,9861 | 1,029767 | 0,0091 |
| 600 | 1,6093 | 1,849 | 1,6531 | 1,7038 | 0,0060 |
| Покрытие с боридами | | | | | |
| 300 | 0,9085 | 0,9296 | 0,8099 | 0,88267 | 0,0078 |
| 600 | 1,0872 | 1,356 | 1,0938 | 1,179 | 0,0026 |
| 900 | 1,458 | 1,5954 | 1,1925 | 1,4153 | 0,0021 |

Таблица 2

Изменение по длине образца металла, мм

| Кол-во оборотов | Покрытие без боридов | | | |
|---|----------------------|-----------|-----------|------------------|
| | Образец 1 | Образец 2 | Образец 3 | Среднее значение |
| 0 | 18,1 | 18,03 | 18,06 | 18,063 |
| 600 | 12,63 | 13,15 | 12,44 | 12,74 |
| Износ по длине образцов без боридов, мм | | | | |
| 0-600 | 5,47 | 4,88 | 5,62 | 5,323 |
| Покрытие с боридами | | | | |
| 0 | 17,74 | 17,94 | 17,75 | 17,81 |
| 900 | 13,05 | 13,46 | 14,45 | 13,6533 |
| Износ по длине образцов с боридами, мм | | | | |
| 0-900 | 4,69 | 4,48 | 3,3 | 4,15667 |

Таблица 3

Трибологические свойства металла

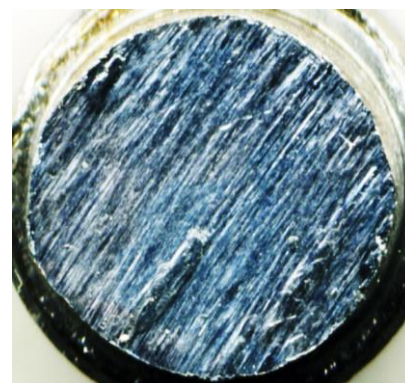
| Кол-во оборотов | Покрытие без боридов | |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------|
| | Среднее значение момента трения, Н·м | Коэффициент трения |
| 0-300 | 23,709 | 0,504 |
| 300-600 | 19,601 | 0,423 |
| 0-600 | 21,634 | 0,464 |
| Покрытие с боридами | | |
| 0-300 | 23,071 | 0,462 |
| 300-600 | 20,045 | 0,420 |
| 600-900 | 19,678 | 0,393 |
| 0-900 | 20,960 | 0,425 |

Среднее значение металла покрытия без боридов относительного износа за испытание составило 0,00755 г/м. Массовый износ для пути трения в 113 м составил 0,674 г. Среднее значение линейного износа за испытание составило 0,0235 мм/м. В результате испытаний момент трения

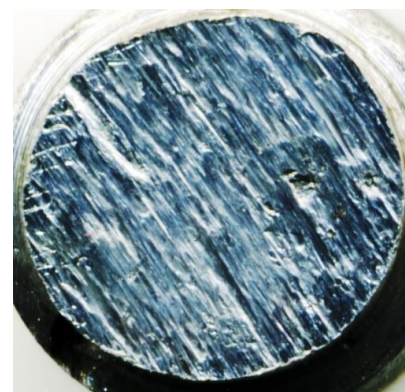
упал с 23,709 Н·м (для пути трения 113 м) до 19,601 Н·м (для пути трения 226 м). Среднее значение момента трения за путь трения 226 м составило 21,634 Н·м. Коэффициент трения упал с 0,504 (для пути трения 113 м) до 0,423 (для пути трения 226 м), а среднее значение за испытание составило 0,464.

Металл покрытия с боридами выдержал 900 оборотов при пути трения 339 м, а затем образцы были сняты с дальнейших испытаний. Средний массовый износ образцов после 300 оборотов составил 0,882 г, а после 600 оборотов – 1,179 г. После 900 оборотов он достиг всего 1,41 г. Относительный износ существенно падает с 0,0078 г/мм в начале пути трения до 0,0021 г/м в конце. Среднее значение относительного износа за испытание составило 0,00416 г/м, что в 1,8 раза меньше чем у металла покрытия без боридов. При этом износ по длине составил 4,15 мм. Среднее значение линейного износа составило 0,0122 мм/м, что в 1,9 раза меньше чем у металла покрытия без боридов. Момент трения упал с 23,071 Н·м (для пути трения 113 м) до 19,68 Н·м (для пути трения 339 м). Среднее значение момента трения за весь путь трения составило 20,96 Н·м. Коэффициент трения упал с 0,462 (для пути трения 113 м) до 0,393 (для пути трения 339 м), и составил среднее значение при испытаниях 0,425.

Дополнительную информацию о процессах разрушения поверхностного слоя исследуемых покрытий дает анализ их топографии (рис. 1)



а)



б)

Рис. 1. Поверхность образца наплавленного покрытия после испытания на износ: а) без боридов; б) с боридами

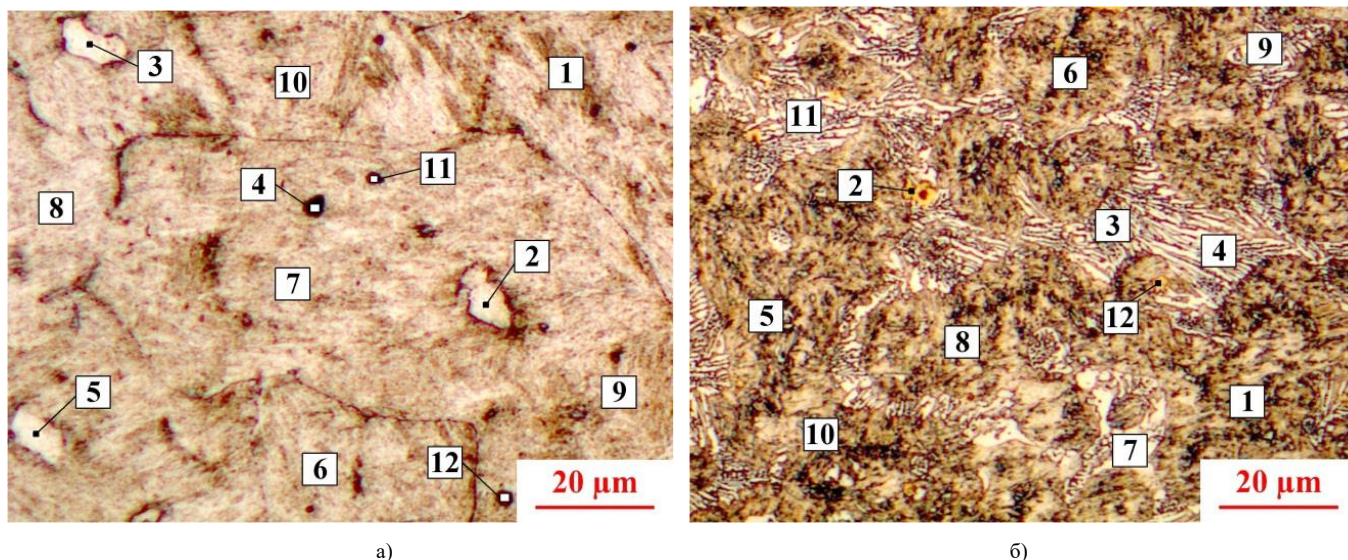


Рис. 2. Изображение микроструктуры с распределением мест замера микротвердости составляющих металла покрытий, наплавленных порошковыми проволоками: а) без боридов; б) с боридами

Для образцов без боридов прошедших испытание в большей мере характерен бороздчатый с глубинными вырывами рельеф поверхности износа с присутствием как мелких, так и крупных частиц продуктов изнашивания (рис. 1, а), что свидетельствует о протекании процессов адгезионного схватывания контактирующих поверхностей, сопровождающихся их задирами и заеданием. Покрытие без боридов с его относительно низкой твердостью (≈ 40 HRC) не обладает достаточным сопротивлением внедрению вершин микронеровностей контртела, что способствует высокой интенсивности изнашивания и повышенному коэффициенту трения за счет увеличенного числа очагов микросхватывания. Длительное фрикционное нагружение приводит к прогрессирующему разрыхлению поверхностного слоя металла, связанному с возрастанием числа очагов разрушения [26]. Разрушение этого слоя приводит к катастрофическому изнашиванию, которое наблюдается после 226 м пути трения.

Поверхность образца покрытия с боридами имеет относительно гладкий вид и характеризуется незначительными глубинными вырывами (рис. 1, б). Наблюдается явное сглаживание поверхности рельефа, дорожки более узкие и гладкие. После фрикционного нагружения имеет место формирование блочной структуры квазиравномерно распределенной по объему поверхностного слоя. В поверхностном слое также реализуется, наряду с упрочнением, некоторая пластичность материала за счет высокой протяженности блочных границ и граничного проскальзывания [27]. Измельчение блочной микроструктуры приводит к увеличению предела макроскопической упругости и сопротивления усталостному разрушению за счет уменьшения зернограничного растрескивания [28].

Для выявления причин различий в твердости покрытий, наплавленных порошковыми проволоками исследуемых составов выполнен комплекс металлографических и электронномикроскопических исследований.

Микроструктура металла, наплавленного проволокой без боридов, представляет собой смесь низкоуглероди-

стого мартенсита с высокодисперсным перлитом. По границам зерен наблюдается выделения частиц, по-видимому, карбидов и δ -феррита. Такая смешанная структура и обеспечивает твердость металла в пределах до 40 HRC.

Наплавленный металл покрытия с боридами имеет сложную композиционную структуру с мартенситной матрицей, большого количества эвтектики и частиц упрочняющих фаз. Твердость такого металла достигает максимального значения в 57 HRC.

ДюрOMETрические исследования показали существенные различия в микротвердости структурных составляющих металла исследуемых покрытий (рис. 2, и табл. 4).

Таблица 4

Микротвердость HV_{0,01}* и HV_{0,05} структурных составляющих металла покрытия, наплавленного порошковыми проволоками

| № укола | Твердость, HV | № укола | Твердость, HV |
|-------------|---------------|------------|---------------|
| без боридов | | с боридами | |
| 1 | 408 | 1 | 646 |
| 2* | 376 | 2* | 1247 |
| 3* | 358 | 3 | 783 |
| 4* | 551 | 4* | 847 |
| 5* | 384 | 5 | 656 |
| 6 | 424 | 6 | 646 |
| 7 | 393 | 7 | 617 |
| 8 | 429 | 8 | 667 |
| 9 | 389 | 9* | 847 |
| 10 | 411 | 10 | 641 |
| 11* | 609 | 11 | 764 |
| 12* | 572 | 12* | 1128 |

Как видно микротвердость матрицы металла без боридов изменяется от 390 до 430 HV, δ -феррита от 358 до 384 HV, а упрочняющих фаз 550-610 HV.

Микротвердость структурных составляющих металла наплавленного порошковой проволокой с боридами составляет для матрицы 617-648 HV, эвтектики 764-847 HV и упрочняющих фаз 1128-1247 HV.

Электронномикроскопический анализ покрытия наплавленного порошковой проволокой с боридами пока-

зал, что структура металла представляет собой железо-хромистую мартенситную матрицу с эвтектической составляющей, образованной на базе борида $(Fe, Cr)_2B$ имеющего каркасное строение и высокопрочного нитрида $(Fe, Cr)_{2,3}N$. Боридная эвтектика характеризуется наличием значительного количества дисперсных включений большей частью нитридов и карбидов титана и меньшей частью нитридов циркония размером от 0,5 до 2,5 мкм.

Полученные результаты указывают на то, что механизм износа металла покрытия с боридами связан с его повышенной твердостью обусловленной не только дисперсным упрочнением частицами боридных соединений, но и наличием боридной эвтектики, являющейся эффективным препятствием для скольжения дислокаций в условиях пластического деформирования поверхности при изнашивании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, износостойкость металла с боридно-нитридным легированием можно объяснить совместным влиянием каркаса твердых эвтектических боридов, и частиц боридно-нитридно- и интерметаллидных соединений, которые в условиях абразивного изнашивания воспринимают часть контактного взаимодействия, что увеличивает стойкость против задирания наплавленного металла, работающего в условиях истирания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шпайдель М.О. Новые азотсодержащие аустенитные нержавеющие стали с высокими прочностью и пластичностью // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2005. – № 11 (605). – С.9–13.
2. Шлямнев А.П. Азотсодержащие нержавеющие стали – структура, свойства, перспективы производства и применения // *Проблемы чёрной металлургии и материаловедения*. – 2007. – № 1. – С.53–60.
3. Костина М.В. Хромистые коррозионностойкие стали, легированные азотом, новый класс конструкционных сталей / М. В. Костина, О. А. Банных, В. М. Блинов // *Технология металлов*. – 2000. – № 10. – С. 2–12.
4. Simmons J.W. Sensitization of high-nitrogen austenitic stainless steels by dichromium nitride precipitation / J. W. Sommons, J. D. Atteridge, J. S. Rawers // *Corrosion*. – 1994. – V. 50. – P. 491–501.
5. Gavriljuk V.G. Nitrogen in iron and steel / V. G. Gvriľjuk // *ISIJ Inter*. – 1996. – V. 36. – P. 840–845.
6. Saucedo M.M.L. Precipitation in aged N-containing austenitic stainless steels / M. M. L. Saucedo, V. M. Lopez Hirata // *Materials Science Forum*. – 2007. – V. 561–565. – P. 2275–2278.
7. Speidel M.O. Nitrogen containing austenitic stainless steel // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. – 2006. – V. 37, No. 10. – P. 875–880.
8. Gadhikar Aniruddha A.. Physical metallurgy and melting practice of nitrogen-bearing austenitic stainless steels / Aniruddha A. Gadhikar, C.P. Sharma, D.B. Goel, Ashok Sharma, S.K. Goel // *Indian Foundry Journal*. – 2010. – V.56, No. 3 (March). – P. 23–31.
9. Nakamura N. Effect of structural factors on the mechanical properties of high nitrogen austenitic steels / N. Nakamura, T. Tsuchiyama, S. Takaki // *Materials Science Forum Vols*. – 1999. – P. 209–214.
10. Лякишев Н. П. Боросодержащие стали и сплавы / Н. П. Лякишев, Ю. Л. Плинер, С. И. Лаппо. – М.: Металлургия, 1986. – 192 с.
11. Zhong L. High boron iron-based alloy and its modification / L. Zhong, C. Xiang, L. Yan-xiang, H. Kai-hua // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2009. – V. 16, No. 3. – P. 37–42.
12. Raghavan V. B – Cr – Fe – Ti (Boron – Chromium – Iron – Titanium) / V. Raghavan // *Journal of Phase Equilibria*. – 2003. – V. 24, No. 5. – P. 459–460.
13. Искольдский И. И. Наплавочные боридные твердые сплавы. – М: Машиностроение, 1965. – 72 с.
14. Шеенко И. Н. Современные наплавочные материалы на основе тугоплавких соединений / И. Н. Шеенко, В. Д. Орешкин, Ю. Д. Репкин. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1970. – 237 с.
15. Износостойкие наплавочные материалы на основе тугоплавких соединений // *Сборник научных трудов под редакцией Г.В. Самсонова*. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1977. – 132 с.
16. Шеенко И.Н. Применение карбоборидных соединений в наплавочных материалах / И. Н. Шеенко, О. П. Гапонов // *Сварочное производство*. – 1969. – № 5. – С. 27-28.
17. Данькин А.А. Электрошлаковая наплавка карбидов бора и кремния на стальные изделия / А.А. Данькин, В.И. Светлополюнский, В.Н. Каледа // *Сварочное производство*. – 1993. – № 2. – С. 8-10.
18. Артемьев А.А. Формирование композиционной структуры износостойкого наплавленного металла с боридным упрочнением / А.А. Артемьев, Г.Н. Соколов, Ю.Н. Дубцов, В.И. Лысак // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2011. – №2 – С. 44–48.
19. Артемьев А.А. Влияние микрочастиц диборида титана и наночастиц карбонитрида титана на структуру и свойства наплавленного металла / А.А. Артемьев, Г.Н. Соколов, В.И. Лысак // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2011. – № 12 (678). – С. 32–37.
20. Eremin E.N. Using boride compounds in flux-cored wires for depositing maraging steel // *Welding International*. – 2013. – Vol. 27, № 2. – P. 144–146.
21. Yeremin, Ye.N. Mechanical properties and thermal stability of a maraging steel with borides, deposited with a flux-cored wire / Ye.N. Yeremin, A.S. Losev // *Welding International*. – 2014. – Vol. 28, No. 6. – P. 465–468.
22. Tanaka K. Phase equilibria in TiB₂-reinforced high modulus steel / K. Tanaka, T. Saito // *Journal of Phase Equilibria*. – 1999. – V. 20, No. 3. – P. 207–214.
23. Курдюмов А.В. Фазовые превращения в углероде и нитриде бора. / А.В. Курдюмов, А.Н. Пилянкевич – Киев: Наук. думка, 1979. – 188 с.
24. Еремин Е.Н. Боридно-нитридное упрочнение металла наплавленного высокохромистой порошковой проволокой / Е.Н. Еремин, А.С. Лосев, С.А. Бородихин // *Сварочное производство*. – 2018. – №7. – С. 3-8.
25. Eremin E.N. Effect of the boride-nitride hardening on the structure and properties of chromium steel deposited with a flux-cored wire / E. N. Eremin, A. S. Losev, S. A. Borodikhin, K.Ye. Ivlev // *Oil and Gas Engineering (OGE-2017) AIP Conference Proceeding*. – 2017. – V. 1876. – P. 020071-1–020071-6.

26. Tarasov S. Effect of friction on subsurface layer microstructure in friction and martensitic steels / S. Tarasov, A. Kolubaev // *Wear*. – 1999. – V. 231. – P. 228–234.

27. Korshunov L.G. Ultrafine structures formed upon friction and their effect on the tribological properties of steels / L.G. Korshunov, A.V. Makarov, N.L. Chemenko // *Physics of Metals and Metallography*. – 2000. – V. 90, Suppl. 1. – P. 548–558.

28. Pinchuk V.G. Physical patterns of dislocation structure kinetics in friction loaded surface layers / V.G. Pinchuk, S.V. Korotkevich // *Global Journal For Research Analysis*. – 2015. – V. 4, Iss. No. 5. – P. 255–257.

Wear Resistance and Characteristics of the Friction Surface of Metal Coatings with Nitride-boride Alloying

Eremin E.N., Losev A.S., Borodikhin S.A.

Omsk State Technical University (OmSTU)

Omsk, Russia

weld_techn@mail.ru, alesha-los@yandex.ru, froze8@mail.ru

Abstract. The wear resistance and characteristics of the friction surface of metal coatings with nitride-boride alloying are investigated. The object of the study was the steel deposited with flux-cored wire containing 15% chromium, 0,5% boron nitride, 1,25% titanium diboride and 0,5% zirconium diboride. It was established that the average value of the relative wear per test was 0.00416 g/m, which is 1,8 times less than that of the coating metal without borides. The average value of linear wear was 0,0122 mm/m, which is 1,9 times less than that of the coating metal without borides. The average value of the friction torque for the entire friction path in 339 m was 20.96 N·m. The coefficient of friction was 0,425. The hardness of such a metal reaches a maximum value of 57 HRC.

The microhardness of structural objects is for the matrix 617-648 HV, eutectic 764-847 HV and strengthening phases 1128-1247 HV. It is shown that the metal structure is an iron-chromium martensitic matrix with an eutectic component formed on the basis of boride (Fe, Cr)₂B and high-strength nitride ϵ -(Fe, Cr)₂₋₃N, which is an effective obstacle to dislocation slip under conditions of plastic deformation of the surface at wear.

Keywords: surfacing; flux-cored wire; alloying, borides, structure; hardness; wear resistance.

Нанесение каталитических покрытий методом ионной имплантации

Злобин В.Н., Сорокин А.М., Кудашев А.С.

Волгоградский государственный технический университет
Волгоград, Россия

vlazlobin@yandex.ru, a.sorokin05@bk.ru, Ask_0@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены преимущества метода ионной имплантации в сравнении с существующими методами вакуумного напыления. Показано, что свойства поверхности могут изменяться в широких пределах, после обработки поверхности возможно увеличение удельной поверхности материала образцов, поверхность после имплантации повышает свою каталитическую активность и изменяет механические свойства. Представлена установка ионной имплантации для реализации данного метода и принцип ее работы. Описан технологический процесс нанесения на рабочие поверхности каталитических покрытий различного назначения. Приведены результаты рентгеноструктурного анализа образцов, в поверхность которых внедрены методом корпускулярного легирования ионы катализатора. Произведено исследование опытных образцов различной формы. В результате их сравнения с образцами, не подвергнутыми ионной имплантации, выявлены свойства, позволяющие рекомендовать указанный метод для снижения токсичных выбросов газогорелочных устройств и других топливосжигающих устройств.

Ключевые слова: ионы, имплантация, вакуумное напыление, кристаллическая решетка, каталитическое покрытие.

ВВЕДЕНИЕ

Экологическая безопасность работы оборудования тепловых установок определяется рядом факторов, в том числе степенью сгорания топлива. Известно, что при неполном его сгорании образуются вредные для человека и окружающей среды оксиды азота (NO_x), серы (SO_x), углерода (CO) и др. [1]. Чтобы повысить эффективность сгорания топлива в газомазутных горелках и улучшить экологические показатели отработанных газов предлагается применить корпускулярное легирование внутренних рабочих поверхностей горелок, которое является одним из наиболее перспективных способов модификации поверхности [2]. На горелки одновременно наносятся как каталитические, так и жаропрочные покрытия. Вредные вещества, которые содержатся в отработанных газах, окисляются на поверхности катализатора до безвредных соединений – окислов, а топливо дожигается до углекислого газа и воды.

Как показал отечественный и зарубежный опыт, получение металлических катализаторов в промышленном масштабе реализовано методом пропитки соединениями различных металлов каталитически инертных носителей, в качестве которых, например, могут быть использованы как искусственные твердые тела с высокой развитой удельной поверхностью и пористостью (силикагель, Al_2O_3 , алюмосиликат, MgO), так и естественные (пемза, асбест, диатомит), но последние реже. Такой способ приготовления катализатора имеет ряд недостатков, в том

числе: уменьшается общий объем пор на 20–45%; при работе происходит снижение удельной поверхности нанесенного катализатора за счет агломерирования каталитического компонента; перерасход каталитического компонента; дороговизна катализатора [2].

Поэтому очень актуален поиск мероприятий, устраняющих недостатки химического метода приготовления катализатора. Применение нанотехнологий – ионной имплантации – значительно расширяет технико-экономические параметры изделий с таким покрытием. К преимуществам данного метода по сравнению с традиционными способами нанесения покрытий (диффузией, сплавлением, легированием из расплава, легированием в процессе эпитаксии) относятся следующее [3,4]:

- химические и физические свойства поверхности могут изменяться в широком диапазоне без связи с объемными свойствами образца, такими, как предел растворимости;

- отсутствуют поверхности раздела между внедренным слоем и материалом основы, которые часто являются причиной коррозии за счет контактной разности потенциалов или источником ухудшения механических свойств за счет недостаточных адгезионных свойств между слоями;

- расходуется очень малое количество легирующего материала, поэтому, при необходимости, можно использовать дорогие и редкие элементы без значительного повышения стоимости процесса (для катализаторов, наносимых корпускулярным легированием, на газомазутные горелки достаточно нанести 0,02% платины от веса внутреннего экрана горелки для получения эффективного дожигания топлива и доокисления вредных примесей);

- процесс технологичен, хорошо контролируется и воспроизводится.

УСТАНОВКА ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Для реализации этого способа была создана установка ионной имплантации, схема и внешний вид которой предоставлены на рис. 1, 2 [4,5]. Она состоит из вакуумной рабочей камеры - 1, в которой установлен один или несколько источников ионов - 2; система вакуумной откачки воздуха: форвакуумный насос - 3 и высоковакуумный агрегат - 4, которые соединены с вакуумной камерой через вентили - 5 и 6; система дозированной подачи плазмообразующего инертного газа, включающая натекатель - 7 и баллон с инертным газом - 8; стол - 9, где размещаются обрабатываемые детали - 10. Поддержание рабочих параметров установки выполняется с помощью блока пи-

тания и управления - 11. Блок управления установкой содержит схемы управления затвором высоковакуумного агрегата, электропитания плитки высоковакуумного агрегата и форвакуумного насоса и систему блокировки источников электропитания по току и по напряжению. Измерение давления в вакуумной камере и насосе агрегата производится с помощью датчиков ПМТ-2 и ПМИ-2 вакуумметром ВИТ-2 - 12.

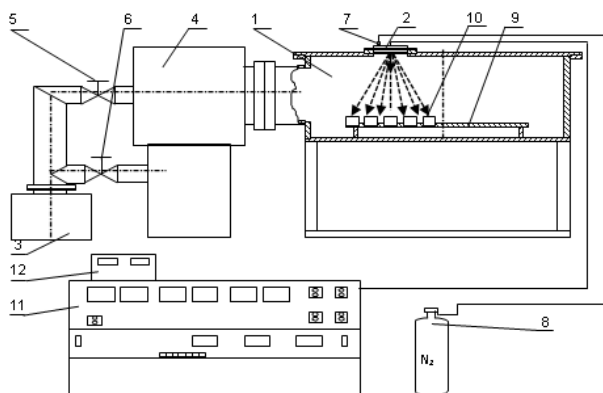


Рис. 1. Схема установки ионной имплантации: 1 – вакуумная камера; 2 – источник ионов; 3 – форвакуумный насос; 4 – высоковакуумный агрегат; 5, 6 – вентили; 7 – натекатель; 8 – баллон с азотом; 9 – стол; 10 – обрабатываемая деталь; 11 – блок питания и управления; 12 – вакуумметр

В основу работы источника ионов положен принцип электрического разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях в парах легирующего элемента и плазмообразующего газа. Заменяя в источнике ионов мишень (центральную сменную часть), получают ионы необходимого легирующего элемента. Для внедрения ионов легирующего элемента используется катодное распыление мишени источника ионами рабочего газа, в качестве которого могут служить азот, кислород, аргон.

Внешний вид источника ионов представлен на рис. 1. Один из электродов является анодом, а два других – катодами, в которых расположены магниты, создающие магнитное поле, продольное оси источника ионов. Мишень в виде цилиндра или диска крепится с помощью накидной гайки на полом штуцере, который охлаждается водой. В зазор между анодом и катодами через трубку подается рабочий газ и при подаче напряжения между ними зажигается тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях. Затем подается на мишень отрицательное напряжение до 10 кВ относительно катодов, при этом положительные ионы рабочего газа выходят из кольцевой щели катода кольцевого разряда и бомбардируют мишень.

Нейтрали наносимого вещества, выбитые из мишени, попадают в разрядный промежуток, образованный мишенью и внутренним цилиндром – анодом, и ионизируются. В сторону, противоположную мишени, выходит поток ионов и нейтралей рабочего газа и наносимого вещества, при этом ионы ускоряются в сторону обрабатываемой по-

верхности отрицательным напряжением до 40 кВ, приложенным к обрабатываемой поверхности относительно заземленного катода кольцевого разряда.

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Задачей исследования явилось определение каталитических свойств поверхностей изделий через определение изменений структуры в кристаллической решетке поверхности изделия, вызванной ионной имплантацией.

При исследовании использовались образцы двух видов: прямоугольники размером 10×20 мм и цилиндры диаметром 5 мм при толщине 5 мм, на которые методом ионной имплантации было нанесено каталитическое покрытие. Материалом образцов являлся алюминиевый сплав АЛ 25, поверхность которого предварительно полировалась, а затем подвергалась имплантации.

Обработка производилась платиной при вакууме $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па со следующими параметрами: напряжение между изделиями и мишенью 18 кВ, ток между изделиями и мишенью 12 мА. Доза легирования составляла $1 \cdot 10^{17}$ ион/см².

При исследованиях поверхности использовался рентгеноструктурный анализ каталитического покрытия. Анализ подвергались образцы – свидетели, имеющие каталитическое покрытие. В рентгенографических исследованиях определялись микронапряжения в поверхностном слое образца по плоскости (111) для определения толщины слоя, в котором произошли структурные изменения под действием корпускулярного легирования.

Согласно рентгенограмме удалось выявить, что в поверхностном слое возникают сжимающие микронапряжения, а также установить толщину этого слоя, который составляет около 1 мкм. Возможно предположить, что данные изменения вызваны внедрением ионов платины на соответствующую толщину. На глубине 0,3 мкм (300 ангстрем) на 7 атомов алюминия приходится 1 атом платины, что соответствует 14 атомарным %.

Исследования распределения легирующего элемента по глубине проводились спектрометром ДРУС-3 на косых шлифа образцов. Было установлено, что наибольшая концентрация легирующих элементов наблюдается в слое глубиной (0,1-0,15) мкм и составляет 20- 40% .

Исследовалось влияние каталитической поверхности образцов на эффективность их работы в горелочных устройствах, для чего рассматривались два образца – катализатора, на один из которых наносилась платина методом ионной имплантации. На рис. 2. приведена зависимость эффективности катализатора от температуры зоны его реагирования.

Из графика (рис.2) видно, что добавка платины на носителе ШН-2 γ - Al_2O_3 , $\phi 3,5 \dots 6$ мм позволяет повысить эффективность реакции окисления угарного газа до 40% при температурах выше 380°C.

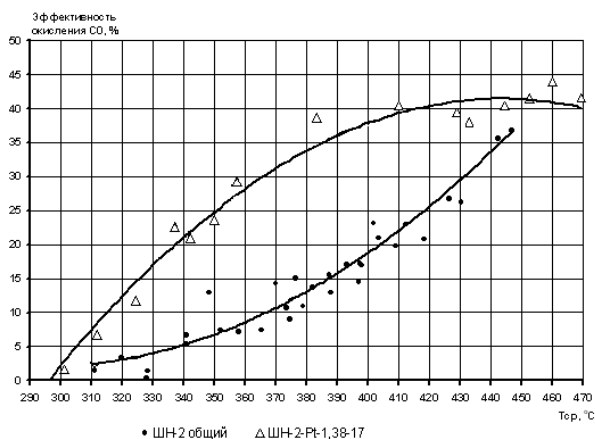


Рис. 2 Зависимость эффективности катализатора от температуры зоны его реагирования

ВЫВОДЫ

По результатам исследований зафиксировано изменение структуры на глубине 1 мкм. На глубине 300 ангстрем определено содержание платины, равное 14 атомных %.

Наблюдается изменение топографии поверхности за счет внедрения ионов платины, что приводит к «разбуханию» объема. Данное явление зафиксировано рентгеноструктурным анализом. Данный фактор положительно влияет на каталитическую эффективность покрытия, так как приводит к повышению удельной поверхности.

Выявлено, что качественный состав приповерхностного слоя не изменяется, за исключением диффузии атомов платины, обеспечивающей равномерное распределение, что положительно влияет на каталитическую эффективность и позволяет рекомендовать способ ионной имплантации для нанесения каталитических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сигал И.Я. Оксиды азота в продуктах сгорания топлива и в атмосферном воздухе. – Хим. Технология, 1985.

2. Злобин В.Н. Экологические и экономические аспекты применения ионной имплантации для производства нейтрализаторов / В.Н. Злобин, О.В. Душко, В.В. Лукин // Вестник Волгоградского университета – Волгоград: Вестник ВолГАСУ.-2004.- Вып. 3 (10).

3. Васильев И.П. Экономические и технологические аспекты применения способа ионной имплантации для приготовления катализаторов / И.П. Васильев, Ю.А. Черкасов, П.Н. Гавриленко, В.Н. Злобин. – Луганськ: Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2000. – №11 (33).

4. Zlobin V.N. Employment of an Ion Implantation Technique for Catalyst Coating on Various Substrates / V.N. Zlobin, M. G. Bannikov // Proc. Of the 7- th Int. Symp. on Advanced Materials, 17 – 21 September 2001. -Islamabad, Pakistan, 2001. - P. 341–345.

5. Злобин В.Н., Кляхина Н.А., Куц Л.Р., Фокин В.М. Установка для нанесения покрытий // заявка 019203 Рос. Федерация № 2010113619/20 (019203), заявл.07.04.2010.

6. Gaponenko A.T. Hardening of a cutting tool by ion implantation / A. T. Gaponenko, V. N. Zlobin // Trans. X-th Int. Symp. On Discharges and Electr. Insulation in Vacuum. – Columbia : South Carolina, 1982. – P. 375–377.

7. Zlobin V.N. Hardening of Cutting Tool Inserts by Ion Implantation / V.N. Zlobin, M.G. Bannikov // Proc. Of the 7-th Int. Symp. on Advanced Materials, 17 – 21 September 2001. - Islamabad, Pakistan, 2001. – P. 470–472

8. Куц Л.Р. Каталитические покрытия для оптимизации работы горелочных устройств систем теплогазоснабжения // Материалы докладов международной научно-технической конференции к 40-летию КГТУ "Энергетика - 2008: инновации, решения, перспективы", 15-19 сент. 2008 г., Казань : в 5 кн. Кн. 1. Теплоэнергетика Казань : [Казанский гос. энерг. ун-т], – 2008. – С. 151–154.

9. Куц Л.Р. Применение корпускулярного легирования в теплогенерирующих установках / Л. Р. Куц, В. Н. Злобин, В. М. Фокин // Инновации в науке и образовании : тр. VI юбилейной междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию пребывания КГТУ на Калининградской земле, 21-23 октября. - Калининград : Изд-во КГТУ, 2008. – Ч. I. – С. 209-211.

10. Куц Л.Р. Каталитические покрытия для оптимизации работы горелочных устройств систем теплогазоснабжения // Материалы докладов международной научно-технической конференции к 40-летию КГТУ "Энергетика - 2008: инновации, решения, перспективы", 15-19 сент. 2008 г., Казань : в 5 кн. Кн. 1. Теплоэнергетика. - Казань : [Казанский гос. энерг. ун-т], 2008. – С. 151-154.

11. Куц Л.Р. Каталитические свойства поверхностей газогорелочных устройств теплогенерирующих установок / Л.Р. Куц, В.Н. Злобин, В.М. Фокин // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы VII Междунар. науч. конф., 13-17 мая 2009 г., Волгоград. – Волгоград : Изд-во ВолГАСУ, 2009. – С. 386-388.

12. Куц Л.Р. Легирование рабочих поверхностей газомазутных горелок / Л.Р. Куц, В.Н. Злобин, В.М. Фокин // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика : материалы 66-й Всерос. науч.-техн. конф. по итогам НИР ун-та за 2008 г. – Самара : [Самарский гос. архит.-строит. ун-т], 2009. – Ч. II. – С. 267-268.

13. Злобин В.Н., Куц Л.Р., Фокин В.М. Газовая горелка // Патент RU № 86282. 2009г. Бюл. № 24.

14. Куц Л.Р. Совершенствование газогорелочных устройств теплогенерирующих установок систем теплоснабжения за счет снижения токсичных продуктов сгорания / Л.Р. Куц, В.Н. Злобин, В.М. Фокин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – Волгоград : Изд-во ВолГАСУ, 2009. – Вып. 13 (32). – С. 114-116.

15. Злобин В.Н. и др. Установка для нанесения покрытий // Патент № 98003 МПК. 2010 г. Бюл. № 27.

16. Злобин В.Н. и др. Устройство для нанесения покрытий в вакууме // Гос. ком. по изобретениям и открытиям при гос. ком. СССР по науке и технике (Госкомизобретений). № 4346878.1990 г.

17. Использование технологии ионной имплантации для каталитических покрытий на различные поверхности / М. Г. Банников [и др.] // Advanced Materials-2001 : proceedings of the 7th international Symposium on Advanced Materials, 17-21 September 2001, Islamabad, Pakistan. - Islamabad, Pakistan : [s. n.], 2001. - P. 342-345. –

18. Черкасов Ю.А. [и др.]. Способ изготовления каталитического элемента нейтрализатора отработанных

газов двигателя внутреннего сгорания // Патент Украина 43128. № 2000127122. 2001 г. Бюл. № 6.

19. Злобин В.Н. Ионная имплантация в энергетике и машиностроении: монография / В.Н. Злобин, И.П. Васильев. – Волгоград: ВолгГТУ, 2018. – 209 с.

The Application of Catalytic Coatings Ion Implantation Method

Zlobin V.N., Sorokin A.M., Kudashev A.S.

Volgograd state technical university

Volgograd, Russia

vlazlobin@yandex.ru, a.sorokin05@bk.ru, Ask_0@mail.ru

Abstract. The advantages of ion implantation method compared to existing methods of vacuum deposition. It was shown that the surface properties may vary within a wide range. The specific surface of the sample material may increase after the surface treatment. As a result of implantation the surface enhances catalytic activity and modifies the mechanical properties. There is a presentation an ion implanter for the implementation of the method and how it works. A process for ap-

plying the catalytic coatings working surfaces for various purposes is disclosed. The results of X-ray diffraction analysis of samples are introduced into the surface by alloying the catalyst corpuscular ions. The research on prototypes of various shapes. As a result, comparing them with samples.

Keywords: ion implantation, vacuum deposition, the crystal lattice, catalytic coating.

Разработка технологических основ изготовления заготовок фрикционных дисков с молибденовым газотермическим покрытием для работы в масле в узлах транспортных машин

Крыхтин Ю.И., Карлов В.И., Леонард А.В.

Волгоградский государственный технический университет
Волгоград, Россия
au@vstu.ru

Аннотация. Настоящий материал посвящён вопросам разработки технологических основ изготовления заготовок фрикционных дисков с пористым молибденовым газотермическим покрытием, нанесенным плазменным напылением, для работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин. Для обеспечения высоких эксплуатационных показателей предлагается технологическая схема изготовления заготовок дисков трения: дробеструйная подготовка поверхности стальной основы диска, нанесение молибденового покрытия, отличающегося высокой адгезией к черным металлам, механическая обработка покрытия шлифованием, контроль качества покрытия. Разработанные технологические основы изготовления заготовок фрикционных дисков с молибденовым газотермическим покрытием, нанесенным плазменным напылением, для работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин способствуют созданию эффективной продукции с повышенными эксплуатационными показателями по коэффициенту трения, износостойкости, надежности в со-временных условиях на предприятиях.

Ключевые слова: заготовка, диск трения, газотермическое покрытие, плазменное напыление, трение в масле, трансмиссия.

ВВЕДЕНИЕ

Фрикционные «родственные» металлические пары (сталь – сталь, чугун – чугун, сталь – чугун и др.), которые ещё применяются при работе со смазкой из-за реализации прочностных качеств и особенно фрикционной эффективности подвижного соединения, характеризуются нестабильным коэффициентом трения, резко понижающимся с повышением скорости скольжения и температуры, склонностью к схватыванию при высоких температурах [1].

Для исключения процессов схватывания на фрикционном стальном контакте, характерных для однородных трущихся материалов, повышения надёжности и долговечности работы фрикционных узлов в настоящее время используются новые конструктивные и технологические решения, к которым можно отнести применение пористых фрикционных спеченных материалов и газотермических покрытий [2, 3].

В настоящее время широкое распространение для работы в масле получили пористые спеченные фрикционные материалы на основе меди, легированные оловом или цинком – материалы типа МК-5. Фрикционные накладки из этого материала прессуются и спекаются с основой под давлением. Спеченный фрикционный материал МК-5 ТУ

14-1-12-91-75 хорошо зарекомендовал себя при работе по стали в условиях смазки в фрикционных узлах транспортных машин. Вместе с тем, этот материал имеет ряд недостатков, основными из которых являются наличие в его составе дорогостоящих компонентов (медь, свинец, олово и др.), низкий коэффициент трения, значительная трудоёмкость при изготовлении.

ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК

Метод плазменного напыления позволяет получить различные по составу пористые газотермические покрытия, прочно связанные с основным металлом детали. Этот способ позволяет объединить процессы формирования и спекания конгломерированных частиц на напыленных поверхностях [4, 5]. Процесс нанесения плазменного напыления легко механизуется и автоматизируется. На поворотном столе можно установить несколько дисков под напыление покрытия. Метод автоматизированного плазменного напыления позволяет получить газотермические покрытия, надёжно связанные с основным металлом детали, существенно повысить производительность труда.

Разработка компактных пористых фрикционных изделий, работающих в масле в узлах транспортных машин, с высокими эксплуатационными свойствами актуальна.

Целью проведенной работы является разработка технологических основ изготовления заготовок фрикционных дисков с пористым газотермическим покрытием для работы в масле в узлах транспортных машин с повышенными коэффициентом трения и износостойкостью. Работа проводилась Волгоградским тракторным заводом совместно с Институтом проблем материаловедения Академии Наук Украины.

На рис. 1 представлена конструкция заготовок дисков с плазменным фрикционным молибденовым покрытием, обладающим повышенным коэффициентом трения и износостойкостью при работе в масле, надёжностью сцепления фрикционного материала с основой.

Высокая износостойкость плазменного молибденового покрытия обеспечивается высокой твердостью частиц напыляемого материала и самосмазывающим свойством, обусловленным пропиткой пористого покрытия минеральным маслом, которое выдавливается из пор на поверхность фрикционного контакта [6 –10].

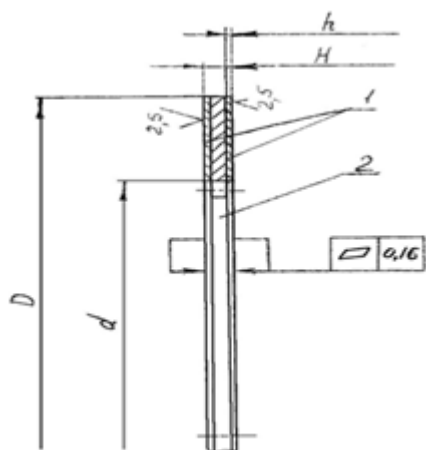


Рис. 1. Фрикционные диски с плазменным покрытием:
1 – фрикционный материал; 2 – основа диска

| D | d | H | h |
|---------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| 216±1 | 168±0,5 | 3,0 _{0,075} | 0,25 ^{+0,06} |
| 176±0,1 | 133 ⁺¹ | 3,3 _{0,075} | 0,25 ^{+0,06} |

Новизной работы являются разработанные технологические основы изготовления заготовок дисков трения с плазменным пористым фрикционным молибденовым покрытием, отличающимся высокой адгезией к черным металлам, для работы в масле.

Разработаны математические модели нагружения фрикционного плазменного покрытия дисков трения комплекса фрикционных устройств различного назначения трансмиссий транспортных гусеничных машин (ГМ) для работы в масле с учетом геометрических характеристик фрикционного устройства и мест его установки.

Для фрикционной муфты переключения передач

$$M_{\text{сц}} > M_{\text{потреб}} = M_{\text{тр}} < [\tau_{\text{кр}}] \cdot 0,2D_{\text{н}}^3 \left(1 - \frac{D_{\text{в}}^4}{D_{\text{н}}^4}\right),$$

для фрикционной муфты привода отбора мощности

$$M_{\text{сопр}} = M_{\text{потреб}} = M_{\text{тр}} < [\tau_{\text{кр}}] \cdot 0,2D_{\text{н}}^3 \left(1 - \frac{D_{\text{в}}^4}{D_{\text{н}}^4}\right),$$

где $M_{\text{сц}}$ – момент по сцеплению ГМ; $M_{\text{сопр}}$ – момент сопротивления в приводе отбора мощности; $M_{\text{потреб}}$ – требуемый крутящий момент; $M_{\text{тр}}$ – момент трения фрикционного устройства; $[\tau_{\text{кр}}]$ – допускаемые напряжения на кручение в сопряжении «плазменное фрикционное покрытие – основа под напыление», определяемые расчетом по математической модели нагружения фрикционного диска; $D_{\text{н}}$ – наружный диаметр покрытия на диске; $D_{\text{в}}$ – внутренний диаметр покрытия на диске.

С помощью математической модели вычисляются напряжения при кручении фрикционного сопряжения «плазменное покрытие – стальная основа». Результаты вычисления сравниваются с результатами экспериментальных испытаний. Для фрикционного диска диаметром 176 мм с плазменным фрикционным покрытием на основе Мо, установленного в тормозе-синхронизаторе для включения зубчатой муфты реверса трансмиссии на изделии массой 18

тонн и с $[\tau_{\text{кр}}] \geq 220 \text{ кгс/см}^2$, пробег испытуемого изделия в 2500 км прошел без замечаний. По результатам испытаний ГМ на практике для фрикционных плазменных покрытий можно рекомендовать $[\tau_{\text{кр}}] \geq 220 \text{ кгс/см}^2$, которое обеспечивается технологией изготовления диска.

Для обеспечения высоких эксплуатационных показателей предлагается технологическая схема изготовления заготовок дисков трения с фрикционным молибденовым газотермическим покрытием, представленная на рис. 2.

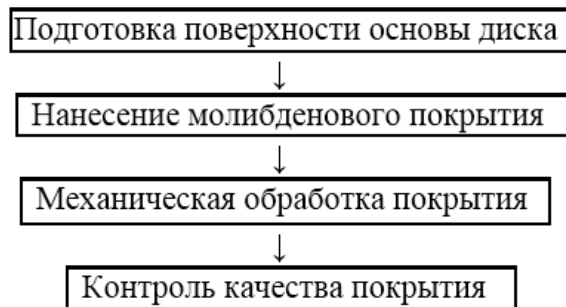


Рис. 2. Схема изготовления заготовок дисков трения с фрикционным молибденовым газотермическим покрытием

Характеристика исходного сырья и материалов для изготовления молибденового покрытия дисков:

Аргон газообразный высший сорт по ГОСТ 10157-79; азот газообразный чистый по ГОСТ 9293-74; проволока молибденовая диаметром 1,4–1,8 мм марки МЧ МРН по ТУ 48-19-203-85 (99% Мо); дробь техническая колотая из чугуна или стали марок ДЧК, ДСК фракции 0,5–1,0 по ГОСТ 11964-81; вода для охлаждения под давлением от 0,4 до 0,7 МПа; сжатый воздух под давлением от 0,5 до 0,7 МПа, допустимые классы загрязнения 3, 5, 7, 9 по ГОСТ 17433-80; нефрас С3 80/120 по ГОСТ 443-76; спирт этиловый ректификат по ГОСТ 5962-67.

Технологический процесс изготовления заготовок дисков трения включает в себя следующие операции:

1. Подготовка поверхности основы диска к нанесению покрытия.

В вытяжном шкафу обезжиривают основу диска путём погружения её на 0,5–1 мин в ванну с нефрасом, затем извлекают из ванны и сушат.

Проводят дробеструйную обработку поверхностей основы диска и проверку чистоты и влажности сжатого воздуха. Лист фильтровальной бумаги устанавливают напротив дробеструйного пистолета, перекрывают подачу дробы и открывают вентиль подачи воздуха. Если в течение 15 минут бумага будет чистой, тогда можно приступать к дробеструйной обработке поверхностей, на которые будет наноситься покрытие. Когда же на фильтровальной бумаге будут наблюдаться масляные или водяные пятна, то необходимо произвести наладку системы очистки и сушки сжатого воздуха, а затем приступить к дробеструйной обработке.

Устанавливают основу диска в дробеструйную камеру и закрепляют её.

Включают вытяжную вентиляцию, открывают вентиль подачи сжатого воздуха (давление должно быть от 0,55 до

0,65 МПа) и посредством тяг управления плавно перемещают дробеструйный пистолет относительно обрабатываемой поверхности. Дробеструйная обработка поверхности будет окончена, когда исчезнут блестящие участки и поверхность приобретёт серебристо-матовый оттенок. Высота микронеровностей составляет в среднем 30–40 мкм.

2. Нанесение покрытия.

Молибденовую проволоку обезжиривают (промывают в нефрасе), высушивают под вытяжкой и наматывают на катушку подающего редуктора. Основу диска, прошедшую дробеструйную обработку, устанавливают в камере напыления и закрепляют в устройстве для напыления.

На рис. 3 показано устройство для напыления покрытия дисков.

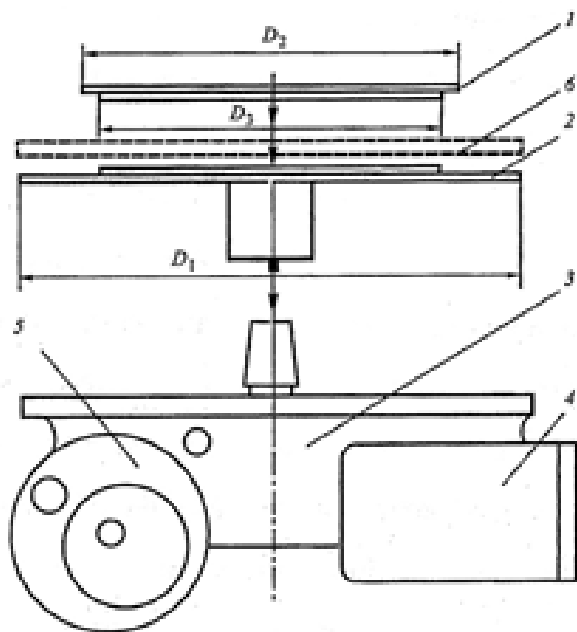


Рис. 3. Устройство для напыления дисков: 1 – крышка, 2 – основание, 3 – редуктор, 4 – электродвигатель для обеспечения поворота диска при напылении фрикционного материала, 5 – ручной привод, 6 – фрикционный диск, D_1 , D_2 , D_3 – размеры устройства для напыления. Стрелками показаны связи узлов и деталей.

В табл. 1 приведены размеры устройства для напыления покрытия дисков двух типоразмеров: диск $\varnothing 176$ мм для тормоза-синхронизатора, диск $\varnothing 216$ мм для фрикционов переключения передач в ГМ.

Таблица 1

Размеры оснастки для напыления дисков

| Наименование | D_1 , мм | D_2 , мм | D_3 , мм |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Диск $\varnothing 216$ | $215 \pm 0,1$ | $168 \pm 0,1$ | $158^{+0,25}$ |
| Диск $\varnothing 176$ | $175 \pm 0,1$ | $133 \pm 0,1$ | $125^{+0,25}$ |

Напыление производится на плазменной установке, предназначенной для нанесения покрытий с помощью дуговой плазмы материалами в виде проволоки. В горелке возбуждается дуга между вольфрамовым электродом и медным водоохлаждающим соплом. Через дугу продувается плазмообразующий газ, который частично ионизируется и при высокой температуре (10000–17000 °С) истекает

из сопла со скоростью, превышающей скорость звука. В качестве плазмообразующего газа используются аргон и азот. Устанавливают дистанцию напыления 100–110 мм.

Включают вытяжную вентиляцию, плазменную установку, регулируют режим работы: напряжение 35–40 В, сила тока 490–510 А, расход плазмообразующего газа (аргон) 27–32 л/мин, давление плазмообразующего газа 0,35–0,40 МПа, скорость подачи молибденовой проволоки 20–25 единиц по нониусу и проверяют качество распыляемого металла. Для этого полосу листовой стали размером $(300 \pm 5) \times (50 \pm 3) \times (2 \pm 1)$ мм обезжиривают в нефрасе, производят дробеструйную обработку её поверхности, вводят в струю распыляемого металла на расстоянии 100–110 мм от среза сопла и производят напыление в течение 5–10 с, выключают установку и проверяют качество распыления. Напыленный слой должен иметь частицы формы расплоснутой капли.

Включают устройство для напыления основы диска, обеспечивая диску скорость вращения 38–62 рад/с. Подводят плазматрон к основе диска, включают плазменную установку, включают подачу молибденовой проволоки на распыление и совмещают пятно напыления с поверхностью основы диска, производят напыление. Напыляемый слой должен иметь частицы не более 0,3 мм. Оптимальный тепловой режим и кинетические параметры напыления имеют частицы размером 40–80 мкм. Выключают плазменную установку, вытяжную вентиляцию и устройство для напыления дисков, снимают заготовку диска и замеряют толщину напыленного молибденового покрытия, которая должна быть равна $0,5 \pm 0,05$ мм по всей поверхности напыления. Если нет требуемого размера, то необходимо произвести повторное напыление.

3. Механическая обработка покрытия.

Шлифование заготовок дисков трения – производят на плоскошлифовальном станке по режиму: скорость резания 30–35 м/с; глубина резания 0,08–0,1 мм; поперечная подача 0,9–1,1 мм/проход; охлаждающая жидкость – эмульсия.

4. Контроль качества покрытия.

После шлифования покрытие диска трения не должно иметь сколов, трещин, раковин. Покрытия, изготовленные с применением метода плазменного напыления, работают в закрытых узлах с маслом, в процессе работы токсичные вещества не образуются.

В табл. 2 приведены расчётные нормы расхода сырья, материалов и энергоресурсов на изготовление заготовок дисков трения с молибденовым покрытием.

Таблица 2

Расчётные нормы расходов на изготовление заготовок молибденовых дисков.

| Наименование сырья, материалов, вида электроэнергии, расходуемых для изготовления молибденовых дисков | Расход на диск | |
|---|-------------------|-------------------|
| | $\varnothing 176$ | $\varnothing 216$ |
| Аргон газообразный, м ³ | 0,480 | 0,600 |
| Проволока молибденовая, кг | 0,250 | 0,36 |
| Дробь техническая, кг | 0,020 | 0,030 |
| Технологическая вода, м ³ | 0,400 | 0,500 |
| Сжатый воздух, м ³ | 20,00 | 28,00 |
| Нефрас, кг | 0,010 | 0,012 |
| Производительность напыления по молибдену, кг/ч | 1,1 | 1,1 |

| Наименование сырья, материалов, вида электроэнергии, расходуемых для изготовления молибденовых дисков | Расход на диск | |
|---|----------------|----------|
| | Ø176 | Ø216 |
| КПД использования молибдена | 0,8 | 0,8 |
| Потребляемая мощность, кВт | 27,5 | 27,5 |
| Расход электроэнергии, МДж (кВт.ч.) | 27(7,33) | 33(9,17) |

В табл. 3 приведены нормы технологического режима при изготовлении заготовок молибденовых дисков трения.

Таблица 3

Нормы технологического режима

| Наименование операции | Продолжительность, мин | | Температура, °С |
|---|------------------------|------|-----------------|
| | Ø176 | Ø216 | |
| Обезжиривание основы диска и её сушка* | 5 | 5 | 25±10 |
| Установка основы диска в дробеструйную камеру | 1 | 1 | 25±10 |
| Дробеструйная обработка основы диска | 4 | 6 | 25±10 |
| Выгрузка основы диска из дробеструйной камеры | 1 | 1 | 25±10 |
| Установка основы диска в камеру напыления | 2 | 2 | 25±10 |
| Нанесение покрытия методом напыления | 16 | 20 | 10000 |
| Выгрузка заготовки диска из камеры напыления | 2 | 2 | 25±10 |
| Шлифование заготовки диска | 10 | 12 | 25±10 |

*Погружать на 0,1–0,5 мин в нефрас.

Заготовки фрикционных дисков, изготовленных по технологии плазменного напыления, имеют следующие показатели:

1. Поверхность трения – 100% молибдена.
 2. Физико-механические свойства молибденового покрытия: твердость – 4800–5200 МПа по Виккерсу; пористость – 18–21% (плотность 8,20–8,15 г/см³); адгезионная прочность – не менее 22 МПа.
 3. Размеры заготовки под диски Ø176 Ø216:
 - наружный диаметр по покрытию – 176мм 216мм;
 - внутренний диаметр по покрытию – 133мм 168мм;
 - общая толщина – (3,8±0,05) мм 3,5±0,05)мм;
 - толщина покрытия на сторону – (0,5±0,05) мм.
 4. Фрикционные характеристики согласно испытаниям на машине трения МТ-68 (условия испытаний: скорость скольжения – 10 м/с, удельное давление – 4 МПа; трение – в условиях ограниченной подачи масла ТСЗп-8 ОСТ 38.01365-84) составляют: коэффициент трения ≥0,15, темп износа в паре со сталью 65Г – не более 5 мкм/км.
 5. Режим напыления: сила тока – 500 А; напряжение – 40 В; дистанция – 105 мм; плазмообразующий газ – аргон, расход газа – 30 л/мин.
 6. Режим механической обработки (шлифовки): шлифовальный круг – эльбор; глубина резания – 0,1 мм; скорость резания – 30–35 м/с; поперечная подача – 0,9–1 мм/проход; охлаждающая жидкость – СОЖ.
- На рис. 4 показан фрикционный диск с молибденовым газотермическим покрытием Ø176 мм толщиной 3,3 мм в состоянии перед эксплуатацией.



Рис. 4. Фрикционный диск с молибденовым газотермическим покрытием Ø176 мм толщиной 3,3 мм в состоянии перед эксплуатацией

ВЫВОД

Разработанные технологические основы изготовления заготовок фрикционных дисков с молибденовым газотермическим покрытием, нанесенным плазменным напылением, для работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин способствуют созданию эффективной продукции с повышенными эксплуатационными показателями по коэффициенту трения, износостойкости, надежности в современных условиях на предприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труханов В.М. Трансмиссии гусеничных и колесных машин / В.М. Труханов, В.Ф. Зубков, Ю.И. Крыхтин, В.Ф. Желтобрюхов. – М.: Машиностроение, 2001. – 736 с.
2. Порошковая металлургия, материалы, технологии, свойства, области применения: справочник / И.М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысельский и др. – Киев: Наукова думка, 1985. – 623 с.
3. Тондер К. Влияние одномерной шероховатости с наклонной ориентацией микронеровностей на гидродинамическую смазку. Часть 2: Движущаяся шероховатая поверхность // Труды американского общества инженеров-механиков. Серия: Проблемы трения и смазки. – М.: Мир, 1988, – № 3. – С. 103–107.
4. Крыхтин Ю.И. Физические основы разработки заготовок дисков трения с молибденовым покрытием для повышения надежности работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин / Ю.И. Крыхтин, В.И. Карлов // Вестник машиностроения. – 2016, – № 12. – С. 70–74.
5. Крыхтин Ю.И. Физические основы разработки заготовок дисков трения с бронзовым покрытием для трансмиссий транспортных машин / Ю.И. Крыхтин, В.И. Карлов // Вестник машиностроения. – 2018, – № 6. С. 42–46.
6. Любченко А.П. Влияние газотермического напыления на структуру и твердость поверхностного слоя / А.П. Любченко, Б.Б. Глушкова, В.П. Тарабанова, Ю.В. Рыжков // Вестник ХНАДУ. – 2008. – №42.
7. Шаривкер С.Ю. Прочность сцепления плазменных напыляемых покрытий с основанием // Порошковая металлургия. – 1967. – № 6 (54). – С.70–73.
8. Эпик А.П. О силах, обуславливающих связь плазменных покрытий с основанием / А.П. Эпик, С.Ю. Шаривкер, Е. А. Астахов // Порошковая металлургия. – 1966. – № 3 (39). – С.48–53.

9. Шаповалов В.В. Актуальные задачи современной триботехники и пути их решения / В.В. Шаповалов, А. Сладковски, А.Ч. Эркенов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 1 (658). – С.64–75.

10. Куликов И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Каменев. // Национальная академия наук Беларуси; Объединенный институт энергетических и ядерных исследований «Сосны». – Минск: Беларуская навука, 2010. – 231 с.

Development of Technological Bases for Manufacturing Blanks of Friction Discs with Molybdenum Gas-thermal Coating for Working in Oil in units of Transport Machines

Krykhtin Y.I., Karlov V.I., Leonard A.V.
Volgograd State Technical University,
Volgograd, Russia
au@vstu.ru, kvi_au@mail.ru

Abstract. This material is devoted to the development of technological bases for the manufacture of blanks of friction discs with molybdenum gas-thermal porous coating deposited by plasma spraying for work in oil in the transmission units of transport vehicles. To ensure high performance, we offer a technological scheme for manufacturing friction disc blanks: bead-blasting preparation of the surface of the steel base of the disc, applying a molybdenum coating characterized by high adhesion to ferrous metals, mechanical processing of the coating by grinding, monitoring the quality of the coating. The developed technological bases for the manufacture of felted discs with molybdenum gas-thermal

coating applied by plasma spraying for operation in oil in the transmission units of transport vehicles contribute to the creation of efficient products with enhanced performance in terms of friction coefficient, wear resistance, reliability in modern conditions at the enterprises.

Keywords: billet, friction disc, gas-thermal coating, plasma spraying, molybden, friction in oil, transmission.

Проблема защиты стальных трубопроводов и пути её решения

Фанда А.Ю., Керимова В.В., Яценко Л.А.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
Новочеркасск, Россия
velichko.anyuta@yandex.ru

Аннотация. Наиболее эффективным способом, обеспечивающим высокую стойкость стальных изделий к коррозии из известных технологий является их эмалирование. В статье рассмотрена проблема защиты стальных трубопроводов и пути ее решения, актуальность их использования, современные тенденции энергосбережения в данной отрасли. Внутренние стекломалевае покрытия защищают трубопроводы от коррозионного воздействия транспортируемой среды, снижают шероховатость и увеличивают пропускную способность, что обеспечивает их долговечность. В данной работе представлена разработка энергосберегающей технологии с использованием сырья Дальнего Востока - диатомита Чернышского месторождения, на основе которого разработан состав однослойного стекломалеваого покрытия. В частности, произведена частичная замена в шихтовом составе песка на диатомит в пропорции 1,25:1, что является более эффективным с точки зрения интенсификации процессов стеклообразования при варке фритты.

Ключевые слова: силикатно-эмалевое покрытие, защита от коррозии, химическая стойкость, технологические свойства, физико-химические свойства.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время силикатные эмали являются перспективным видом покрытий для защиты стальных трубопроводов. По химической стойкости эмалированные стальные трубы не уступают медным, титановым и свинцовым, а по себестоимости они в несколько раз дешевле. Применение эмалированных труб из углеродистых сталей вместо нержавеющей дает десятикратную экономию средств. К числу достоинств такой продукции относится большая механическая прочность, в том числе в сравнении с другими видами покрытий - эпоксидными, полиэтиленовыми, пластмассовыми, а также более высокая стойкость против истирания, благодаря чему появляется возможность уменьшить диаметр трубопроводов без снижения их пропускной способности. [1] Однако необходимо также учитывать следующие статьи экономии:

- увеличение объемов транспортировки за счет устранения коррозионных отложений на внутренней поверхности трубопроводов;
- снижение металлоемкости оборудования;
- снижение энергетических затрат за счет уменьшения гидравлического сопротивления при использовании внутренних силикатно-эмалевых покрытий.

Таким образом, ожидаемый технико-экономический эффект от применения стальных труб с внутренним силикатно-эмалевым покрытием даст возможность увеличить срок службы трубопроводов до 45-50 лет.

АКТУАЛЬНОСТЬ И НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ДАННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Стальные трубопроводы являются основным устройством для транспортировки природного газа, сырой нефти и других жидкостей по всему миру. Однако самым существенным недостатком всех стальных труб является их коррозионное разрушение, что в свою очередь приводит к постоянными финансовыми затратами для его предотвращения.

Под понятием коррозия подразумевается химическое и механическое разрушение металлических поверхностей вследствие воздействия среды. Различают внешнюю и внутреннюю коррозию, причиной которой являются атмосферные явления, грунтовые воды или агрессивная среда, транспортируемая внутри магистральных трубопроводов. Скорость коррозии зависит от агрессивности транспортируемой среды это может быть, как медленный процесс, который может длиться годами, постепенно разрушая структуру металла, так и высокоскоростное разрушение, приводящее к быстрому выходу из строя оборудования. Защита нефтепромысловых и других видов трубопроводов от коррозии является важной задачей для профильной отрасли промышленности.

На многих месторождениях нефти, газа и других жидкостей на внутренней поверхности трубопроводов в процессе их эксплуатации образуются отложения неорганических солей. [2] Они приводят к значительному уменьшению проходного сечения трубопроводов, что влечет за собой рост внутреннего давления, и, соответственно, увеличение механических напряжений в металле; активизируют локальную коррозию вследствие образования под отложениями солей катодных зон; вызывают абразивный износ труб по нижней образующей (канавочная коррозия) в результате срыва пленки отложений солей с внутренней поверхности как отдельно, так и совместно с механическими примесями. Удаление отложений солей на внутренней поверхности трубопроводов и другого технологического оборудования с помощью методов, таких как: использование скребков, ингибиторов солеотложения, кислотной обработки и другие, требует значительных материальных затрат и частых прерываний технологического процесса. Поэтому самым оптимальным методом предотвращения отложений является нанесение защитных покрытий на поверхность металла.

Применение эмалированных покрытий для защиты стальных трубопроводов является перспективным, позволяя получать качественное, долговечное покрытие. [3, 4] Однако, несмотря на то, что стекломаль является наиболее

Работа выполнена в ЮРГПУ(НПИ) при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения № 18-19-00455 «Разработка технологии комплексной защиты трубопроводов для нефти и газа, эксплуатируемых в условиях Дальнего Востока России» (руководитель – Яценко Е. А.).

стойким покрытием, широкому распространению этого способа защиты препятствует сложность технологического процесса нанесения покрытия и отсутствие силикатно-эмалевых покрытий с оптимальными технологическими и физико-химическими свойствами.

В результате анализа нормативной документации были установлены основные требования к свойствам, которыми должно обладать синтезированное силикатно-эмалевое покрытие:

1. Потеря массы фритты, характеризующая кислотостойкость, после воздействия кипящего 20%-ного раствора соляной кислоты в течение 2 ч должна быть не более 0,65%.
2. Потеря массы фритты, характеризующая щелочестойкость, после воздействия 4%-ного раствора гидроксида натрия (едкого натрия) в течение 2 ч должна быть не более 1,6%.
3. Водостойкость фритты должна быть не ниже класса 2/98 по ГОСТ 10134.1.
4. Эмалевое покрытие должно быть без видимой шероховатости, пузырей, сквозных пор, трещин и других дефектов, обнажающих металл.
5. Ударная прочность покрытия не менее 2,0 Дж (0,2 кгс·м).
6. Плотность покрытия от 2,3 до 2,6 г/см³.
7. Прочность покрытия на разрыв не менее 90 МПа (9 кгс/мм²).
8. Сплошность покрытия на внутренней поверхности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основными критериями при разработке антикоррозионных однослойных силикатно-эмалевых покрытий [5] для некоррозионностойких сталей среднеуглеродистых марок являются следующие:

- покрытие должно быть однослойным, сплошным, не допускается наличие сквозных пор, оно должно обладать высокой стойкостью к ударным нагрузкам;
- силикатно-эмалевое покрытие должно быть стойким к воздействию нефтепромысловых сред;
- во время термообработки покрытие должно хорошо сцепляться с подложкой, и после остывания композиция сталь – эмаль должна характеризоваться высокой прочностью сцепления;
- стеклоэмалевое покрытие должно иметь высокую химическую стойкость;
- в состав покрытия должны входить дешевые легкодоступные нетоксичные компоненты;
- стеклоэмалевое покрытие должно предотвращать отложения различных продуктов на стенках стальных трубопроводов.

Установлено, что разрабатываемое силикатно-эмалевое покрытие должно быть синтезировано в системе RO–R₂O–B₂O₃–Al₂O₃–SiO₂–TiO₂. Синтез состава эмалей в данной алюмоборосиликатной системе позволит при оптимальных соотношениях оксидов стеклообразователей и модификаторов получить стабильные стеклообразные материалы с гомогенной аморфной структурой. Это обеспечивает образование прочно связанной трехмерной структурной сетки, основными элементами которой являются тетраэдры [SiO₄], [BO₄] и [AlO₆]. Такая структура обуславливает полностью аморфное строение без наличия кристаллической

фазы, что обеспечивает высокую стойкость эмали к действию различных агрессивных сред, в том числе кислот, щелочей и воды. [6]

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи с учетом анализа литературных данных и вышеуказанных критериев для создания коррозионностойкого силикатно-эмалевого покрытия была выбрана алюмоборосиликатная система RO–R₂O–B₂O₃–Al₂O₃–SiO₂–TiO₂, как наиболее приемлемая в технологии однослойного эмалирования которое должно обеспечивать не только высокую стойкость эмали, но и бездефектное формирование покрытия, что возможно при определенных значениях вязкости и поверхностного натяжения расплава. Для качественной защиты от коррозии в состав стеклоэмалевого покрытия должны входить наиболее тугоплавкие оксиды – SiO₂, Al₂O₃, TiO₂. Основным стеклообразующим оксидом во всех известных составах является кремнезем, количество которого в ранее разработанных составах варьируется в довольно широких пределах – от 35 до 70 %. Содержание остальных компонентов в различных составах может доходить до 10 и влияет тем или иным образом на технологические или эксплуатационные свойства.

В связи с тем, что силикатно-эмалевое покрытие для стальных нефте-, газопроводов и других жидкостей подвергается воздействию агрессивной среды, содержащей углеводороды и пластовую воду, в которой присутствуют хлориды, сульфаты и органические кислоты, а также до 10% сероводорода и 10% двуокиси углерода, поэтому химический состав покрытия №1 разработан на основе известного ранее кислотостойкого состава стекла [7] с повышенным содержанием кварца и пониженным борного ангидрида и щелочных оксидов, что позволит повысить химическую стойкость эмалей и расширить интервал их обжига. Дополнительные добавки TiO₂ и фторидов введены для уменьшения возможной склонности к таким дефектам как сколы и прогары.

Многокомпонентное натриевоборосиликатное покрытие №2 разработано на основе известного ранее состава стекла [7] с высоким содержанием оксидов железа, щелочных оксидов, борного ангидрида и пониженным оксидом кремния. Для значительного понижения вязкости и температуры размягчения эмали, не ухудшая кислотоустойчивости, производится частичная замена Na₂O оксидом лития. Данное покрытие является легкоплавким с низкими температурами варки и обжига.

Химический состав силикатно-эмалевого покрытия №3 разработан на основе составов №1 и 2 с учетом вводимого количества и влияния оксидов на свойства стеклофритты и покрытия.

Таким образом, в качестве защитных покрытий для стальных трубопроводов были разработаны химические составы силикатно-эмалевых покрытий для защиты стальных трубопроводов, представленные в табл. 1.

Разработанные однослойные силикатно-эмалевые покрытия [8] благодаря оптимальному сочетанию оксидов стеклообразователей и модификаторов должны обладать как высокими технико-эксплуатационными свойствами, так и быть технологичными в случае нанесения и обжига на внутреннюю поверхность стальных трубопроводов нефтехимического производства.

Таблица 1

Химические составы однослойных силикатно-эмалевых покрытий

| Силикатно-эмалевое покрытие | Содержание оксидов, мас. % | | | | | | | | | | Сумма, мас. % | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|----------------------------------|------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| | SiO ₂ | B ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | Li ₂ O | TiO ₂ | CaF ₂ | Na ₃ AlF ₆ | MnO ₂ | | Fe ₂ O ₃ | Co ₂ O ₃ | CuO | CaO | SrO | BaO | |
| 1 | 66,13 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 100,0 | |
| 2 | 38,00 | 17,00 | 1,10 | 15,20 | 0,50 | 2,40 | 1,50 | 2,90 | — | 4,14 | 7,00 | 5,00 | 1,30 | — | 2,40 | 3,00 | 2,70 | 100,0 |
| 3 | 56,20 | 11,20 | 3,20 | 11,20 | 1,50 | 4,10 | 4,50 | — | — | 3,00 | 2,60 | 1,00 | 1,00 | 0,50 | — | — | — | 100,0 |

На основании каждого химического состава (табл. 1) рассчитаны по 4 шихтовых состава, представленных тремя сериями (табл. 3), с введением основного оксида SiO₂ разными компонентами для изучения влияния вида и фазового состава (кристаллического или аморфного) на интенсивность процессов стеклообразования. Поэтому были разработаны на основании выбранных химических составов три серии, в рамках которых варьировались сырьевые компоненты для ввода оксида кремния. Таким образом, в серии 1 первый состав №1₁ разработан с введением SiO₂ кремниевой кислотой (nSiO₂·mH₂O), второй №1₂ – кварцевым песком Чалганского месторождения Дальнего Востока, третий №1₃ – частичной заменой песка кремнеземсодержащим сырьем Чернорапского месторождения Дальнего Востока, а именно диатомитом в соотношении 1,25:1 (песок:диатомит), четвертый №1₄ – опокой Ботчинского месторождения Дальнего Востока в соотношении 1,4:1 (песок:опока). Таким же принципом разработаны остальные составы серий.

Выбор сырья для исследования пригодности при производстве силикатных материалов проводился по критериям максимального количества оксида кремния и минимального содержания примесей. Были выбраны: диатомит Чернорапского месторождения, опока Ботчинского месторождения и кварцевый песок Чалганского месторождения. Все месторождения находятся на Дальнем Востоке в небольшом удалении от городов и ближайшем прохождении нефтепроводов. Химические составы данного сырья приведены в табл. 2. [9]

Таблица 2

Химический состав диатомита, опоки и кварцевого песка

| Материал | Содержание оксидов, мас. % | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------|------|------|------------------|-----------------|------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | Fe ₂ O | CaO | MgO | MnO | TiO ₂ | SO ₃ | mm |
| Диатомит Чернорапского месторождения | 79,72 | 7,07 | 0,30 | 1,33 | 3,70 | 1,09 | 0,96 | 0,02 | — | 0,15 | 5,43 |
| Опока Ботчинского месторождения | 71,20 | 12,67 | 0,74 | 1,56 | 6,03 | 1,35 | 0,42 | — | — | 0,89 | 5,14 |
| Кварцевый песок Чалганского месторождения | 99,65 | — | — | — | 0,02 | — | — | — | 0,03 | — | 0,30 |

Таблица 3

Шихтовые составы стеклоэмалевых покрытий

| Серия | № состава | Наименование сырьевых компонентов и их количество, мас. % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----------------|---|-------|----------|-------|----------|----------------|-------|-------|------------------|----------------|----------------|---------|----------------|--------------|----------------|------------|--------------------|---------------------|------------------|---|
| | | Кремниевая кислота | Песок | Диатомит | Опока | Глинозем | Борная кислота | Сода | Поташ | Углекислый литий | Диоксид титана | Плавленый шпат | Криолит | Оксид марганца | Оксид железа | Оксид кобальта | Оксид меди | Кальций углекислый | Стронций углекислый | Барий углекислый | |
| 1 | 1 ₁ | 105,81 | — | — | — | 2,18 | 15,48 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 1 ₂ | — | 66,36 | — | — | — | 15,48 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 1 ₃ | — | 42,15 | 30,27 | — | — | 15,48 | 17,73 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 1 ₄ | — | 54,29 | — | 16,89 | — | 15,48 | 17,67 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 2 | 2 ₁ | 60,80 | — | — | — | 1,12 | 30,18 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 2 ₂ | — | 38,38 | — | — | — | 30,18 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 2 ₃ | — | 25,86 | 15,56 | — | — | 30,18 | 26,45 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 2 ₄ | — | 31,93 | — | 8,68 | — | 30,18 | 26,41 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 3 | 3 ₁ | 89,92 | — | — | — | 3,27 | 19,89 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 3 ₂ | — | 56,40 | — | — | — | 19,89 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 3 ₃ | — | 20,19 | 45,26 | — | — | 19,31 | 19,55 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 3 ₄ | — | 38,35 | — | — | — | 19,89 | 19,22 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

Для приготовления шихт компоненты отвешивали на технических весах Т-200 и смешивали в фарфоровых барабанах на валковой мельнице. В качестве компонентов шихты были использованы химические реактивные материалы [10] марок «хч», «осч» и «чда» и минеральное сырье: кремниевая кислота, песок, диатомит, опока, глинозем, борная кислота, сода кальцинированная, поташ, углекислый литий, диоксид титана, плавленый шпат, криолит, оксид стронция, оксид бария, оксид марганца, оксид железа, оксид кобальта и оксид меди. Составленную шихту помещали в алундовые тигли для дальнейшей варки стекломассы.

Варку эмалей производили в алундовых тиглях, предварительно помещенных в холодную камерную электрическую печь сопротивления с силитовыми нагревателями с

дальнейшим увеличением ее температуры. Для контроля и регулирования температуры варки использовалась термопара платинородий-платиновая. Провар стекломассы определяли методом «пробы на нить» [11], которая формируется погружением прутка из легированной стали марки 12Х18Н10Т в расплав стекла с последующим вытягиванием нити из него. Полностью проваренное стекло имеет нить без пузырей и узелков, блестящую и гладкую. В противном случае варку продолжали.

Охлаждение сваренной стекломассы проводили методом мокрой грануляции в холодной воде, затем ее высушивали в сушильном шкафу при температуре не более 100°C до влажности не более 3%.

В ходе варки стекол установлены режимы стекловарения: составы серий 1, 2 и 3 на основе кремниевой кислоты (№1₁, 2₁, 3₁) и песка (№1₂, 2₂, 3₂) имеют высокую температуру варки 1380, 1250 и 1300°C соответственно и продолжительность 90 минут. У составов серий 1, 2 и 3 на основе диатомита (№1₃, 2₃, 3₃) и опоки (№1₄, 2₄, 3₄) температура варки достигает лишь 1280, 1180 и 1200°C соответственно с продолжительностью 60 минут.

Таким образом, результаты опытов и табл. 4.6 показали, что частичная замена кварцевого песка и гидрата кремния аморфными разновидностями кремнезема природного происхождения дает возможность снизить температуру варки эмали на 100–150°C и продолжительность изотермической выдержки при оптимальной температуре с 90 до 60 мин. Такое сокращение продолжительности варки эмали и ее температуры значительно ускоряет процесс стекловарения и снижает энергозатраты [12]. Этот эффект достигается вследствие применения аморфной формы кремнезема в виде диатомита Черногойского месторождения и опоки Ботчинского месторождения, обладающих более высокой химической активностью по сравнению с песком и кремниевой кислотой и, соответственно, ускоряющего процесс плавки эмалевого фритта. Поэтому использование кремнистых пород (диатомит и опока) месторождений Дальнего Востока в качестве силикатного сырья при варке эмалевого фритта является перспективным направлением в технологии эмалирования.

Изучение технологических и физико-химических свойств стеклогранулята разработанных составов проводили по методикам в соответствии с требованиями ГОСТа Р 525696–2006 «Фритты. Технические условия» приложений Г, Д, Е.

Результаты исследований свойств стеклогранулята представлены в таблице 4.

Как видно из табл. 4 из-за высокого содержания оксидов щелочных металлов и бора, а также низкого содержания оксида кремния наибольшей растекаемостью характеризуются составы серии 2, однако важное для нефте- и газопроводов свойство потеря массы при воздействии кислоты превышает допустимые нормы, регламентируемые ГОСТом Р 525696–2006. Составы серии 1 характеризуются достаточной кислотостойкостью, но состав №1₄ имеет низкое значение растекаемости, что будет негативно влиять на кроющую способность при получении силикатно-эмалевого покрытия на стали. Это связано с тем, что растекаемость является величиной косвенно характеризующей вязкость, поэтому при малом ее значении происходит частич-

ное оголение металла в результате сборки расплава и медленного заплывания кратеров выделившихся пузырей. В этом случае поры могут доходить до металла и при взаимодействии оголенного металла с агрессивными средами происходит наиболее активное его разрушение и интенсивная коррозия металла, что негативно сказывается на сроке службы труб с силикатно-эмалевым покрытием. [13]

Таблица 4

Результаты исследований свойств стеклогранулята

| Наименование свойства | Единицы измерения | По ГОСТ Р 525696–2006 «Фритты. Технические условия» | Номер серии и состава | | | | | | |
|--|--|---|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----|
| | | | Серия 1 | | Серия 2 | | Серия 3 | | |
| | | | №1 ₃ | №1 ₄ | №2 ₃ | №2 ₄ | №3 ₃ | №3 ₄ | |
| Размер гранул фритта при водной грануляции | мм | не более | 5-9 | 4-8 | 4-8 | 4-9 | 4-7 | 5-9 | |
| Растекаемость | мм | более | 38 | 39 | 37 | 51 | 48 | 46 | 42 |
| Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) | $\alpha \cdot 10^{-6}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ | 90–130 | 110 | 109 | 120 | 117 | 115 | 112 | |
| Потеря массы фритты, характеризующая кислотостойкость, после воздействия кипящего 20%-ного раствора соляной кислоты в течение 2 ч | % | не более 1,6 | 0,5 | 0,7 | 3,0 | 3,3 | 1,1 | 1,0 | |
| Потеря массы фритты, характеризующая щелочестойкость, после воздействия 4%-ного раствора гидроксида натрия (едкого натрия) в течение 2 ч | % | не более 1,6 | 1,2 | 1,3 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | |
| Водостойкость | класс | не ниже 2/98* | 2/98 | 2/98 | 2/98 | 2/98 | 2/98 | 2/98 | |

* по ГОСТ 10134.1–82 «Стекло неорганическое и стеклокристаллические материалы. Методы определения водостойкости при 98°C».

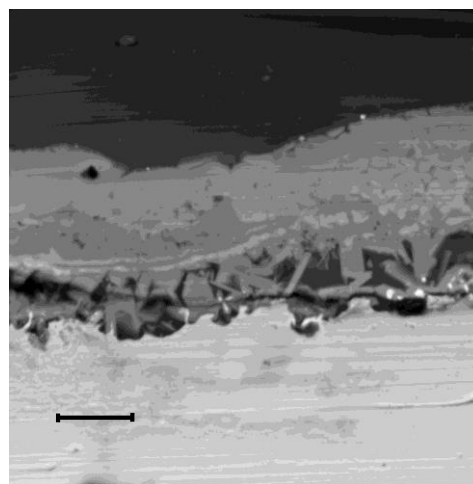
Как видно из табл. 4 из-за высокого содержания оксидов щелочных металлов и бора, а также низкого содержания оксида кремния наибольшей растекаемостью характеризуются составы серии 2, однако важное для нефте- и газопроводов свойство потеря массы при воздействии кислоты превышает допустимые нормы, регламентируемые ГОСТом Р 525696–2006. Составы серии 1 характеризуются достаточной кислотостойкостью, но состав №1₄ имеет низкое значение растекаемости, что будет негативно влиять на кроющую способность при получении силикатно-эмалевого покрытия на стали. Это связано с тем, что растекаемость является величиной косвенно характеризующей вязкость, поэтому при малом ее значении происходит частичное оголение металла в результате сборки расплава и медленного заплывания кратеров выделившихся пузырей. В

Технологические и физико-химические свойства силикатно-эмалевых покрытий

| Наименование свойства | Единицы измерения | По ГОСТ Р 525696-2006 «Фритты. Технические условия» | Номер состава | | |
|--|----------------------------|---|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | Состав 1 ₃ | Состав 3 ₃ | Состав 3 ₄ |
| Наличие дефектов | – | Отсутствуют | Булавочные уколы и поры | Отсутствуют | Отсутствуют |
| Ударная прочность покрытия | Дж (кгс·м) | не менее 2,0 (0,2) | 2,1 (0,21) | 2,2 (0,22) | 2,2 (0,22) |
| Плотность покрытия | г/см ³ | от 2,3 до 2,6 | 2,3 | 2,4 | 2,4 |
| Прочность покрытия на разрыв | МПа (кгс/мм ²) | менее 90 (9) | 92 (9,2) | 70 (7) | 72 (7,2) |
| Прочность сцепления покрытия со сталью | баллы | не ниже 4-х | 4 | 4 | 4 |

Таким образом, оптимальным составом по технико-эксплуатационным и технологическим свойствам является состав №3₃, так как частичная замена в его шихтовом составе песка на диатомит в пропорции 1,25:1 является более эффективной с точки зрения интенсификации процессов стеклообразования при варке фритты. Состав же №3₄ в данном случае уступает составу №3₃ по этому параметру, так как в опоке содержится значительное количество оксида алюминия и в его шихтовом составе соотношение песка и опоки может достигать лишь 1,4:1.

Для изучения микростроения участка контакта эмали и металлической основы образца с силикатно-эмалевым покрытием №3₃ проведено исследование микроструктуры и элементного состава образцов, выполненного на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU (фирмы Tescan) с системами энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT (детектор Silicon Drift (ADD)).



10 нм

Рис.1. Микроструктура поперечного среза стали с эмалевым покрытием

этом случае поры могут доходить до металла и при взаимодействии оголенного металла с агрессивными средами происходит наиболее активное его разрушение и интенсивная коррозия металла, что негативно сказывается на сроке службы труб с силикатно-эмалевым покрытием. [13]

Полученные результаты испытаний остальных свойств табл. 4 позволили установить, что все синтезированные фритты характеризуются близкими по значению показателями свойств и входят в интервалы, допустимые для фритт в соответствии с ГОСТом Р 525696–2006.

Таким образом, в ходе испытаний установлено, что оптимальными свойствами обладают стеклогрануляты составов 1₃, 3₃ и 3₄ так как значения технологических и технико-эксплуатационных свойств входят в пределы, регламентированных ГОСТом Р 525696–2006.

Так как эмалирование стальных изделий производится по мокрому способу, то для этой цели готовится эмалевый шликер, состоящий из частиц эмалевой фритты, воды и мельничных добавок, регулирующих свойства шликера. Приготовление эмалевых шликеров осуществляли путем помола стеклофритты в фарфоровом барабане на валковой мельнице в течение 4 часов до тонины помола 17-20 ед. по сосуду Лисенко с добавкой 7,0 мас. ч. огнеупорной глины, необходимой для предотвращения седиментации частиц эмалевого гранулята, воды – 40,0 мас. ч. и по 0,1 мас. ч. электролитов NaNO₃ и KCl, обеспечивающих необходимую консистенцию. [11] Нанесение стеклоэмалей осуществляли в лабораторных условиях шликерным методом на предварительно обработанную поверхность плоских стальных образцов марки стали 32Г2С, используемой для трубопроводов.

Сушку шликера проводили в сушильном шкафу при температуре не более 100 °С в течение 10–15 мин.

Далее образцы с высушенным шликером загружали в разогретую муфельную печь при температуре 820°С. Выдержку проводили в течение 3 мин после чего образцы с оплавленным силикатно-эмалевым покрытием выгружали и охлаждали при комнатной температуре.

Таким образом, в ходе обжига и формирования эмалевого покрытия на стали получены силикатно-эмалевые покрытия и предварительный визуальный анализ показал, что все эмали имеют равномерно остеклованную поверхность без дефектов, с хорошей сплошностью, глянец и блеском.

Изучение технологических и физико-химических [14-15] свойств разработанных силикатно-эмалевых покрытий проводили по методикам, описанных в ГОСТе Р 525696–2006 «Фритты. Технические условия» в приложениях Ж, И, К, Л.

Анализ результатов, представленных в табл. 5 показал, что показатели свойств силикатно-эмалевых покрытий составов №3₃ и 3₄ полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым ГОСТом Р 52569–2006. При этом состав 1₃ имеет поверхностные дефекты в виде незаплавленных кратеров лопнувших газовых пузырей, которые нарушают сплошность покрытия и в дальнейшем при эксплуатации могут привести к локальному разрушению силикатной эмали.

Анализ рис.1. позволил выявить наличие достаточно широкой промежуточной зоны, образовавшейся между стальной зоны и стеклоэмалевым покрытием в период обжига в результате химических реакций взаимодействия, в ходе которых образовались кристаллы игольчатой формы соединений Si-Fe-O, наличие которых обеспечивает прочное сцепление в системе металл-эмаль. Элементный состав различных зон поперечного разреза также подтверждает наличие сцепляющего промежуточного слоя, содержащего Fe 49,25; Si 13,19; Mn 1,07. Прочность сцепления [16-18], обеспечиваемая наличием промежуточного слоя предопределяет механическую прочность композиции [19, 20] металл-эмаль и будет способствовать повышению их технико-эксплуатационных свойств и длительному сроку службы стальных трубопроводов с внутренним силикатно-эмалевым покрытием.

ВЫВОДЫ

В ходе исследований были изучены проблемы в области эксплуатации трубопроводов и установлено, что для повышения эффективности их использования в различных отраслях требуется нанесение защитных антикоррозионных силикатно-эмалевых покрытий на внутреннюю поверхность.

1. Выбрана система $RO-R_2O-B_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$, в которой разработаны три химических состава силикатно-эмалевых покрытий для защиты стальных трубопроводов.

2. Произведен расчет шихтовых составов для высокотемпературного синтеза стеклофритт, в которых введение основного оксида SiO_2 произведено посредством кремнеземсодержащего сырья Дальнего Востока в форме кристаллического кварца (кварцевого песка Чалганского месторождения и кремниевой кислоты) и аморфного (диатомит Чернойорского месторождения и опока Ботчинского месторождения). При этом производилась частичная замена песка диатомитом и опоккой в количестве 1,25:1 и 1,4:1 соответственно.

3. Установлено, что частичная замена кварцевого песка аморфными разновидностями кремнезема природного происхождения позволяет снизить температуру варки эмали на 100–150°C и продолжительность изотермической выдержки при оптимальной температуре с 90 до 60 мин, что является следствием их более высокой химической активности.

4. Выявлены оптимальные составы стеклофритт (№1₃, 3₃ и 3₄), обладающие требуемыми значениями технологических и физико-химических свойств.

5. Получены силикатно-эмалевые покрытия на основе синтезированных составов №1₃, 3₃ и 3₄, для которых в качестве металлической основы использовалась углеродистая сталь марки 32Г2С.

6. В ходе изучения технологических и физико-химических свойств силикатно-эмалевых покрытий выбран оптимальный состав №3₃. Данный состав характеризуется отсутствием дефектов, ударной прочностью покрытия 2,2 Дж, плотностью покрытия 2,4 г/см³, прочностью покрытия на разрыв 70 МПа и прочностью сцепления покрытия со сталью в 4 балла, что удовлетворяет требованиям ГОСТа Р 525696–2006.

7. Установлено, что частичная замена в шихтовом составе №3₃ песка на диатомит в пропорции 1,25:1 является

более эффективной с точки зрения интенсификации процессов стеклообразования при варке фритты. Состав же №3₄ в данном случае уступает составу по этому параметру, так как в опоке содержится значительное количество оксида алюминия и в его шихтовом составе соотношение песка и опоки может достигать лишь 1,4:1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Внутренняя коррозия трубопроводов – причины, механизм и способы защиты – URL: <http://oilloot.ru> (дата обращения 05.11.2018).

2. Yatsenko E.A. Complex protection of pipelines using silicate materials based on local raw materials of the Far East / Yatsenko E.A., Goltzman B.M., Ryabova A.V. // Materials Science Forum. – 2019. – In press.

3. Рябова А.В. Разработка антикоррозионных стеклоэмалевых покрытий для стальных трубопроводов / А.В. Рябова, Л.В. Климова, Е.В. Филатова, М.В. Давитян, В.В. Хорошавина, А.Ю. Величко // Наука в современном информационном обществе : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., 9-10 нояб. 2015 г. / spc Academic. - North Charleston, USA, 2015. - Т. 2. - С. 166- 168.

4. Брагина Л.Л. Технология эмали и защитных покрытий: учебн. пособ. / Л.Л. Брагина, А.П. Зубехин – Харьков: НТУ «ХПИ»; Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003. – 484с.

5. Химические реактивы – URL: https://standartgost.ru/0/1087-himicheskie_reaktivy?page=1 (дата обращения 07.11.2018).

6. Петцольд А. Эмаль: учеб. пособие пер. с нем. / под ред. В.В. Варгина – М.: Metallurgizdat, 1958. – 511 с.

7. Яценко Е.А. Изучение влияния предварительной подготовки разнородных металлов на качество эмалевого покрытия. // Практика противокоррозионной защиты. – 2010. – № 1 (55). – С.5-12.

8. Яценко Е.А. Изучение влияния способа обработки поверхности стали, как фактора образования контактного слоя, на прочность сцепления системы металл покрытие. / Е.А. Яценко, Е.Б. Дзюба, Н.В. Веропаха // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2012. – № 16 (42). – С.119-128.

9. Яценко Е.А. Фазовый состав и структура контактного слоя системы металл-силикатное покрытие. // Ростов н/Д: СКНЦ ВШ. – 2007. – 152с.

10. Потапов В.Б. Об опыте и перспективах использования стальных труб с антикоррозионными, тепловыми и гладкостными покрытиями // Нефтегазовая Вертикаль – 2004. – №7.

11. Казак К.В. Силикатно-эмалевые покрытия труб/ К.В. Казак, А.К. Казак, В.В. Диденко // Энергетика региона. – 2004. – Т.67. – №2. – С. 31-33.

12. Тишков А.П. Синтез безгрунтовых белых легкоплавких эмалей / А.П. Тишков, А.В. Рябова, Е.А. Яценко // Сборник статей и кратких сообщений по материалам научно-технической конференции студентов и аспирантов НГТУ, г. Новочеркасск, 10-25 апреля 1996 г. Новочеркасск: НГТУ, 1996. – С. 83-85.

13. Зубехин А.П. Физико-химические методы исследования в химии и технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов: учеб. пособие / Зубехин А.П.

Яценко Е.А. Деева А.С., Смолий В.А. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2014. – 234 с.

14. Зубехин А.П. Физико-химические методы исследования тугоплавких неметаллических и силикатных материалов. / Зубехин А.П., Страхов В.И., Чеховский В.Г. – СПб.: Синтез, 1995. – 190с.

15. Варгин В.В. Эмалирование металлических изделий. – Л.: Машиностроение, 1972. – 496 с.

16. Гукасов Н.А. Теория, практика и перспективы использования труб, покрытых эмалью / Н.А. Гукасов, Ю.Н. Михайловский, В.И. Риккер. – М: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2000. – 124 с.

17. Рябова А.В. Функциональные композиционные стеклоэмалевые покрытия для защиты стальных изделий. / Рябова А.В., Хорошавина В.В., Давитян М.В. // В сборнике: Пром-Инжиниринг труды международной научно-технической конференции. ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). – 2015. – С. 141-145.

18. Рябова А.В. Ресурсосберегающие технологии эмалирования стальных изделий / Рябова А.В., Давитян М.В., Величко А.Ю., Хорошавина В.В. // В сборнике: Фундаментальные и прикладные науки сегодня Материалы VII международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 73-79.

19. Ryabova A.V. Glass-enamel corrosion-resistant coatings for steel pipelines. / Ryabova A.V., Yatsenko E.A., Khoroshavina V.V., Klimova L.V. // Glass and Ceramics. – 2017. –Т. 74, № 7-8. – С. 282-287.

20. Рябова А.В. Особенности стеклообразного состояния эмалевых покрытий для антикоррозионной защиты стальных изделий. / Рябова А.В., Хорошавина В.В., Климова Л.В., Величко А.Ю. // В книге: Стекло: наука и практика Сборник тезисов международной конференции. – 2017. – С. 202-204.

The problem of Protecting Steel Pipelines and Ways to Solve it

Fanda A.Yu., Kerimova V.V., Yatsenko L.A.

South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov

Novocherkassk, Russia

velichko.anyuta@yandex.ru

Abstract. The most effective way to ensure high corrosion resistance of steel products from known technologies is to enamel them. The article discusses the problem of protecting steel pipelines and ways to solve it, the relevance of their use, the current trends in energy saving in the industry. Internal glass-enamel coating protects pipelines from the corrosive effects of the transported medium, reduces roughness and increases throughput, which ensures their durability. This paper presents the development of energy-saving technology using raw materials from the Far East - the diatom of the Chernoyarsk deposit, on the basis of which the composition of a single-layer glass-enamel coating was developed. In

particular, the partial replacement of sand for diatomite in the mixture of sand in the proportion of 1.25: 1 was made, which is more effective from the point of view of intensification of glass formation processes during frit cooking.

Keywords: silicate-enamel coating, corrosion protection, chemical resistance, technological properties, physical and chemical properties.

Определение факта и места потерь в электрических сетях низкого напряжения

Казымов И.М., Компанец Б.С.

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова

Барнаул, Россия

vanekman@me.com, kompbs@mail.ru

Аннотация. Данная статья является законченным исследованием способов выявления коммерческих потерь и представляет методику определения факта, места и объема потерь электроэнергии в электрических сетях низкого напряжения. Методика базируется на возможностях современных приборов учета в совокупности с АСКУЭ. Также в статье описывается устройство, которое может быть применено для определения потерь в сетях, не оснащенных современными приборами учета. В первую очередь необходимо установить факт наличия неучтенного потребления электроэнергии в сети, это можно сделать по небалансу токов в электрической сети. Далее определяется место и мощность неучтенного потребления, методика основывается на законе Ома: в электрической цепи все токи вызывают падения напряжения на элементах, и также на сопротивлении проводов питающих линий. Очевидно, что падение напряжения, которое должно наблюдаться на рассматриваемом участке сети может быть рассчитано с применением информации, предоставляемой приборами учета электроэнергии, при этом данные из всех точек сети должны быть получены одновременно, для обеспечения единства полученных значений. На основании данных о физических свойствах проводов и кабелей питающей линии и полученных расчетным путем значений небаланса токов в сети и разницы между фактическим и рассчитанным падениями напряжения определяются точки неучтенного потребления в данной сети и величины неучтенных токов, протекающих через каждую из них. Полученные значения имеют погрешность, практически равную погрешности приборов учета и потому могут считаться достаточно достоверными.

Ключевые слова: электрическая сеть, потери электроэнергии, автоматизация, удаленный контроль, снижение потерь.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время неучтенное технологическое подключение физических или юридических лиц к распределительным сетям низкого напряжения неизбежно приводит к значительному ущербу для энергоснабжающих организаций, что подробно описывается в статьях [1-3]. Данный ущерб относится к коммерческим потерям, то есть это потерянная, но не оплаченная энергия, и его можно существенно снизить применением различных организационных мер, не имеющих отношения к технической составляющей электроснабжения сети. Некоторые меры и алгоритмы предлагались на 7th Brazilian Electrical Systems Symposium в 2018 году [4, 5]. Борьба с «коммерческими» потерями в распределительных сетях на данный момент является одним из важнейших направлений работы по повышению эффективности и рентабельности электросетевого комплекса. Для оценки актуальности рассматриваемой темы проблемы был проведен анализ состояния данной проблемы в компаниях группы "Россети". Суммарный

ущерб электросетевых компаний группы «Россети» составляет свыше 7 млрд. руб. ежегодно [5]. При этом доля возмещенных потерь колеблется, но в основном составляет менее 20%. В частности, по "МРСК Сибири" доля возмещенного ущерба составляет 16,2%.

Также самовольное технологическое подключение к сети является одним из факторов риска нарушения электроснабжения, так как такие подключения по большей части выполняются без соблюдения утвержденных в этой области правил и норм, повышает риск возникновения нарушений работы сети, а также может быть причиной аварии или ухудшения показателей качества электроэнергии, к примеру, выход отклонения напряжения за установленные ГОСТ 32144-2013 рамки [6]. Очевидно, что своевременное выявление и устранение самовольных подключений снизит издержки электросетевых компаний, повысит надежность сети, а также благоприятно скажется на уровне потерь. Реконструируемые и создаваемые вновь сети должны иметь возможность отслеживания потерь и методы оценки их величины, что представляется в статьях [7-10].

На сегодняшний день методы и способы определения факта наличия в сети значительных коммерческих потерь и выявления их места не отвечают требованиям времени и не обеспечивают необходимого уровня точности, своевременности, системности, и, что самое главное – эффективности. Этот вопрос был нами подробно освещен в статье [11]. Все используемые сейчас меры по выявлению неучтенного потребления электроэнергии имеют в своей основе обходы подозрительных сетей сотрудниками электросетевых компаний, анализ приборов учета в лаборатории и на территории потребителей. Результативность подобных действий составляет около 5% обследованных приборов учета, что является крайне низкоэффективным путем расходования временных и финансовых ресурсов. Более подробный анализ современных способов выявления коммерческих потерь выполнен в статье [12].

Предлагаемые решения для удаленного анализа величины потерь в сети используют излишне сложные алгоритмы и большое количество информации. Одни из наиболее широко известных описаны в публикациях [13-18].

В данной работе описывается методика выявления коммерческих потерь в распределительных сетях с определением некоторых их параметров: координаты точки подключения предполагаемого неучтенного потребления в сети, потребляемый ток и неучтенное падение напряжения на участке сети. Кроме того, в работе представлен прибор, способный заменить некоторые функции прибора учета, требуемого для реализации методики, в части снятия пока-

заний параметров электрической сети в точке его установки и отправки их для анализа. Такой прибор является мобильным и может быть использован многократно для проверки различных сетей, не оборудованных приборами учета, за счет простоты и быстроты его монтажа/демонтажа, особенно при использовании неизолированных проводов.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Для проверки сети на наличие неучтенных подключений необходимо, чтобы учет в данной сети осуществлялся по системе АИИСКУЭ, что позволяет передавать показания с каждого из приборов учета на анализ в единый центр обработки данных. Количество необходимых приборов учета для полной оценки наличия неучтенных технологических подключений к сети разнится в зависимости от ее конфигурации, что будет рассмотрено далее, однако в общем случае точность анализа повышается при увеличении используемых в нем приборов учета. Анализ можно проводить для сети в целом и для отдельных ее фрагментов. Так же может быть организован интервальный контроль за сетью, когда передача показаний на проверку происходит автоматизировано с заданной периодичностью, что позволит увеличить точность обработки путем увеличения количества итерации и исключить решающее влияние погрешностей при измерении или других случайных событий в сети, которые могут повлиять на результат.

Требования к снятым показаниям:

- одновременность измерения параметров электрической энергии;
- полнота данных;
- нахождение погрешности измерений в установленных рамках.

Задание сети производится по участкам (ветвям). В общем случае участком называется часть сети или ее фрагмента, заключенная между двумя приборами учета и не имеющая ветвлений на всем протяжении.

Параметры участка, необходимые для полного его задания:

- марка и сечение провода, которым выполнен этот участок;
- длина участка;
- данные о сопротивлении проводника, в случае если есть результаты измерений;
- показания приборов учета, установленных в начале и/или конце участка.

О наличии в рассматриваемой электрической сети неучтенных технологических подключений говорит факт небаланса электроэнергии, «отпущенной» потребителям с питающей подстанции, и суммой потребленной электроэнергии. Похожие методы описаны в статье [19]. Однако метод, основанный лишь на измерениях небаланса электроэнергии обладает существенной погрешностью, так как технические потери в сети нелинейно зависят от передаваемой мощности и в общем случае нельзя говорить о наличии в сети неучтенного потребления электроэнергии, основываясь лишь на небалансе мощностей. Гораздо более корректным будет использование разницы между величиной силы тока в отходящей линии и суммой токов у потребителей в качестве маркера наличия утечек в сети. Так как небаланс токов может возникнуть лишь вследствие наличия

токов утечки на землю через поврежденные изоляторы и другие элементы электрической сети, принадлежащие электросетевой компании и неучтенного потребления электроэнергии, осуществляемого потребителями. Важным моментом является тот факт, что подразумевается разница между силой тока, отдаваемого подстанцией и геометрической суммой токов потребителей. Применение геометрической суммы обосновано тем, что коэффициент мощности каждого потребителя в общем случае индивидуален. Так как в сетях низкого напряжения существованием токов утечки на землю можно пренебречь, факт превышения разницей отдаваемых и потребляемых токов, суммарной погрешности приборов является свидетельством неучтенного потребления электроэнергии на участке. Использование небаланса токов в качестве критерия наличия в сети неучтенных подключений позволяет уменьшить погрешность расчетов, сразу определить суммарную величину неучтенных токов и с большой долей вероятности определять «подозрительные» сети, требующие особенного внимания.

Определение места неучтенного технологического подключения осуществляется по данным о падении напряжения на участках сети. В связи с этим возникает необходимость в определении дополнительных параметров – величины протекающего через прибор учета тока, напряжения в месте его подключения и активной мощности, потребляемой через него. Зная конфигурацию сети, а также владея показаниями приборов учета на подстанции и у потребителей, можно определить дополнительное падение напряжения (ΔU_d) и ток небаланса (ΔI). При помощи полученных данных определяется расстояние (Δl) от ближайшей со стороны подстанции точки установки прибора учета до точки неучтенного подключения.

В общем случае, имея в сети несколько участков, необходимо определить участки, фактические падения напряжения (ΔU_{ϕ}) на которых превышают рассчитанную величину от учтенных токов. В идеальном случае порог этой величины должен составлять 0, однако необходимо учитывать местные условия, например, наличие соединений провода на участке, что приводит к увеличенному падению напряжения на нем из-за увеличения сопротивления проводника, и устанавливать порог, который бы отсекал ошибочное определение наличия на этом участке неучтенного подключения.

В том случае, если в сети находится несколько участков, содержащих точки неучтенного потребления, становится невозможным однозначно определить объем утечки в каждой точке. Поэтому точность расчета снижается до уровня определения участка с неучтенным технологическим присоединением к сети с указанием места утечки как центра всех находящихся на участке точек неучтенного потребления. Однако данный факт не представляет существенной угрозы, поскольку протяженность участков в рассматриваемых сетях в основном не превышает ста метров, что позволяет в краткие сроки произвести предметный визуальный осмотр и уточнить место незаконного подключения на основе данных, полученных в результате расчета.

Разберем пример работы методики для сети простой конфигурации. Для начала рассмотрим участок сети, представленный на рис. 1, длиной $l = 200$ м, выполненного про-

водом АС 70/11 ($r_0 = 0,306$ Ом/км), в начале и конце которого установлены приборы учета $I_1 = 150$ А, $I_2 = 130$ А, $U_1 = 230$ В, $U_2 = 221,5$ В.

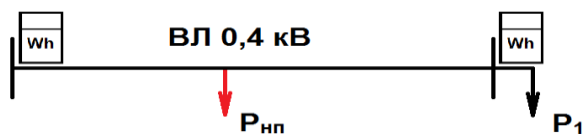


Рис. 1. Участок электрической сети

Очевидно, что в сети присутствует факт неучтенного потребления электроэнергии, так как отдаваемый в сеть ток превышает потребляемый ток на величину $\Delta I = 20$ А, он и будет определять суммарную величину неучтенного потребления. Определим величину падения напряжения на участке от тока нагрузки, протекающего по всей длине участка. Активное сопротивление участка и падение напряжения, вызванное током нагрузки будут равны:

$$R = 0,2 \cdot 0,306 = 0,0612 \text{ Ом};$$

$$\Delta U_{\text{наг}} = 130 \cdot 0,0612 = 7,956 \text{ В}.$$

Фактическое падение напряжения на участке составляет:

$$\Delta U_{\text{факт}} = 230 - 221,5 = 8,5 \text{ В}.$$

Таким образом, присутствует дополнительное падение напряжения $\Delta U_{\text{д}}$, вызываемое неучтенным током $\Delta I = 20$ А будет равно:

$$\Delta U_{\text{д}} = 8,5 - 7,956 = 0,544 \text{ В}.$$

Этот ток вызывает рассчитанное падение напряжения, протекая по части рассматриваемого участка. Таким образом расстояние от прибора учета до места неучтенного потребления будет таковым, что сопротивление участка, по которому протекает неучтенный ток вызовет соответствующее падение напряжения, т.е. составляет:

$$\Delta l = \Delta U / (\Delta I \cdot r_0) = 0,544 / (20 \cdot 0,306) = 0,089 \text{ км}.$$

Данный способ применим и для сетей сложной конфигурации и нескольких мест неучтенного потребления электроэнергии, в таком случае для определения места неучтенного потребления электроэнергии следует двигаться по схеме от подстанции до потребителей. Если $U_{\text{расч}}$ и $U_{\text{факт}}$ в конце участка не совпадают, то неучтенный ток ΔI находится на данном участке и вызывает дополнительное падение напряжения, протекая по части сопротивления.

Расстояние до точки неучтенного потребления электроэнергии от начала участка определяется по сопротивлению участка, на котором происходит падение напряжения. Если $U_{\text{расч}}$ и $U_{\text{факт}}$ совпадают, то ток, вызванный неучтенным потреблением, находится на другом участке и движение по схеме продолжается. Осуществляя такое движение, в конечном итоге определяется участок, содержащий точку неучтенного потребления, и определяется его место.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ НА ПРАКТИКЕ

Для анализа разветвленных сетей общего случая была разработана и апробирована программа для ЭВМ, входящая в состав специализированного программного комплекса на которую получено свидетельство о государственной регистрации [20], в полной мере реализующая описанную выше методику. Данная программа способна анализи-

ровать сеть любой конфигурации и уровня разветвленности, что позволяет применять ее в работе электроснабжающих компаний.

Однако в реальных сетях зачастую применяется не сложно-разветвленная конфигурация сети, а относительно простая схема, когда, например, сеть является магистральной с подключением каждого потребителя к магистрали в точке, обеспеченной прибором учета, или разветвленной, но с установкой прибора учета на опоре линии в каждой из точек ветвления сети. В случае анализа такой сети становится возможным найти точную координату и мощность несанкционированного подключения в любой ситуации. Такая возможность реализуется за счет вышеописанного способа установки приборов учета: в сети формируются простейшие участки по типу показанных на рис. 1, в которых место несанкционированного подключения и объем неучтенно потребляемой электроэнергии определяются по простейшим формулам. Данный вариант методики определения факта и места неучтенного потребления электроэнергии получил развитие в виде программы для ЭВМ [21].

Применение СИП, которые не позволяют простыми способами присоединиться к сети вне предусмотренных для этого мест накладывает свои ограничения на нахождение точек самовольного подключения, снижая круг поисков до непосредственной близости к установленному прибору учета. Данный факт позволяет считать, что точки утечки могут находиться только в месте установки прибора учета и за счет этого допущения применение несколько измененной методики позволяет получить точные результаты о местах и объемах неучтенного потребления в сети, выполненной с использованием СИП. Вариация основной методики, использующая допущения, справедливые для сетей с применением СИП, упрощает расчет за счет возможности считать ток неизменным на всем протяжении рассматриваемого участка. В этом случае так же расчет всей сети сводится к расчету отдельных участков по типу представленных на рис. 1, однако, требуются первоначальные расчеты для определения токов на участке. Такой вариант методики так же представлен в виде программы для ЭВМ [22].

Ввиду того, что СИП набирает все большее распространение в настоящее время, стали появляться сети с магистральной конфигурацией, выполненные с применением СИП. Использование особенностей этой сети позволило создать методику, позволяющую не только точно определить место подключения и величину неучтенного тока через него, но также и просигнализировать о наличии в исходных данных ошибки при задании одного или нескольких участков в сети, что, в свою очередь, позволит не только выявлять нарушения, связанные с неправомерным технологическим присоединением к сети, но и обнаруживать неточности в показаниях приборов учета или заданных параметрах линии. Описываемая конфигурация сети представляет собой наиболее простой для анализа и расчета вариант, объединяющий удобства для расчета обоих вариантов сетей. Для данного случая разработана программа для ЭВМ [23].

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ

Данную методику можно использовать так же и при отсутствии в рассматриваемой сети системы АИИС КУЭ: к

примеру там, где используются старые линии электропередач или исследуется внутреннее электрохозяйство крупных промышленных предприятий; для этого было разработано переносное устройство, способное снимать параметры электрической сети в требуемых точках с точностью, позволяющей уверенно говорить о наличии или отсутствии в сети точек неучтенного потребления электрической энергии. Прибор представляет собой имитацию счетчика электрической энергии в модульном исполнении с дополнительными функциями. Функционально устройство состоит из следующих блоков: блок измерения напряжения; блок измерения тока, блок расчета активной мощности и блок хранения и передачи результатов измерений. В случае установки прибора в местах ветвления линии измерение напряжения достаточно проводить в точке установки, а измерение токов и расчет мощности должно производиться в каждой ветви примыкающей к данному узлу. Амперметры представляют собой токовые клещи, устанавливаемые на провод без необходимости его разрывать, а вольтметры необходимо подключать непосредственно к проводникам сети. Однако необходимость физического присоединения к проводникам сети не влечет за собой создание дополнительных точек соединений проводов ввиду того, что данное устройство предполагается устанавливать в местах, в которых уже созданы контактные площадки. Например, точка присоединения потребителя или точка разветвления сети. Это позволит максимально быстро и просто осуществлять монтаж и демонтаж прибора с линии. Схема подключения устройства для обоих случаев приведена на рис. 2.

Устройство представляет собой модульную конструкцию с двумя типами модулей:

- амперметр, совмещенный с тремя вольтметрами, управляющим устройством, и устройством для приема и передачи данных (управляющий модуль);
- амперметр, подключаемый к управляющему модулю посредством проводов или по каналу беспроводной связи (измерительный модуль).

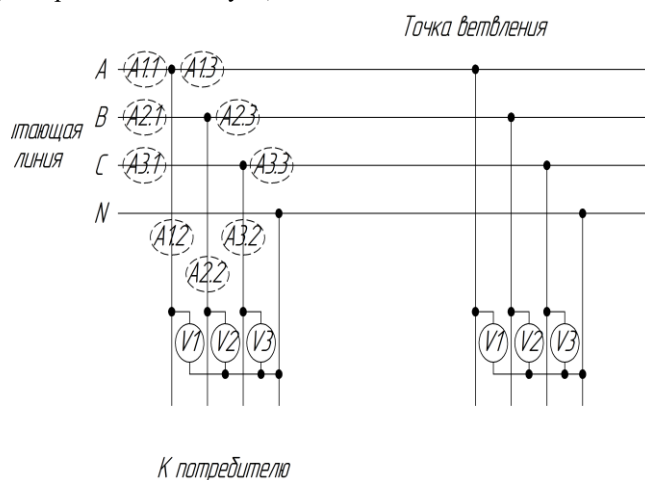


Рис. 2. Схема подключения устройства

По внешнему сигналу управляющий модуль отдает команду на считывание и отправку данных каждому измерительному модулю, а затем формирует информационную посылку, включающую данные о текущих параметрах сети

в точке установки прибора. Одновременность снятия показаний обеспечивается синхронным внешним сигналом и однотипностью модулей.

В случае необходимости контроля за точкой ветвления сети без подключенных потребителей в этой точке достаточно установки только вольтметров.

Устройство позволяет оценить уровень коммерческих потерь в сети и при их обнаружении выполнить полный анализ на предмет определения точек неучтенного потребления и размера утечки. Для анализа сети можно установить достаточное количество устройств за короткое время, а после окончания анализа устройства могут быть демонтированы, что, в свою очередь, делает возможным многократное использование одного и того же набора приборов для оценки различных сетей. Использование такого устройства позволит дополнительно снизить издержки, при этом сохранив высокий уровень эффективности обнаружения коммерческих потерь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

На данном этапе разработана и протестирована методика определения факта и места неучтенного потребления электрической энергии. Созданы четыре зарегистрированных различных программы для ЭВМ, предназначенных для расчета определенных конфигураций сетей по представленной методике и ее частных случаях:

- сложная разветвленная сеть общего случая;
- магистральная сеть (или сеть с ветвлениями в точке, обеспеченной учетом);
- сеть с применением СИП (конкретная конфигурация не имеет значения);
- магистральная сеть, выполненная с применением СИП.

Произведенная апробация показала, что применение наработок, описанных в данной статье, позволяет эффективно производить оценку распределительных сетей различных типов на предмет наличия в них высокого уровня потерь, основываясь только на удаленно получаемых данных, что, в свою очередь, позволило значительно снизить затраты на организационные и технические мероприятия по снижению потерь в исследуемых сетях.

Представленная методика и прибор для ее реализации представляют собой совершенно новое видение коммерческих потерь, значительно отличающееся от современных концепций, предлагаемых в научном мире [24-28].

ЛИТЕРАТУРА

1. Viegas J.L. Clustering-based novelty detection for identification of non-technical losses / J.L. Viegas, P.R. Esteves, S.M. Vieira // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2018. – vol. 101. – P. 301-310.
2. Messinis G.M. Unsupervised classification for non-technical loss detection / G.M. Messinis, N.D. Hatzargyriou // 20th Power Systems Computation Conference, PSCC. – 2018.
3. Rodrigues A.C. Identification of non-technical losses in distribution systems via state estimation and geometric tests / A. C. Rodrigues, A. S. Costa, D. Issicaba // 7th Brazilian Electrical Systems Symposium. – 2018. – P. 1-6.
4. Bezerra U.H Equivalent operational impedance: A new approach to calculate technical and non-technical losses in electric distribution systems / U.H. Bezerra, T.M. Soares, J.P.A.

Vieira, A.R.R. Manito, J.C.H. Paye // 7th Brazilian Electrical Systems Symposium. – 2018. – P. 1-6.

5. <https://iz.ru/> (дата обращения 28.11.2018) «Электричество стали воровать чаще» Известия - URL <https://iz.ru/674956/mariia-nediuk/elektrichestvo-stali-vo-rovat-chashche>

6. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

7. Henriques H.O. Use of smart grids to monitor technical losses to improve non-technical losses estimation / H. O. Henriques, M.R.L.S. Correa // 7th Brazilian Electrical Systems Symposium. – 2018. – P. 1-6.

8. Rossoni A. Contribution to distribution systems technical and nontechnical losses estimation using WLS state estimator / A. Rossoni, S.H. Braunstein, R.D. Trevizan, A.S. Bretas, N.G. Bretas // IEEE Power and Energy Society General Meeting. – 2018. – P. 1-5.

9. Ibrahim K.A. System wide MV distribution network technical losses estimation based on reference feeder and energy flow model / K.A. Ibrahim, M.T. Au, C.K. Gan, J.H. Tang // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2017. – vol. 93. – P. 440-450.

10. Chatterjee S. Detection of non-technical losses using advanced metering infrastructure and deep recurrent neural networks / S. Chatterjee, V. Archana, K. Suresh, R. Gupta, F. Doshi // 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 1st IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe. – 2017.

11. Казымов И.М. Методика определения места незаконных подключений в магистральных распределительных сетях низкого напряжения / И.М. Казымов, Б.С. Компанец // Горизонты образования. – 2017. – №19 – С. 17–20.

12. Казымов И.М. Математическая модель методики определения незаконных подключений в распределительной сети / И.М. Казымов, Б.С. Компанец // Горизонты образования. – 2016. – №18 – С. 32 –34.

13. Viegas J.L. Solutions for detection of non-technical losses in the electricity grid: A review / J.L. Viegas, P.R. Esteves, R. Melício, V.M.F. Mendes, S.M. Vieira // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – vol. 80. – P. 1256-1268.

14. Ahmad T. Non-technical loss analysis and prevention using smart meters // Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2017. – vol. 72. – P. 573-589.

15. Glauner P. Large-scale detection of non-technical losses in imbalanced data sets / P. Glauner, A. Boechat, L. Dolberg, Y. Rangoni, D. Duarte // IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT. – 2016.

16. Kochneva E. Impact of technical losses calculation method on bad data validation on the basis of a posteriori analysis / E. Kochneva, A. Sukalo // IEEE International Energy Conference, ENERGYCON. – 2016.

17. Trevizan R.D. Non-technical losses identification using Optimum-Path Forest and state estimation / R.D. Trevizan, A. Rossoni, A.S. Bretas, A. Carniato, L.F.D.N. Passos // IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech. – 2015.

18. Huang S. C. Non-technical loss detection using state estimation and analysis of variance / S. C. Huang, Y. L. Lo, C. N. Lu // IEEE Transactions on Power Systems. – 2013. – vol. 28, is. 3. – P. 2959-2966.

19. Queiroz L.M.O. Adaptive hybrid genetic algorithm for technical loss reduction in distribution networks under variable demands / L. M. O. Queiroz, C. Lyra IEEE Transactions on Power Systems. – 2009 – vol. 24, is. 1. – P. 445-453.

20. Компанец Б.С., Казымов И.М. Определение факта и места неучтенного потребления электрической энергии в распределительной сети // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017614865. 2017.

21. Компанец Б.С., Казымов И.М. Выявление мест неучтенного технологического присоединения в магистральной сети // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018611363. 2018.

22. Компанец Б.С., Казымов И.М. Определение неучтенного потребления электрической энергии в сети с применением проводов СИП // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018615310. 2018.

23. Компанец Б.С., Казымов И.М. Определение размера хищений электроэнергии в местах установки приборов учета // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018663201. 2018.

24. Chauhan A. Non-Technical Losses in power system: A review / A. Chauhan, S. Rajvanshi // International Conference on Power, Energy and Control, ICPEC. – 2013. – P. 558-561.

25. Aranha Neto E. A. C. Probabilistic methodology for Technical and Non-Technical Losses estimation in distribution system / E. A. C. Aranha Neto, J. Coelho // Electric Power Systems Research. – 2013. – vol. 97. – P. 93-99.

26. Monedero I. Detection of frauds and other non-technical losses in a power utility using Pearson coefficient, Bayesian networks and decision trees / I. Monedero, F. Biscarri, C. León, J. Biscarri, R. Millán // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2012. – vol. 34, is. 1. – P. 90-98.

27. Gawlak A. Analysis of technical losses in the low and medium voltage power network // 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering, EPE. – 2010. – P. 119-123.

28. Ramos C.C.O. Fast non-technical losses identification through Optimum-Path Forest / C.C.O. Ramos, A.N. Souza, J.P. Papa, A.X.Falcão – 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP. – 2009.

Definition of Fact and Place of Losses in Low Voltage Electric Network

Kazymov I., Kompaneets B.
Altai State Technical University
Barnaul, Russia
vanekman@me.com, kompbs@mail.ru

Abstract. This paper presents a complete research of non-technical losses detection methods and give a method to define fact, place and volume of energy losses in low and medium voltage electric networks. Method based on capabilities of modern counting electricity devices in conjunction with automatic system for commercial accounting of power consumption. In addition, this article describes a device, which can be used for same things in networks that are not equipped with modern counting devices. The fact of unaccounted consumption can be determined using information about current's balance in network. If unaccounted consumption is confirmed, method gives a way to calculate a volume of unaccounted consumption and its place in network. Method is based in general on Ohm's law: in electrical circuit all currents cause a voltage drop on a load, and on a resistance of power wires too. There-

fore, the voltage drop that should be on a fragment of network under review can be counted using data from electricity counting devices. If calculated volt drop does not match to the actual, conclusion about unaccounted consumption on this fragment of network is made. Using information about physical parameters of power wires; calculated current's imbalance and difference between actual and estimated value of voltage drop, places of unaccounted consumption in network can be found as well as values of currents, flowing through them. The obtained error of received values are comparable to errors of counting devices used in the network. So, values obtained using this method can be considered quite reliable.

Keywords: electrical networks, losses of energy, automation, remote control, losses reduction.

Концепция универсального интеллектуального смарт-автомата

Власов А.И.

Московский Государственный Технический
Университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
vlasov@iu4.ru

Филин С.С., Кривошеин А.И.

ООО "Коннект"
Москва, Россия
info@konnekt.pro, alexeykrivoshein@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены принципы создания технологической платформы развития инновационной социальной инфраструктуры, обеспечивающей диагностику и мониторинг систем индивидуального и коллективного энергообеспечения, жизнеобеспечения зданий, состояния бытовых устройств, устройств Интернета вещей и устройств жилищно-коммунального хозяйства. В работе предложены новые схемотехнические и конструкторские решения, позволяющих оптимизировать и компактизировать существующие технологии оценки качества энергопотока на два порядка по габаритным характеристикам относительно существующих аналогов. Предложена реализация перспективной элементной базы, учитывающей комплексное влияние дестабилизирующих факторов; проектирование оптимальной топологии гибридных интегральных схем (ГИС) и микросборок; разработка моделей и алгоритмов, позволяющих проводить статистическую оценку распределений параметров аналоговых микросхем и создание на их базе автоматизированной подсистемы статистического анализа и оптимизации функциональных параметров аналоговых ГИС и микросборок; анализ влияния технологических факторов на надежность внутренних соединений при монтаже компонентов на подложки и соединений контактных площадок подложки с выходными контактами ГИС и микросборок, а также определить перечень применяемых материалов и технологий. В заключении показаны возможности повышения эффективности технологий проектирования и создания энергоэффективных зданий, обеспечение промышленности и населения новым видом информационных услуг (контроль за энергетической инфраструктурой и т.п.). Отдельные результаты получены при поддержке МОН РФ в рамках проекта по Соглашению No. 14.579.21.0158 UID RFMEFI57918X0158.

Ключевые слова: умный дом, мониторинг, управление, умные сети, интернет вещей, автоматический выключатель.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях быстрого развития жилищной инфраструктуры, стоит необходимость в создании систем, обеспечивающих контроль над объектами инфраструктуры. По информации компании J'son & Partners Consulting, занимающейся исследования телекоммуникационных, ИТ и Медиа рынков, технологии интеллектуального управления жилищем постепенно приходят на массовый рынок. Потребители находят в «Умном доме» большие преимущества, такие как усиление личной безопасности и возможность контроля над энергосбережением.

Снабжение объектов происходит по нескольким направлениям, в том числе по направлению электро-обеспечения. Поэтому одной из основных функций разрабатываемых систем должен быть контроль за электро-обеспечением. В таких условиях происходит постоянный поиск но-

вых подходов к совершенствованию отрасли энергоснабжения жилищной инфраструктуры. Это способствует развитию инновационных безопасных технологий. В поисках способов воплощения таких идей появилась концепция «интеллектуальной сети электроснабжения» (Smart Grid), составной частью которой является интеллектуальный контроль и учет энергоресурсов. «Smart Grid» - это модернизированные за счёт внедрения элементов автоматического мониторинга и управления сети электроснабжения, которые используют информационные и коммуникационные сети и технологии для сбора информации об энергопроизводстве и энергопотреблении, позволяющей повышать эффективность, надёжность, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии [1]. Технологические решения Smart Grid подразумевают в своем составе не только решения IoT в системах электросетей, но и в системах водоснабжения, приточно-вытяжной вентиляции, в совершенствовании подходов передачи данных и т.д.

КОНЦЕПЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СМАРТ-АВТОМАТА

Развитие концепции "интеллектуальной сети" электроснабжения позволит:

- вывести на принципиально новый уровень качество сбора и анализа данных об энергопотреблении потребителей;
- повысить эффективность оперативного управления энерго активами;
- поспособствовать активному вовлечению потребителей энергии в процессы регулирования собственного энергопотребления.

В последние годы к осуществлению программ и проектов в направлении Smart Grid, охватывающих широкий спектр проблем и задач, приступило подавляющее большинство индустриально развитых государств, а также многие развивающиеся страны. Наиболее масштабные программы и проекты в этом направлении разработаны и осуществляются в США, Канаде и странах Евросоюза, а также Китае, Южной Корее и Японии. Принято решение о реализации аналогичных программ и проектов в ряде других крупных государств (Индия, Бразилия, Мексика) [2,3].

Одним из элементов систем концепции Smart Grid может быть «смарт-автомат», позволяющий одновременно осуществлять функции сбора, анализа и передачи информации о параметрах сети непрерывно во времени, и функции защиты подключенного к нему электрооборудования. Так как развитие такой ветки электрооборудования началось относительно недавно, на рынке существует относительно небольшое количество аналогов, которые могут предоставить лишь часть необходимого для реализации функционала. Каждый из таких аналогов предоставляется

составным решением. Например, комбинация реле-напряжения (локальный мониторинг) и дифференциального автомата позволяет осуществлять одновременный мониторинг и защиту электрооборудования по показателям напряжения и наличию утечек. На рис. 1. Представлена компоновка такого решения.



Рис. 1. Комбинация реле-напряжения и дифференциального автомата

Однако такое решение не позволяет сохранять и передавать измеренные параметры, а значит и не позволяет реализовать удалённый мониторинг и анализ данных с целью повышения эффективности распределения электроэнергии.

Многие решения могут предоставить на анализ качество предоставляемого электричества лишь по некоторым показателям (например, напряжение, сила тока) [4]. Однако никакой статистической информации они не предоставляют, можно рассмотреть лишь фактическую характеристику на месте (т.е. только непосредственно у щитка). Также при возникновении нештатной ситуации в электроцепи происходит ее разрыв, о причине которого никакой информации не сохраняется. Основным недостатком таких решений является скудный функционал, не предоставляющий статистической информации, не позволяющий вести учет и разграничение критических моментов.

Основная функция предлагаемого смарт-автомата заключается в мониторинге и защите основных групп энергопотребления. В составе системы «Умного дома», он должен оповещать о нештатных ситуациях, которые возникают на объектах жилищной инфраструктуры (или же промышленной в малых масштабах), и предоставлять данные для выявления причин нештатных ситуаций. Это реализуемо благодаря осуществлению смарт-автоматом, помимо функций дифференциального автомата и реле напряжения, непрерывного контроля качества электросети одновременно по множеству параметров: превышение силы тока, напряжения, наличие искры, утечки, перегрева цепи и т.д.; а так же возможности передачи данных по открытому проводному интерфейсу на контроллер «Умного дома» [5-8]. Возможный вид такого автомата изображён на рис. 2.

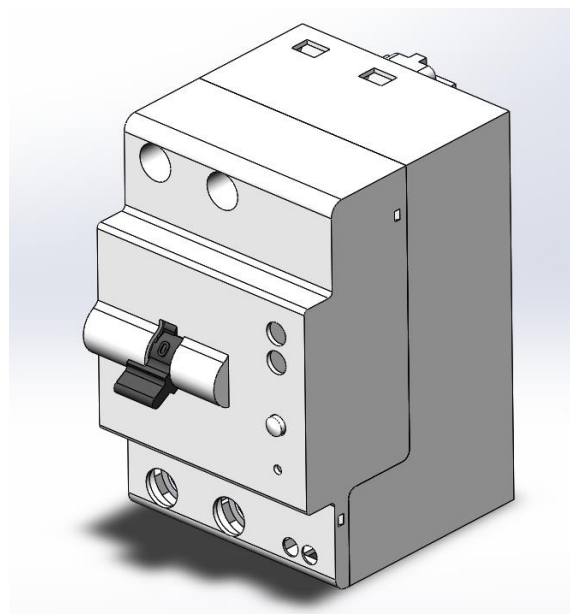


Рис. 2. Возможный вид смарт-автомата

Фактически такое устройство объединяет в себе функции дифференциального автомата, датчика тока, платы анализа параметров сети, и платы IoT-контроллера, обычно используемой для связи устройства с системой. Смарт-автомат как элемент отлично вписывается в концепцию умного дома, реализованную на базе устройств мониторинга управления, устанавливаемых в электрический щиток. Концепция такой системы изображена на рис. 3.

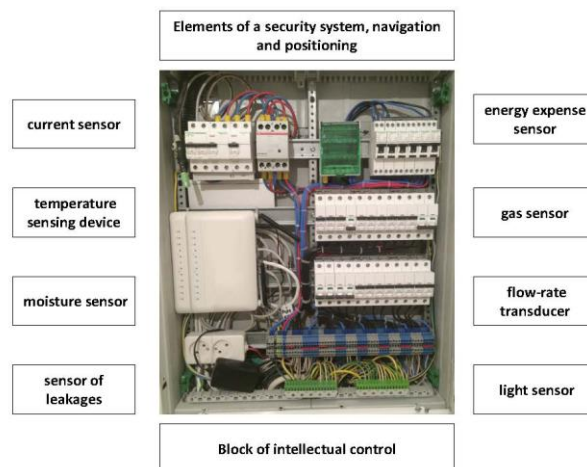


Рис. 3. Концепция системы мониторинга и управления на базе электрического щитка

ТРЕБОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СМАРТ-АВТОМАТА

При проектировании автомата учтены современные требования защиты бытовой и промышленной электроники. К функциям автомата относятся:

- тепловая защита от перегрузки;
- электромагнитная защита от сверхтоков и короткого замыкания;
- защита от утечки тока (срабатывает при возникновении разницы токов фазы и нейтрали);
- защита от возникновения дуги на линии (срабатывает при появлении дуги длительностью более 0.15 секунд);

- отключение по внешней команде пользователя (через интерфейсы RS-485 и WIFI);
- измерение потребляемого нагрузкой тока, мощности;
- измерение напряжения на линии, а так же основной частоты и частотного спектра сети;
- сохранение информации о причинах отключения автомата и отправка данных на внешние устройства (по интерфейсам RS-485, WIFI).

Внутренняя система smart-автомата (СА) по принципу работы условно делится на два функциональных блока: электромеханический блок (ЭМБ), включающий механизмы электромагнитной и тепловой защиты, а так же трансформаторы, выполняющие функции датчиков тока; и электрический блок, включающий плату анализа (ПА) и установленной на ней ИМС [9].

Электрический блок должен выполнять те функции СА, которые невозможно реализовать или нецелесообразно реализовывать в виде электромеханической автоматики. В ЭМБ разумно реализовать функции тепловой защиты от перенагрузки, электромагнитной защиты от короткого замыкания, функцию защиты от утечки тока, систему размыкания цепи по электрическому сигналу, и датчик тока для измерения тока фазы. Блок электроники должен выполнять функции обработки данных с датчика тока фазы и трансформатора измерения дифференциального тока, измерения напряжения на входе и выходе СА, определения параметров сети (таких, как энергопотребление, частота, уровень искажений синусоиды), отключения автомата при перенапряжении или возникновении дуги на линии, отправки данных на внешнее устройство и управления индикацией.

Учитывая, что функции обработки данных и принятия решений в блоке электроники реализуются ИМС, функции ПА сводятся к обеспечению функционирования ИМС, преобразованию сигналов с ЭМБ к допустимым для ИМС уровням, а так же преобразованию управляющего сигнала ИМС на отключение автомата к рабочему уровню отключающего механизма ЭМБ. Помимо этого на ПА должны быть установлены элементы индикации состояния автомата, и кнопки для ручного управления СА.

Перечень необходимых функций ПА:

- 1) преобразование переменного аналогового сигнала с входа СА (пиковое напряжение 400В) в пропорциональный аналоговый сигнал в диапазоне $0-U_{ADC}$ (со смещением $0.5U_{ADC}$), где U_{ADC} – максимальное напряжение АЦП ИМС;
- 2) преобразование переменного аналогового сигнала с выхода СА (пиковое напряжение 400В) в аналоговый сигнал в диапазоне $0-U_{ADC}$ (со смещением $0.5U_{ADC}$);
- 3) преобразование переменного аналогового сигнала с датчика тока фазы (пиковое напряжение 7В) в аналоговый сигнал в диапазоне $0-U_{ADC}$ (со смещением $0.5U_{ADC}$);
- 4) преобразование переменного аналогового сигнала с датчика дифференциального тока (пиковое напряжение 7В) в аналоговый сигнал в диапазоне $0-U_{ADC}$ (со смещением $0.5U_{ADC}$);
- 5) усиление управляющего сигнала ИМС до мощности, достаточной для срабатывания электромагнитного толкателя и отключения СА;
- 6) наличие индикации, позволяющей отображать состояние автомата и причину отключения;
- 7) наличие кнопки ручного управления режимом работы СА, и кнопки перезагрузки электрического блока СА;

- 8) наличие преобразователя интерфейса вывода данных ИМС в интерфейс RS-485.

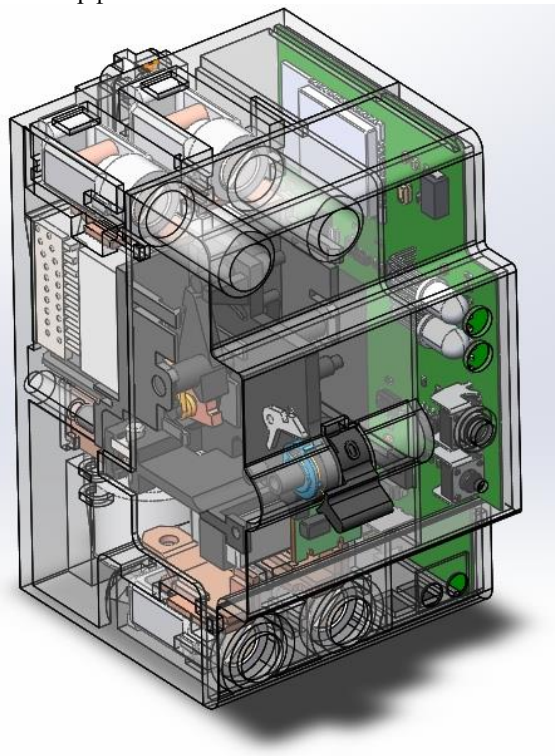


Рис. 4. Вариант расположения систем smart-автомата

Определение наличия дуги на линии осуществляется через анализ спектра сети, а так же анализа формы синусоиды переменного тока. При возникновении дуги пробой происходит при определённой фазе синусоиды напряжения сети, далее нагрузка резко возрастает и синусоида искажается. Это вызывает появление высокочастотных гармоник, которые можно детектировать, непрерывно анализируя спектр сети. При этом возникает другая проблема, связанная с отсутствием разницы между искажениями сигнала, вызванными появлением дуги на линии до автомата, и после него. Решением такой проблемы является введение в схему автомата фильтрующего элемента, изменяющего амплитуду высоких гармоник [10-12]. По разнице сигнала до и после такого элемента можно будет определить, с какой стороны схемы находится источник высоких гармоник. Если дуга возникла со стороны источника напряжения, то уровень высоких гармоник со стороны нагрузки будет ниже. В случае же возникновения дуги со стороны нагрузки, уровень гармоник будет ниже со стороны источника напряжения.

В самом простом случае таким элементом может быть катушка индуктивности. Измерение амплитуды высоких гармоник до и после индуктивности, учитывая непредсказуемость их состава, производится через измерение амплитуды сигнала, пропущенного через фильтр ВЧ и однополупериодный выпрямитель.

РАСЧЁТ ИНДУКТИВНОСТИ ВХОДНОЙ КАТУШКИ

Рассчитаем значение индуктивности катушки, необходимое для возможности определения разницы амплитуд ВЧ сигнала до и после фильтрующего элемента. Так как фактически измеряется разница напряжений на выходах

выпрямителей, сначала необходимо определить минимальный шаг АЦП микроконтроллера. Разрядность АЦП микроконтроллера 12 бит, диапазон измеряемого напряжения 0-1В. Рассчитаем минимальный шаг по формуле (1):

$$U_{STP} = \frac{U_{ADC}}{2^N} = \frac{1 \text{ В}}{2^{12}} = 0.244 \text{ мВ} \quad (1)$$

где U_{STP} - минимальный шаг измерения АЦП, U_{ADC} – верхняя граница диапазона измерения АЦП, N - разрядность АЦП. Уровень шума на выходе выпрямителя, определённый эмпирическим путём, не превышает 0.1мВ, уровень погрешности АЦП 0.5 минимального шага. Т.е. полезный шаг АЦП равен примерно 0.5мВ, или 0.05% от диапазона измеряемого микроконтроллером напряжения.

Дуга может возникнуть как при наличии нагрузки, так и при её отсутствии[13-16]. В этом случае дуга сама будет являться нагрузкой, значение которой будет зависеть от расстояния между проводниками, на котором возникла дуга. Падение амплитуды ВЧ сигнала на катушке будет зависеть от значения полного сопротивления катушки и нагрузки, т.е. от уровня нагрузки и значения индуктивности[9,11]. Чем больше полное сопротивление нагрузки, тем меньше падение ВЧ на катушке, а значит и разница уровня сигнала. Поэтому рассчитаем необходимое значение индуктивности при минимально возможной нагрузке.

Возникновение дуги, согласно источнику[17], возможно при напряжении не ниже 10В и току не менее 0.1А. Исходя из этих параметров, рассчитаем необходимое активное сопротивление фильтрующего элемента (2-4):

$$\frac{X_{induct}}{X_{induct} + X_r} = 0.05\% \quad (2)$$

$$X_{induct} = \frac{0.0005X_r}{0.9995} \quad (3)$$

$$X_{induct} = 0.0005 \times X_r \quad (4)$$

При минимальном токе 0,1А и напряжении 250В полное сопротивление дуги равно (формула 5):

$$X_r = \frac{U_{MAX}}{I_{MIN}} = 2500 \text{ Ом} \quad (5)$$

Тогда

$$X_{induct} = 1,25 \text{ Ом}$$

Чем выше средняя частота спектра дуги, тем больше активное сопротивление индуктивности и больше разница напряжений после выпрямления. Примем минимальную среднюю частоту гармоник $f = 1\text{КГц}$. Активное сопротивление индуктивности X_{induct} определяется по формуле 6:

$$X_{induct} = 2\pi fL \quad (6)$$

Тогда индуктивность вычисляем по формуле 7:

$$L = \frac{X_i}{2\pi \times f} \approx 200\text{мкГн} \quad (7)$$

Таким образом, чтобы определить положение источника дуги, необходимо включить в схему автомата катушку индуктивностью минимум $L = 200\text{мкГн}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Разрабатываемый смарт-автомат можно использовать повсеместно, как на объектах частных домохозяйств, так и в малых государственных и коммерческих промышленных

предприятиях. Смарт-автомат позволит облегчить учет данных по потреблению электроэнергии, качеству электрообеспечения, уменьшить количество нештатных ситуаций, за счёт упрощения их диагностики. На рисунке 5 представлен график динамики количества подключенных IoT-устройств и прогноз до 2021 года компании TAdviser.



Рис. 5. График зависимости устройств IoT

Данный прогноз показывает, что переход систем электро-обеспечения на концепцию IoT является необходимостью в условиях стремительного развития информационных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

- Amruthnath, N. & Gupta, T. 2018. A research study on unsupervised machine learning algorithms for early fault detection in predictive maintenance, In: 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications, IEEE, 355-361, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.28822.24648>.
- Andreev K.A. Vlasov A.I. & Shakhnov V.A. Silicon pressure transmitters with overload protection, Automation and Remote Control. – 2016. – 77(7). – P. 1281-1285.
- Baptista M. Sankararaman S. de Medeiros, I.P. Nascimento C., Prendinger H., & Henriques E.M.P. Forecasting fault events for predictive maintenance using data-driven techniques and ARMA modeling, Computers & Industrial Engineering. 2018. – 115. – P. 41-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.033>.
- Mobley R.K. An introduction to predictive maintenance, Elsevier Science. 2002.
- Vlasov A.I.; Yudin, A.V.; Salmina, M.A.; Shakhnov, V.A.; & Usov, K.A. 2017a. Design methods of teaching the development of internet of things components with considering predictive maintenance on the basis of mechatronic devices, International Journal of Applied Engineering Research 12(20): 9390-9396.
- Whitaker, D.A.; Egan, D.; O'Brien, E.; & Kinnear, D. 2018. Application of multivariate data analysis to machine power measurements as a means of tool life predictive maintenance for reducing product waste, from <https://arxiv.org/abs/1802.08338>, accessed March 16, 2018.
- Vlasov A.I., Berdyugina O.N., Krivoshein A.I. Technological Platform for Innovative Social Infrastructure Development on Basis of Smart Machines and Principles of Internet of Things 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC) – 2018. – P. 1–7
- G. Prause and S. Atari, “On sustainable production networks for Industry 4.0,” Entrepreneurship and Sustainability Issues, – 2017 – vol. 4, no. 4. – P. 421-431. [https://doi.org/10.9770/jesi.2017.4.4\(2\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2017.4.4(2))

9. Ragulina Y.V. Perspectives of solving the problems of regional development with the help of new Internet technologies / Y.V. Ragulina, E.I. Semenova, I.A. Zueva, E.V. Kletskova, and E.N. Belkina // Entrepreneurship and Sustainability Issues. – 2018. – vol. 5, no. 4. – P. 890-898, [https://doi.org/10.9770/jesi.2018.5.4\(13\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2018.5.4(13))

10. Akberdina V.V. A methodological approach to forecasting spatial distribution of workplaces in an industrial metropolis / V.V. Akberdina, O.V. Tretyakova, and A.I. Vlasov // Problems and Perspectives in Management. – 2017. – vol. 15, no.4 (87). – P. 50-61.

11. Rudenko L.G. Analysis of the state of housing and utilities infrastructure of Russia under current conditions. // Bulletin of Vitte Moscow University. Series 1: Economy and Management. – 2015. – no. 2. –P. 67-78.

12. Kolarzh V.V. Analysis of housing and utilities branch as a perspective field of entrepreneurship // Scientific Journal of SRU ITMO. Series “Economy and Economical management. – 2017. –no. 1. – P. 10-14.

13. Berdyugina O.N. Investment capacity of the economy during the implementation of projects of public-private partnership / O.N. Berdyugina, A.I. Vlasov, and E.A. Kuzmin // Investment Management and Financial Innovations. – 2017. –vol. 14, no. 3. – P. 189-198.

14. Fund “Center of Strategic Developments “North-West,” ““Intelligent” Environments, “Intelligent” Systems, “Intelligent” Productions: Series of Reports (Green Books) within the Framework of the Project “Industrial and Technological Foresight of the Russian Federation”, iss. 4. Saint Petersburg, 2012.

15. Vlasov A.I. Design methods of teaching the development of internet of things components with considering predictive maintenance on the basis of mechatronic devices / A.I. Vlasov, A.V. Yudin, V.A. Shakhnov, K.A. Usov and M.A. Salmina // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. –vol. 12, no. 20. – P. 9390-9396.

16. Mobley R.K. An Introduction To Predictive Maintenance. Elsevier Science, 2002.

17. Zaid R. Machinery Predictive Analytics. SPE 128559, 2010.

Universal Smart Circuit Breaker Concept

Vlasov A.I.

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia
vlasov@iu4.ru

Filin S.S., Krivoshein A.I.

LLC «Konnekt»
Moscow, Russia
info@konnekt.pro, alexeykrivoshein@mail.ru

Abstract. The paper dwells upon the principles of creating a technological platform for developing innovative social infrastructure to diagnose and monitor individual and collective power supply systems, building life support, home appliance conditions, Internet of Things devices, and public utilities. The paper proposes novel circuitries and design solutions to optimize and reduce the sizing of the existing energy flux quality monitoring tech by two orders of magnitude. It also proposes: an element-base implementation that considers the complex effects of destabilizing factors; an optimal-topology design of hybrid integrated circuits (HIS) and micro-assemblies; models and algorithms for the statistical estimation of analog-circuit parameter distributions to create an automated subsystem for statistical analysis and optimization of the functional parameters of analog HIS and micro-assemblies; an

analysis of how process factors affect the reliability of internal connections when assembling components on substrates and connecting the substrate contact pads to the HIS and micro-assembly outputs; as well as a bill of materials and technologies. The conclusion formulates the opportunities to improve the design technology and to design energy-efficient buildings, as well as to provide novel information services (such as power-infrastructure monitoring, etc.) to industries and people alike. Some of the results have been obtained within research funded by the Russian Ministry of Education and Science under the Project Agreement No. 14.579.21.0158 UID RFMEFI57918X0158.

Keywords: smart home, monitoring, control, smart grids, Internet of Things, automated circuit breaker.

Методологические основы оценки эффективности вовлечения возобновляемой энергии в региональный энергобаланс

Симанков В.С.
ФГБОУ ВО «КубГТУ»
Краснодар, Россия
vs@simankov.ru

Бучацкий П.Ю.
ФГБОУ ВО «АГУ»
Майкоп, Россия
butch_p99@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются методологические основы оценки эффективности вовлечения возобновляемой энергии в региональный энергобаланс. Представлены полная система критериев эффективности энергосистем с ВИЭ и комплекс математических моделей основных видов возобновляемой энергии.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, критерии эффективности, математические модели.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время развитие энергетики возобновляемых источников энергии (ВИЭ) происходит с постоянным возрастанием установленной мощности и доли в топливно-энергетическом балансе.

Россия обладает огромными ресурсами ветровой, солнечной, геотермальной энергии, энергии биомассы, гидроэнергетическими ресурсами, однако, возобновляемые источники энергии (исключение составляют крупные ГЭС) используются в стране крайне мало. Серьезное отставание в нашей стране имеется по объемам ввода и по технологиям преобразования различных видов возобновляемой энергии.

Издание International Business Times сообщает о том, что эксперты Лаппеенрантского технологического университета (Финляндия) спроектировали для России и стран Центральной Азии модель энергетической системы, работающей за счет возобновляемых источников энергии.

Исследователи финского университета предполагают, что такая система сможет работать за счет солнечной и геотермальной энергии, ветра (60% всей энергии), воды и биомассы. Общая энергетическая мощность системы - 550 гигаватт, что, согласно модели, на 162 гигаватта выше способности текущей энергосистемы [1].

По мнению экспертов, переход на 100% используемой энергии из возобновляемых источников к 2030 году - цель более чем достижимая. Кроме того, система менее затратна, чем аналоги, основанные на ядерной энергетике или технологиях улавливания и захоронения углекислого газа, - ее внедрение позволит сократить затраты на 20% [1, 10].

Возобновляемая энергия может оказаться существенным компонентом энергосистемы региона, особенно в той местности, где имеется большой ее потенциал. Необходимо разработать методический подход к оценке вовлечения возобновляемой энергии в энергобаланс региона.

Задача эффективного использования возобновляемых источников энергии в энергобалансе региона должна быть решена при всестороннем рассмотрении изучаемой системы с учетом ее внешних или внутренних взаимосвязей. Следовательно, в процессе решения необходимо применять методы системного анализа.

Энергетика, как система, включает в себя весь топливно-энергетический комплекс. В широком смысле для энергоресурсов и энергоносителей всех видов она предусматривает их получение, переработку, преобразование, транспортирование, использование [5].

Одним из этапов системного исследования в энергетике является иерархическое представление энергетических систем. Поэтому наиболее эффективным способом структуризации целей, преследуемых при включении ВИЭ в энергетические системы, является построение иерархии целей [5, 8, 9]. Она начинается с самых общих главных целей, находящихся на высших уровнях, и заканчивается более узкими на низших.

Иерархия целей для оценки эффективности возможных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс строится на основе полной иерархии целей системы энергоснабжения с ВИЭ [8]. Она позволяет приспосабливать требования общих целей к конкретным проблемам. Это обеспечивает необходимую основу для установления критериев эффективности. С другой стороны, в ходе отбора может выясниться, что некоторые из целей не являются необходимыми, поскольку возможные варианты равнозначны по этим целям.

В соответствии с основными принципами системного подхода [5], системы энергоснабжения, как подсистемы общей энергетической системы, должны строиться на основе учёта всех существенных критериальных свойств. Каждое свойство характеризуется одним или несколькими критериями эффективности. Учитывая, что основным условием сопоставления вариантов является удовлетворение каждым из них спроса потребителей на энергию, на целый ряд критериев должны быть наложены ограничения, т.е. оптимизация проводится в ограниченной области.

Авторами была разработана полная система набора критериев для оценки эффективности систем в альтернативной энергетике с соблюдением одного из основных требований системного анализа – полноты и всесторонности рассмотрения объекта исследования (рис.1), которая дает возможность оценить эффективность как отдельных энергетических комплексов с ВИЭ, так и энергетических систем с использованием ВИЭ [6, 9].

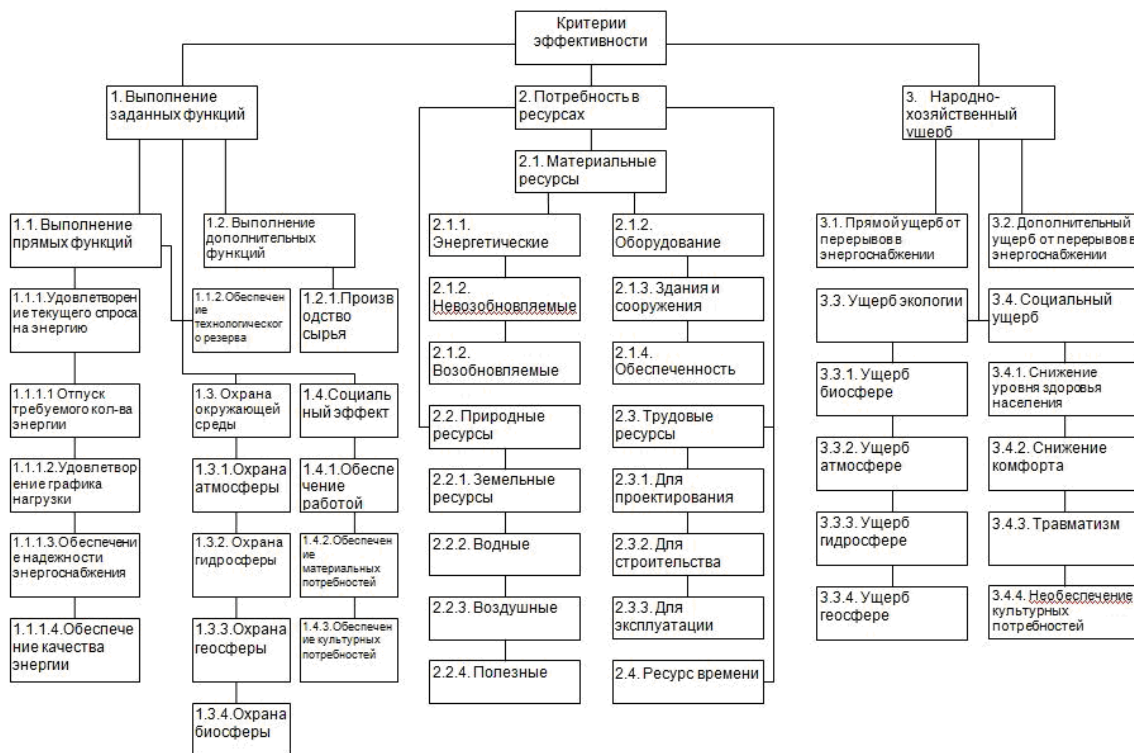


Рис. 1. Полная система критериев эффективности энергосистем с ВИЭ

Моделирование системы поступления возобновляемой энергии для оценки ее потенциала в заданном районе представляет собой синтез математических моделей, описывающих процессы поступления энергии от различных источников, и параметров технологии ее преобразования [2, 5].

Естественные потоки возобновляемой энергии, как непрерывные физические процессы, могут быть представлены в виде универсальных аналитических моделей с переменными параметрами, зависящими от специфики природных и техногенных условий исследуемой местности. Поступление возобновляемой энергии должно быть описано

моделями случайных непрерывных процессов. Наиболее полно их природа может описываться как нестационарный случайный процесс, т.е. предполагается возможность их развития во времени.

На рисунке 2 представлен комплекс математических моделей основных ВИЭ, которые представляются наиболее подходящими для перспективной оценки потенциала ВИЭ при исследовании возможностей их эффективного вовлечения в энергобаланс. [5].

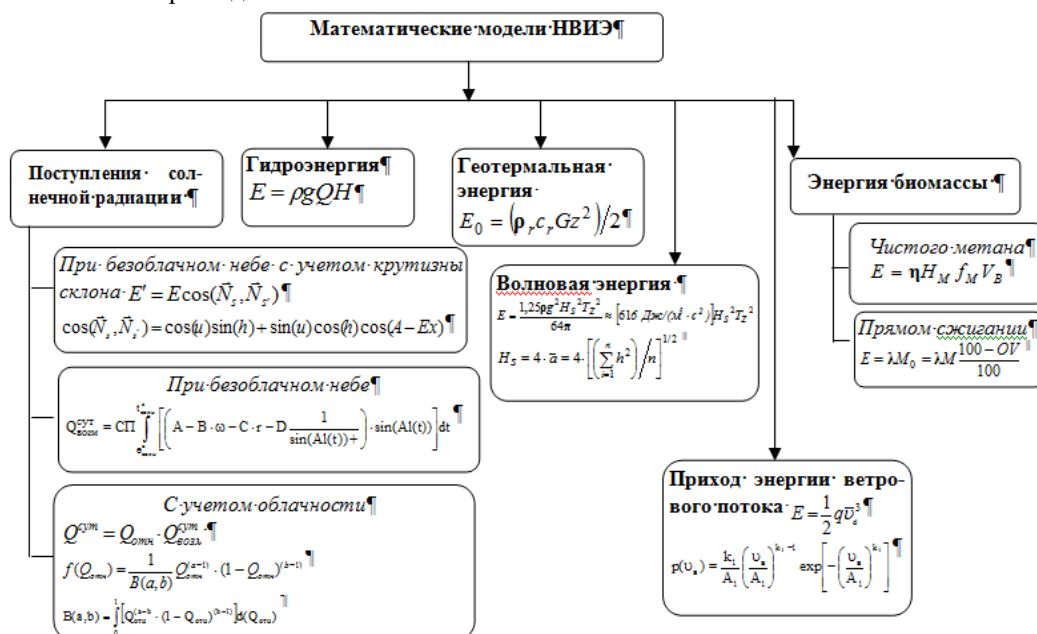


Рис. 2. Комплекс математических моделей основных ВИЭ

Оценка параметров моделей для характерных по снабжению каждым видом ВИЭ районов может производиться на основе существующих для большинства территорий стандартных климатических, метеорологических и других статистических данных и, таким образом, в большинстве случаев не требует проведения специальных натурных измерений, связанных со значительными трудностями и материальными затратами [5].

Проведенная верификация указанных моделей на примере региональных данных многолетних наблюдений показала их достаточную точность и адекватность для решения задач и достижения цели исследования.

Неотъемлемым структурным элементом общей схемы вовлечения ВИЭ в энергобаланс региона являются технологии преобразования ВИЭ. В связи с этим на основе анализа большого числа источников информации установлены современные наиболее перспективные технологии преобразования основных видов возобновляемой энергии (солнечной, ветра, биомасс, приливов и волн) (табл. 1). [3, 8]

Таблица 1

Перспективные технологии преобразования возобновляемой энергии

| Вид возобновляемой энергии | Недостатки вида ВИЭ и технологии его преобразования | Перспективные технологии преобразования |
|------------------------------|--|--|
| Солнечная | Непостоянность и непредсказуемость основного источника энергии, зависимость от погодных и климатических условий, необходимость в накопителях энергии или дополнительных источниках энергии, высокая стоимость фотоэлектрических систем (ФЭС) с учетом необходимости в накопителях и обратных преобразователях переменного тока, сравнительно низкий КПД, низкая энергоемкость, вследствие чего под ФЭС требуются большие территории. | <ul style="list-style-type: none"> Усовершенствованные неорганические тонкопленочные фотоэлектрические модули (ФЭМ) - Сферические ФЭМ на основе селенида меди-индия (CIS) и тонкопленочные поликристаллические кремниевые ФЭМ; органические ФЭМ (в том числе фотосенсибилизированные красителем ФЭМ на основе органических полимеров); термо-фотоэлектрические (TPV) ячейки с узкой запрещенной зоной (low gap-band). |
| Ветровая | Непостоянность ветра, как источника энергии, нарушение эстетического пейзажа, сложности с подключением к существующим сетям (ввиду отдаленности наиболее благоприятных территорий), стоимость ветряной турбины | <ul style="list-style-type: none"> Увеличение генерирующего потенциала (увеличение размеров турбин, высоты турбинных башен, использование оффшорных ветров и ветров на больших высотах); улучшение материалов (снижение зависимости башенных конструкций от стальных элементов, снижение веса пропеллеров (использование углеродных волокон и высокоинтенсивного углеродного пластика)); улучшение системы привода (редуктор, генератор, электроника) (развитие технологии сверхпроводников для более легких и эффективных электрогенераторов использование постоянных электромагнитов в электрогенераторах); использование новых видов ветряные турбин: летающих и турбин с вертикальной осью; генерация на ветрах низких скоростей. |
| Биоэнергия | Необходимость земельных и водных ресурсов для выращивания (конкурирует с производством пищевых продуктов); вредные выбросы при сжигании (NOx, сажа, зола, CO, CO2); сезонный характер роста некоторых культур; проблемы масштабирования генерирующих мощностей. | <ul style="list-style-type: none"> Совместное сжигание смесей биомассы с традиционными видами топлива; использование новых видов топлива из биомасс, включая различные бытовые и промышленные отходы; переоборудование существующих генерирующих мощностей на углеводородном топливе под использование биомасс; повышение теплоотдачи пеллет биомассы за счет сушки; интегрированная газификация биомасс с топливными ячейками. |
| Приливная и волновая энергия | Высокие капитальные затраты на строительство; географическая привязка к береговой линии и удаленность от существующих электрических сетей; негативное влияние на окружающую среду; зависимость от природных явлений; дороговизна и сложность техобслуживания; быстрый износ генерирующего оборудования под воздействием воды. | <ul style="list-style-type: none"> Использование мостов в качестве приливных электростанций; колеблющееся подводное крыло (применяет вместо вращающихся элементов плавники (крылья), которые приводятся в движение течением); системы с использованием трубки Вентури; магнетогидродинамические системы (MHD) (используют криогенно охлажденную сверхпроводящую электромагнитную катушку, размещенную на морском дне, где проходящие приливные волны); использование волновых аттенуаторов - преобразователей волновой энергии в виде змеевидных устройств, наполовину погруженных в воду; волновые генераторы на принципе обратного маятника, генераторы с жидким/газообразным рабочим телом. |
| Геотермальная энергия | Высокая капитал- и энергоемкость, обусловленная необходимостью бурения дорогостоящих нагнетательных скважин, большие энергозатраты на закачку воды. | <ul style="list-style-type: none"> использование технологии геотермальных циркуляционных систем (ГЦС) позволяет интенсифицировать процесс добычи, повысить степень извлечения из недр тепловых ресурсов, решить проблему экологически безопасного отработанных теплоносителей. |

Основные исследования в области развития ВИЭ направлены на снижение себестоимости преобразователей за счет повышения их КПД, снижения потребления материалов, повышения энергоемкости, использования органических материалов взамен дефицитного сырья.

Рассмотренные модели в сочетании с характеристиками технологий преобразования могут быть использованы как основа методики оценки эффективности размещения объектов возобновляемой энергетики в исследуемом регионе.

Объем вовлекаемой энергии зависит от мощностей имеющихся энергетических установок по производству электроэнергии с использованием определенного вида технологии преобразования энергии, полученной от возобновляемых источников, а также коэффициентов эффективности использования указанных мощностей. В качестве ограничений определено расхождение между стоимостью энергии, получаемой от ВИЭ по всем имеющимся в рассматриваемом регионе технологиям преобразования, и стоимостью энергии от традиционных источников. Также возможно включить в рассмотрение ограничение на допустимую площадь отчуждаемых земель при использовании определенной технологии преобразования энергии, последствия от воздействия на окружающую среду, ограничения возможных вариантов вовлечения по критерию затрат на создание объектов ВИЭ и т.д.

Для определения множества допустимых решений поставленной задачи предлагается алгоритм, подробно рассмотренный в работах [5, 8], результатом работы которого является ранжирование вариантов вовлечения ВИЭ по их ожидаемой полезности.

Для реализации разработанной методики был создан программный комплекс «СИБУРЭН ККА 1.0» [4, 7], который позволяет производить оценку возможных вариантов вовлечения ВИЭ в энергобаланс региона.

Программа выполняет следующие основные функции:

- взаимодействие с распределенными базами данных;
- построение выборки данных для решения поставленной задачи на определенной территории;
- построение модели источников и потенциала ВИЭ;
- решение оптимизационной задачи;
- оценка предпочтения вариантов решения оптимизационной задачи;
- интерпретация результатов;
- адаптация модели к изменениям предметной области;
- взаимодействие системы с Windows-приложениями.

В качестве примера рассмотрено применение разработанной методики и программного комплекса для оценки использования возобновляемых источников энергии в энергосистемах Краснодарского края и Республики Адыгея. В результате работы программы получена таблица распределения возможных объемов вовлечения различных видов ВИЭ по районам Краснодарского края и Республики Адыгея.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Предложенный методический подход может быть использован в качестве основы для разработки глобальной модели вовлечения ВИЭ в энергобаланс различных по величине территорий, перейти на 100% используемой энергии из возобновляемых источников к 2030 году.

1. Богданов Д. Энергосистема евразийского региона на базе возобновляемых источников энергии: оптимальная структура генерирующих и аккумулирующих мощностей / Д. Богданов, К. Брейер // *Материалы конференции «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики»* – Санкт-Петербург, 2015.

2. Бучацкий П.Ю. Математическое моделирование НВИЭ как объекта системного исследования // *Материалы Всероссийской научной конференции по проблемам управления в технических системах.* – Санкт-Петербург: Изд. ЛЭТИ, 2015. – № 1. – С. 60-62.

3. Бучацкий П.Ю. Перспективные технологии преобразования возобновляемой энергии // *Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки.* – Майкоп, 2012. – Вып. 4. – С. 210-216.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013660038 Программный комплекс оценки эффективности вариантов вовлечения нетрадиционных возобновляемых источников энергии в энергобаланс региона («СИБУРЭН-ККА 1.0») / П.Ю. Бучацкий, В.В. Бучацкая, В.С. Симанков, А.В.Шопин.

5. Симанков В.С. Автоматизация системных исследований: монография / В.С. Симанков; Техн. ун-т КубГТУ. – Краснодар, 2002. – 376 с.

6. Симанков В.С. Оценка эффективности вовлечения нетрадиционных возобновляемых источников энергии в энергобаланс региона / В.С. Симанков, П.Ю. Бучацкий // *Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки.* – Майкоп, 2012. – Вып. 2. – С. 123-132.

7. Симанков В.С. Программный модуль определения возможных объемов вовлечения возобновляемой энергии в региональный энергобаланс / В.С. Симанков, П.Ю. Бучацкий // *Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки.* – Майкоп, 2013. – Вып. 1. – С. 105-110.

8. Симанков В.С. Системный анализ при решении структурных задач альтернативной энергетики: монография / В.С. Симанков, Т.Т. Зангиев; Ин-т совр. технол. и экон. – Краснодар, 2001. – 151 с.

9. Симанков В.С. Формирование дерева целей и системы критериев эффективности в альтернативной энергетике на основе системного подхода / В.С. Симанков, П.Ю. Бучацкий // *Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки.* – Майкоп, 2007. – Вып. 4. – С. 39-48.

10. Breyer C. North-East Asian Super Grid: Renewable energy mix and economics [Electronic resource] / C. Breyer, D. Bogdanov, K. Komoto, T. Ehara, J. Song N. Enebish // *Japanese Journal of Applied Physics* 54, 08KJ01 (2015) – Access mode: <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.08KJ01>

Methodological Basis for Assessing the Effectiveness of the Involvement of Renewable Energy in the Regional Energy Balance

Simankov V.S.
Kuban State Technological University
Krasnodar, Russia
vs@simankov.ru

Buchatskiy P.Yu.
Adyghe State University
Maykop, Russia
butch_p99@mail.ru

Abstract. The article discusses the methodological basis for assessing the effectiveness of the involvement of renewable energy in the regional energy balance. A complete system of criteria for the efficiency of energy systems with renewable energy sources and a set of mathematical models of the main types of renewable energy are presented.

Keywords: renewable energy, performance criterion, mathematical models.

Оценка ветровых и солнечных ресурсов Кыргызстана

Максатов Б.М., Дерюгина Г.В., Пугачев Р.В.

НИУ «МЭИ»

Москва, Россия

baatai.maksat@gmail.com

Аннотация. Приведены уточненные результаты ветрового потенциала всей территории Кыргызстана на высоте 10 м. Разработана эмпирическая формула для пересчета скорости ветра на высоту до 100 м и рассчитаны основные энергетические характеристики ветра и ветровой потенциал на высоте 100 м. Выявлены перспективные регионы для строительства крупных сетевых ветроэлектрических станций в Кыргызстане – северо-восточная часть страны, для которой проведена оценка валового потенциала солнечных ресурсов.

Ключевые слова: коэффициент Хеллмана, скорость ветра, ветроэлектростанция, вертикальный профиль ветра, валовой потенциал, солнечная радиация, солнечная фотоэлектрическая установка.

ВВЕДЕНИЕ

Территория Кыргызстана состоит 90% из горной местности, что создает трудности в строительстве линий электропередач (ЛЭП) и подключение потребителей к единой энергосистеме страны. Страна богата водными ресурсами и занимает по их запасам третье место в Центральной Азии [1]. Однако, несмотря на имеющийся огромный потенциал гидроэнергетических ресурсов, страна из-за экономических и политических соображений не может строить крупные гидроэлектростанции. С каждым годом потребление электроэнергии в стране растет, соответственно растет и дефицит электроэнергии. Также стоит упомянуть большие технические потери на ЛЭП, которые по данным источника [2] составляют около 17%. Один из вариантов снижения дефицита электроэнергии в стране – строительство крупных сетевых электростанций на базе энергии солнца и ветра.

Выбор перспективных площадок под строительство солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС) и ветроэлектрических станций (ВЭС) начинается с оценки ветровых и солнечных ресурсов. Сделанные ранее оценки ветровых и солнечных ресурсов для всей территории Кыргызстана отражены в [3]. Однако, ни в одной из работ не проводились расчеты по оценке ветрового потенциала Кыргызстана для высоты 100 м, что актуально при выборе площадок сетевых ВЭС.

РАСЧЕТ ВЕТРОВЫХ РЕСУРСОВ КЫРГЫЗСТАНА

Для получения достоверных результатов по оценке ветровых ресурсов важен выбор информационного источника, в качестве которого в данной работе был выбран сайт «Расписание Погоды» [4], на нем представлены фактические данные наблюдений за скоростью и направлениями ветра за многолетний период (с 1995 г. по н.в.) на площадках 20-и наземных метеостанций (МС) Кыргызстана (рис. 1). По методике, представленной в [5,6], были рассчитаны для площадок 20-и МС следующие основные многолетние характеристики ветра на высоте 10 м: среднеегодовое

значение скорости ветра V_0 , удельная валовая мощность $N_{уд}$, коэффициент вариации C_V . По территории Кыргызстана многолетние энергетические характеристики ветра меняются в широком диапазоне: V_0 от 0,1 м/с (МС Суусамыр) до 3,9 м/с (МС Иссык-Куль); $N_{уд}$: 16–538 Вт/м²; C_V : 0,6–26,6. На основе результатов расчета были построены карты с распределением среднеегодовой скорости ветра на 10 м с использованием программы Surfer 8 (рис. 2).



Рис. 1. Карта расположения метеостанций по территории Кыргызстана

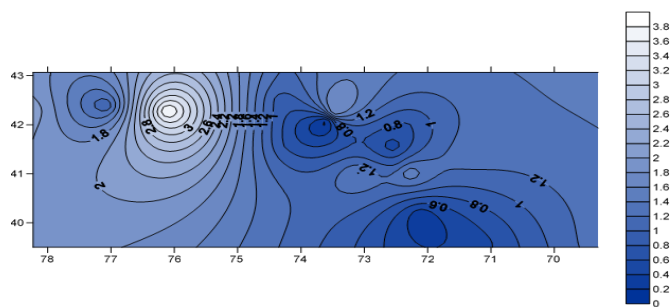


Рис. 2. Карта распределения среднеегодовой скорости ветра на высоте 10 м по территории Кыргызстана

Все ветроэнергетические расчеты должны соответствовать высоте установки ветроколеса (ВК) ветроэлектрической установки (ВЭУ), которая для подавляющего большинства ВЭУ, работающих в объединенных энергосистемах, имеет высоту башни от 80 м и выше. С учетом вышесказанного, необходимо при выборе ВЭУ располагать методом пересчета скорости ветра с высоты 10 м на произвольную высоту от 80 м и выше, на которой надежная информация по ветровым ресурсам может быть получена при помощи измерений на ветроизмерительных комплексах (ВИК), местоположение которых выбирается на ранних стадиях проектирования ветроэлектрических станций (ВЭС). При отсутствии данных измерений ВИК обычно скорости ветра пересчитывают (моделируют) на высоту по

степенной или логарифмической формуле [5,6]. В данной работе пересчет (моделирование) среднемноголетней скорости ветра на высоту h (100 м) на площадках МС Кыргызстана проводился по степенной формуле:

$$V_0^h = V_0^{10} \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{m_0}, \quad (1)$$

где h – высота от поверхности земли; V_0^h, V_0^{10} – среднемноголетние скорости ветра на площадках МС на высоте h (10 м и 100 м); m_0 – среднемноголетний показатель степени (в зарубежных источниках коэффициент Хеллмана).

По методике кафедры ГВИЭ НИУ «МЭИ» [5,6] была выявлена для физико-географических условий Кыргызстана (географическое положение, рельеф местности, наличие и тип водных поверхностей и т.д.) эмпирическая зависимость (модель) среднемноголетнего показателя степени m_0 от среднемноголетней скорости ветра на высоте 10 м V_0^{10} :

$$m_0(V_0^{10}) = 0,27V_0^{-0,084}. \quad (2)$$

Для разработки зависимости (2) были использованы среднемноголетние среднемесячные скорости ветра на двух высотах измерений (10 м и 100 м) на площадках 2-х аэрологических метеостанций (АМС) Кыргызстана и 1-ой Казахстана из специализированной базы данных (СБД) «Вертикальный профиль ветра» [7], информация по которым представлена в таблице 1.

Таблица 1
Основные сведения по АМС

| Название АМС | Ψ , в.д. | ϕ , с.ш. | h, м | V_0^{10} , м/с | V_0^{100} , м/с | m_0 |
|--------------|---------------|---------------|------|------------------|-------------------|-------|
| Бишкек | 74,6 | 42,8 | 828 | 2,08 | 3,67 | 0,25 |
| Алматы | 76,9 | 43,2 | 851 | 1,31 | 2,48 | 0,28 |
| Джалал-Абад | 72,9 | 40,9 | 765 | 2,29 | 3,78 | 0,22 |

Значения m_0 , представленные в таблице 1, получены по формуле (1) по среднемноголетним значениям скорости ветра на высотах 10 м и 100 м на площадках 3-х АМС из СБД «Вертикальный профиль ветра».

Верификация разработанной формулы (2) производилась в соответствии с критерием:

$$\delta_v \leq \delta_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где δ_v – относительное отклонение сравниваемых среднемноголетних значений скорости на высоте 100 м, определяемое по формуле:

$$\delta_v = \frac{V_3^{100} - V_0^{100}}{V_0^{100}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где V_3^{100} – среднемноголетняя скорость ветра, рассчитанная по формуле (2); V_0^{100} – среднемноголетняя скорость ветра за по данным СБД «Вертикальный профиль ветра»; $\delta_{\text{доп}}$ – допустимая погрешность измерения (%) для сравниваемой скорости ветра V_3^{100} , определяемая по формуле:

$$\delta_{\text{доп}} = \frac{\Delta V}{V_3^{100}} \cdot 100, \quad (5)$$

где ΔV – погрешность измерения скорости (для СБД «Расписание Погоды», «Вертикальный профиль ветра» – 0,5 м/с).

Модельные V_3^{100} и фактические V_0^{100} среднемноголетние скорости ветра на высоте 100 м, их относительные отклонения δ_v , показатели степени по эмпирической формуле (2) и допустимые погрешности $\delta_{\text{доп}}$, представлены в таблице 3.

Таблица 2

Расчетные и фактические среднемноголетние показатели степени, скорости ветра и их отклонения

| Название АМС | V_0^{100} , м/с | V_3^{100} , м/с | m_0 | δ_v , % | $\delta_{\text{доп}}$, % |
|--------------|-------------------|-------------------|-------|----------------|---------------------------|
| Алматы | 2,48 | 2,4 | 0,26 | 3 | 20 |
| Джалал-Абад | 3,78 | 4,1 | 0,25 | -8,2 | 13,7 |
| Бишкек | 3,67 | 3,7 | 0,25 | -1,7 | 13,2 |

В результате проведенных расчетов не было выявлено нарушения критерия (3) на площадках трех АМС, что свидетельствует о применимости разработанной формулы (2) для территории Кыргызстана.

Поднятие на высоту среднемноголетней скорости ветра на площадках 20-и МС Кыргызстана производилось по формуле (1) с использованием эмпирической зависимости (2), также были определены среднемноголетние удельные мощности ветра на высоте 100 м по формуле:

$$N_{\text{уд}}^{100} = N_{\text{уд}}^{10} \cdot \left(\frac{V_0^{100}}{V_0^{10}}\right)^3. \quad (6)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 3
Среднемноголетние скорости ветра и их удельные мощности на высотах 10 м и 100 м на площадках МС Кыргызстана

| № | МС | V_0 , м/с | m_0 | V_0^{100} , м/с | $N_{\text{уд}}^{10}$, кВт/м ² | $N_{\text{уд}}^{100}$, кВт/м ² |
|----|-------------|-------------|-------|-------------------|---|--|
| 1 | Исфана | 1,3 | 0,26 | 2,4 | 0,114 | 0,72 |
| 2 | Иссык-Куль | 3,9 | 0,24 | 6,8 | 0,536 | 2,84 |
| 3 | Каракол | 2,1 | 0,25 | 3,8 | 0,027 | 0,16 |
| 4 | Чолпон-Ата | 1,0 | 0,26 | 1,8 | 0,043 | 0,25 |
| 5 | Тео-Ашуу | 1,8 | 0,25 | 3,2 | 0,085 | 0,48 |
| 6 | Суусамыр | 0,1 | 0,32 | 0,2 | 0,133 | 1,06 |
| 7 | Бишкек | 0,9 | 0,27 | 1,7 | 0,016 | 0,11 |
| 8 | Карабалта | 1,8 | 0,25 | 3,2 | 0,016 | 0,09 |
| 9 | Байтик | 0,9 | 0,27 | 1,6 | 0,027 | 0,15 |
| 10 | Джаны-Жер | 1,1 | 0,26 | 2,1 | 0,083 | 0,58 |
| 11 | Ит-Агар | 0,8 | 0,27 | 1,5 | 0,088 | 0,58 |
| 12 | Токтогул | 0,5 | 0,28 | 0,9 | 0,094 | 0,55 |
| 13 | Кербен | 0,2 | 0,30 | 0,4 | 0,150 | 1,20 |
| 14 | Чаек | 0,8 | 0,27 | 1,5 | 0,077 | 0,51 |
| 15 | Чаткал | 1,3 | 0,26 | 2,4 | 0,116 | 0,73 |
| 16 | Пача-Ата | 1,3 | 0,26 | 2,3 | 0,022 | 0,12 |
| 17 | Кочкор-Ата | 1,6 | 0,25 | 2,8 | 0,034 | 0,18 |
| 18 | Кок-Джангак | 1,4 | 0,26 | 2,6 | 0,022 | 0,14 |
| 19 | Ак-Терк | 1,0 | 0,26 | 1,8 | 0,029 | 0,17 |
| 20 | Сарыканды | 0,6 | 0,28 | 1,0 | 0,060 | 0,28 |

С использованием программы Surfer 8 были построены карты распределения среднемноголетней скорости ветра на высоте 100 м. (рис. 3).

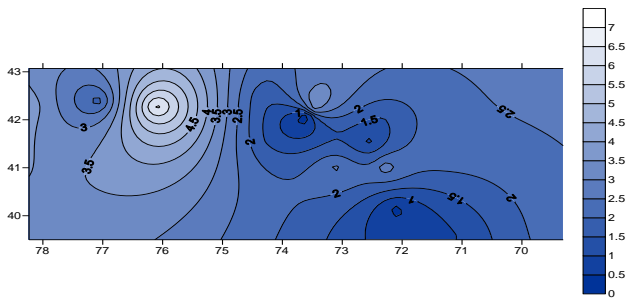


Рис. 3. Карта распределения среднегогодовой скорости ветра на высоте 100 м по территории Кыргызстана

По фактическим данным 20-и МС был определен валовой потенциал ветровой энергии всей территории Кыргызстана $\mathcal{E}_{\text{вал}}$ [5,6] на высотах 10 и 100 м по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{вал}} = \sum_{i=1}^k \mathcal{E}_{\text{уд}i} \cdot F_i / 20, \quad (7)$$

где k – количество районов, на которые разбита территория Кыргызстана (табл. 4); i – номер района, $\mathcal{E}_{\text{уд}i}$ – средняя удельная валовая мощность ветра по данным всех МС из i -ого района, F_i – площадь i -ого района. Результаты расчета валового потенциала ветровой энергии Кыргызстана представлены в таблице 4.

Таблица 4

Расчет валового потенциала ветровой энергии Кыргызстана на высотах 10 м и 100 м

| Район | F, км ² | Эуд _i , кВт·ч/м ² в год | | Эвал _i , млрд. кВт·ч в год | | Кол-во МС |
|-----------------------------|--------------------|---|---------|---------------------------------------|---------|-----------|
| | | 10 м | 100 м | 10 м | 100 м | |
| Северный Кыргызстан | 31760 | 780,0 | 4368,0 | 1238,6 | 6936,4 | 8 |
| Западный Кыргызстан | 33700 | 140,0 | 784,0 | 235,9 | 1321,0 | 5 |
| Северо-восточный Кыргызстан | 43100 | 1839,2 | 10298,4 | 3963,0 | 22193,0 | 3 |
| Южный Кыргызстан | 46191 | 306,1 | 1836,0 | 706,7 | 4240,3 | 3 |
| Центральный Кыргызстан | 45200 | 402,1 | 2331,6 | 908,5 | 5269,0 | 1 |
| Весь Кыргызстан | 199951 | - | - | 7052,8 | 39959,8 | 20 |

Валовой потенциал энергии ветровых потоков над территорией Кыргызстана на высоте 10 м составляет 7052,8 млрд. кВт·ч в год и на высоте 100 м - 39959,8 млрд. кВт·ч в год, причем большая их часть сосредоточена в северо- и северо-восточной части Кыргызстана. Наиболее перспективным регионом для строительства крупных сетевых ВЭС является северо-восточная часть страны, площадь которой составляет 43100 км², и удельная мощность ветрового потока на высоте 100 м достигает 1200 Вт/м². Север Кыргызстана также благоприятен для строительства сетевых ВЭС по ресурсу ветра, но из-за сложного рельефа местности (горный рельеф) и транспортной доступности далее этот регион не рассматривается.

ОЦЕНКА СОЛНЕЧНЫХ РЕСУРСОВ КЫРГЫЗСТАНА

Поскольку строительство крупных ВЭС целесообразно только в северо-восточной части страны, то оценка ресурсов Солнца проводилась только для этого региона. Расчет валового потенциала солнечной энергии северо-восточной

части Кыргызстана проводился по данным 4-х актинометрических станций (АКС) из «Научно-прикладного справочника по климату СССР» [8] (табл.5).

Таблица 5

АКС на территории Кыргызстана

| Название АКС | Регион/область | φ, °с. ш. | ψ, °в. д. |
|--------------|----------------|-----------|-----------|
| Суусамыр | Нарынская | 41,1 | 73,9 |
| Тянь-Шань | Иссык-Кульская | 41,7 | 78,2 |
| Чолпон-Ата | Иссык-Кульская | 42,7 | 77,1 |
| Бишкек | Чуй | 42,9 | 74,7 |

На рисунке 4 представлена карта распределения среднесуточной суммарной солнечной радиации (СР) при средних условиях облачности на горизонтальную площадку для северо-восточной части Кыргызстана. В отличие от ветровых ресурсов приход суммарной СР в северо-восточной части Кыргызстана меняется незначительно: от 1620 кВт·ч/м² в год до 1820 кВт·ч/м² в год.

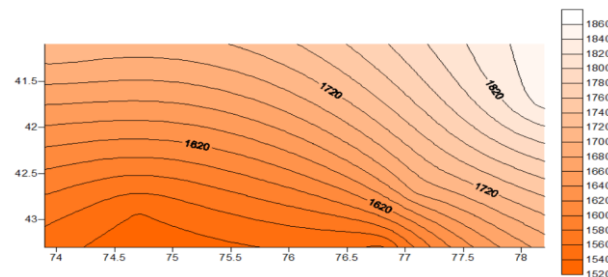


Рис. 4. Карта распределения суммарной солнечной радиации по северо-восточной части Кыргызстана

Приближенная оценка валового потенциала солнечной энергии северо-восточной части Кыргызстана производилась по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{вал}} = \mathcal{E}_{\Sigma} \cdot F, \quad (8)$$

где \mathcal{E}_{Σ} – средний суммарный годовой приход СР в северо-восточной части Кыргызстана принимался равным 1720 кВт·ч/м² в год; F – площадь северо-восточной части страны 43100 км²[9].

Отсюда $\mathcal{E}_{\text{вал}} = 74132$ млрд. кВт·ч в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ ветровых ресурсов Кыргызстана выявил, что ветровая энергия распределена по территории страны крайне неравномерно. Наиболее перспективным регионом для строительства крупных сетевых ВЭС является северо-восточная часть страны, валовой потенциал ветровых ресурсов над которой на высоте 100 м составляет около 22193 млрд. кВт·ч в год, а солнечных - 74132 млрд. кВт·ч в год. В данном регионе следует рассмотреть целесообразность строительства комбинированной электростанции из ВЭС и СФЭС, состав которой выбирается на основе технико-экономического обоснования.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://energo-cis.ru/wyswyg/file/Kyrgyziya.pdf> (дата обращения 08.11.2018).
2. <http://www.ca-portal.ru/article:5444> (дата обращения 07.11.2018)
3. Исаев Р.Э. Потенциал и ресурсы возобновляемых источников энергии в Кыргызской Республике и проблемы

их освоения / Исаев Р.Э., Толумушев А.Э. // Известие Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2016 год. – Т. 2, № 3 – С.122-199.

4. Российский метеорологический сайт «Расписание Погоды» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rp5.ru>

5. ГОСТ Р 54418.12.1-2011 Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Измерение мощности, вырабатываемой ветроэлектрическими установками

6. Дерюгина Г.В. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие / Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин, Р.В. Пугачев, Т.А. Шестопалова – М.: Издательство МЭИ, 2012.

7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2012620870. Специализированная база данных

«Вертикальный профиль ветра» / Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г., Чернов Д.А.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" - №2012620664; заявл. 28.06.2012; опубл. 28.08.2012

8. Научно-прикладной справочник по климату СССР, Серия 3 «Многолетние данные», Части 1-6. Л.: Гидрометеоиздат, 1989 – Выпуск 1, Книга 1 – 483 с.

9. Солнечная энергетика: учеб. пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин; под. Ред. В.И. Виссаринова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008

Evaluation of wind and solar resources of Kyrgyzstan

Maksatov B.M., Derugina G.V., Pugachev R.V.

NRU “MPEI”

Moscow, Russia

baatai.maksat@gmail.com

Abstract. The refined results of the wind potential of the entire territory of Kyrgyzstan at a height of 10 m are presented. An empirical formula for recalculating wind speed up to a height of 100 m has been developed and the main energy characteristics of the wind and wind potential at a height of 100 m have been calculated. Prospective regions for the construction of large network of wind power stations in Kyrgyzstan have been identified. Those are

presented by the north-eastern part of the country, for which the gross potential of solar resources has been estimated.

Keywords: hellman coefficient, wind speed, wind power plant, vertical wind profile, gross potential, solar radiation, solar photovoltaic plant.

Энергообеспечение сельскохозяйственных объектов Краснодарского края за счет использования возобновляемой энергетики

Григораш О.В.

Кубанский государственный аграрный университет

Краснодар, Россия

energyksau@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос возможности использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, энергосбережения и энергообеспечения для отдельного экономически самостоятельного региона России, развивающегося в условиях рыночных отношений. Обоснована необходимость удовлетворения существующих потребностей населения и промышленности в электричестве и тепловой энергии, особенно в сельскохозяйственных районах, удаленных от централизованных сетей, за счет более глубокого изучения, развития и использования возобновляемой энергетики, в том числе нетрадиционной и малой. Обосновывается интерес к нетрадиционным и возобновляемым источникам энергии в связи с усложнением экономической ситуации в России в плане обеспечения энергоресурсами, а так же в связи с созданием новых объектов энергопотребления в рекреационных районах, а так же в районах с суровыми климатическими условиями, удаленных от энергосистем. Дается прогноз развития мировой энергетики до 2050 года по предполагаемому производству электроэнергии. Рассмотрена проблема экономии энергетических ресурсов, защиты окружающей среды, которая имеет особое значение в сельском хозяйстве. Рассматриваются пути выхода из известного кризиса электроэнергетики, усугубляющегося регулярно повторяющимися природными и экологическими катаклизмами, в результате которого происходят отключения, как отдельных предприятий, так и целых энергетических районов, от систем центрального электроснабжения. Дан анализ состояния дел в энергетическом обеспечении сельскохозяйственных объектов Краснодарского края в сложившихся рыночных условиях. Представлена возможность использования имеющихся в крае запасов возобновляемых источников энергии, которые могут снизить дефицит органического топлива. Представлен опыт использования возобновляемых источников энергии в Краснодарском крае. Приводится возможность использования квалифицированных научных и инженерных кадров Краснодарского края для внедрения и использования возобновляемых источников энергии. Показано особое значение, которое придается подготовке высококвалифицированных специалистов-энергетиков в области создания, монтажа и эксплуатации энергоустановок на основе возобновляемых видов энергии.

Ключевые слова: энергетические ресурсы, экономия, возобновляемые источники энергии, энергоснабжение, энергосбережение, предприятия энергетического комплекса.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что человечество потребляет огромное количество энергии, часть которой идет на энергообеспечение сельского хозяйства, при этом происходит сжигание миллиардов тонн топлива, что оказывает огромное влияние на экологию.

В Краснодарском крае проблема энергосбережения весьма актуальна. Удельное потребление электроэнергии

на единицу произведенной продукции в 2-3 раза больше, чем на подобных предприятиях в западной Европе. Проблема экономии энергетических ресурсов и повышения эффективности их использования, защиты окружающей среды имеет особое значение в сельском хозяйстве.

Именно поэтому, сегодня существует необходимость совершенствования энергообеспечения в агропромышленном производстве, а так же рационального использования возобновляемых природных ресурсов и поисков совершенствования технологий их использования.

Чрезвычайно важно для стратегии государства то, что использование возобновляемых источников энергии не только сохраняет ископаемое органическое топливо для будущих поколений, но и увеличивает имеющийся экспортный потенциал нефти и газа.

Краснодарский край обладает всеми видами нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, в то время как, большинство субъектов Российской Федерации имеют ресурсы двух-трех видов. Экономический потенциал России, оцененный в 314 млн. т у.т. в год, равный одной трети внутреннего потребления первичной энергии, используется всего на 5-10%.

ПРАКТИЧЕСКАЯ СТОРОНА ВОПРОСА

Возрастающая необходимость удовлетворения существующих потребностей населения, промышленности и агропромышленного комплекса в электрической и тепловой энергии, особенно в сельскохозяйственных районах, удаленных от централизованных энергетических сетей приводит к необходимости развития возобновляемой энергетики, в том числе, нетрадиционной и малой. Это так же обуславливается необходимостью решения глобальных проблем обеспечения человечества энергией в будущем, связанных с ограниченностью и истощением запасов ископаемых видов топлива, и соблюдением экологической безопасности.

Электрэнергетика Краснодарского края переживает в настоящее время известный кризис, усугубляющийся регулярно повторяющимися природными и экологическими катаклизмами, в результате которых происходят отключения, как отдельных предприятий, так и целых энергетических районов от систем центрального электроснабжения. Такие отключения, вызванные нехваткой генерирующих мощностей, наносят серьезный урон экономике края и требуют срочных мер по предотвращению кризиса.

Анализ состояния дел в энергетическом обеспечении АПК края в сложившихся рыночных условиях показывает,

что большая часть энергетического хозяйства сельскохозяйственных производителей находится в запущенном состоянии.

Основное оборудование электростанций отработало положенный ресурс и требует замены. В промышленно-развитых и сельскохозяйственных районах края эксплуатируется более 3000 котельных с устаревшим оборудованием, фактический КПД менее 70%.

В то же время, в крае имеются обширные запасы возобновляемых источников энергии, которые могут снизить дефицит органического топлива, используя имеющийся опыт применения возобновляемых источников энергии. Степень их использования в энергобалансе края составляет 1,7%.

Анализ состояния дел в энергетическом обеспечении АПК края в сложившихся рыночных условиях показывает, что большая часть энергохозяйств сельскохозяйственных производителей находится в крайне запущенном состоянии.

Одной из основных причин создавшегося дефицита является не укомплектованность квалифицированными электротехническим и теплотехническим персоналом и, в связи с этим, недостаточным вниманием к вопросам рационального и эффективного расходования топливно-энергетических ресурсов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Говоря о возобновляемых источниках энергии необходимо иметь ввиду энергию воды, солнца и ветра, геотермальных источников, которые наиболее рациональны для их использования на юге России [1-6].

Краснодарский край обладает широким спектром возобновляемых источников энергии, которая может быть использована для энергообеспечения региона, их валовой потенциал приведен в таблице 1 [7,8].

Следует отметить, что такие виды энергии как, например, энергия приливов и отливов не могут использоваться на территории края для выработки электроэнергии гидроэлектростанциями потому, что высота приливной волны недостаточна для работы приливных энергостанций, что является следствием затрудненного обмена водой с Атлантическим океаном и относительно малого размера Чёрного и Азовского морей, величина приливов очень мала (2-6 см) и наблюдается только на приборах.

В то же время, в Черном море достаточно хорошо выражены сгонно-нагонные явления под влиянием сильных зимних ветров, которые достигают 2 м в северо-западной части водоёма. При зимних штормах могут образовываться волны высотой до 6-8 м и малым периодом колебания, что затрудняет строительство волновых электростанций, которые хорошо работают на длинных океанических волнах.

Помимо этого, в Черном море трудо- и ресурсозатратно возводить технические сооружения из-за сложного рельефа дна и обилия сероводорода встречающегося на глубине 100 м и более, а в Азовском море из-за непрочных, подвижных песчаных грунтов [9].

Рассматривая два упомянутые и очевидных приоритетных направления: энергетика и растениеводство, определенных Президентом РФ Путиным В.В., необходимо отметить, что за счет энергии воды, ветра, солнца, геотермальных источников и других источников возобновляемой и не-

традиционной энергетики возможно обеспечение в количестве 10-15% всей потребности в электроэнергии в сельском хозяйстве [10].

Таблица 1
Валовой потенциал возобновляемых источников энергии Краснодарского края

| Наименование ресурса | Валовой потенциал, МВт·ч/год | Районы с наибольшим потенциалом энергии |
|--|------------------------------|---|
| Энергия солнца | | |
| на горизонтальную поверхность | 218·10 ⁶ | Черноморское побережье, Таманский полуостров |
| на оптимально ориентированную поверхность ^а | 317·10 ⁶ | |
| на следящую поверхность | 325·10 ⁶ | |
| Энергия ветра | | |
| на высоте 30 м | 147·10 ⁶ | Черноморское побережье, Таманский полуостров, Приморско-Ахтарский район, Ейский район |
| на высоте 50 м | 649·10 ⁶ | |
| на высоте 100 м | 5016·10 ⁶ | |
| Энергия малых рек и водотоков | 8,1·10 ⁶ | Предгорья Кавказа |
| Виоэнергетика | | |
| ТБО | 0,332·10 ⁶ | Краснодар, Новороссийск, Горячий-Ключ, Анапа, Туапсе, Геленджик, Сочи, Армавир |
| ОСВг | 0,285·10 ⁶ | |
| КРСе | 13,9·10 ⁶ | Районы Кубано-Приазовской низменности |
| МРС | 0,67·10 ⁶ | |
| свиньи | 1,3·10 ⁶ | |
| домашняя птица | 3,72·10 ⁶ | |
| ЗБК | 67·10 ⁶ | |
| сахарная свекла | 5·10 ⁶ | |
| картофель | 0,43·10 ⁶ | |

^а – угол наклона равен широте местности

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Краснодарский край является перспективным регионом для строительства солнечных станций, благодаря высокой плотности поступающей солнечной радиации, среднегодовое значение которой доходит до 1400 кВт·ч/м² в сутки, а продолжительность солнечного сияния составляет более 2000 часов в год.

Такие показатели позволяют эксплуатировать на территории края любые солнечные энергоустановки, однако, наибольшую популярность приобрели плоские солнечные коллекторы.

В настоящее время в крае эксплуатируется более 100 установок солнечного горячего водоснабжения общей площадью около 5000 м², среди которых большую часть составляют гелиоустановки пансионатов, санаториев, баз отдыха, индивидуальных застройщиков и фермерских хозяйств.

Одним из подобных объектов является автоматизированная гелиоустановка горячего водоснабжения, смонтированная на главном корпусе Сочинского государственного университета (рис. 1), разработанная и установленная специалистами Сочинского государственного университета на кровле здания главного корпуса [11].



Рис. 1. Гелиоустановка горячего водоснабжения СГУ

В крае введены в эксплуатацию 10 солнечно-топливных котельных (рис. 2), построена и запущена солнечная электростанция в г. Усть-Лабинск, Краснодарского края мощностью 18 кВт/час.



Рис. 2. Солнечно-топливная котельная в г. Анапе, Краснодарского края

Одна из таких котельных расположена в станице Старовеличковской, Краснодарского края.

Что касается солнечных фотоэлектрических установок, то здесь основную часть занимают энергоустановки, предназначенные для освещения дорог, дорожных переходов, светофоров и рекламных плакатов.

ЭНЕРГИЯ ВЕТРА

Строительство ветроэлектрических станций (ВЭС) можно считать одним из самых перспективных вариантов для Краснодарского края и Юга России [12].

Информация о действующих и строящихся и проектируемых ВЭС, разрабатываемых в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 17.10.2009 г. № 823 «О схемах и программах перспективного развития электроэнергетики» воплощается в жизнь [13].

Основным показателем для строительства ВЭС должен являться среднегодовой поток ветра. Районами, которые проходят по данному критерию, при непосредственном участии и заинтересованности администрации Краснодарского края и лично губернатора Кондратьева В.И. являются гг.: Анапа, Темрюк, Новороссийск, Геленджик и Ейск, что показано на рисунке 3.

Имеющаяся в этих городах развитая инфраструктура, дорожно-транспортные развязки позволяют без лишних за-

трат доставлять необходимое оборудование для сооружения ветроэнергетических станций. Кроме того, очень важно, что вышеуказанные города соответствуют по ряду локальных факторов (рельеф местности, близость к водоемам, наличие затеняющих элементов) для широкого строительства и использования ветроэнергетических станций. Заметим, что пороговой скоростью ветра для промышленной ветроэнергетики считается скорость ветра 5 м/с - это связано с окупаемостью станций [14].

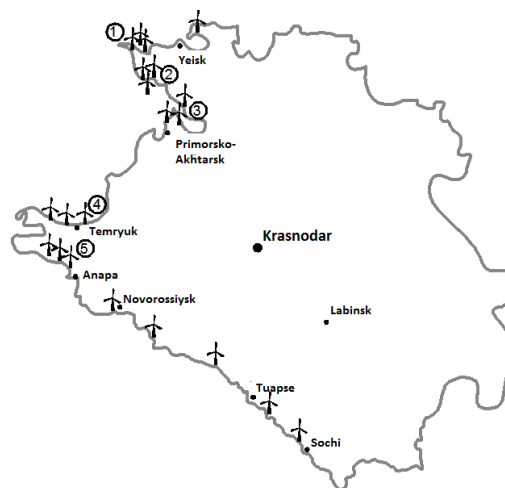


Рис. 3. Распределение среднегодовой скорости ветра по территории Краснодарского края

МАЛАЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

В российской практике под микро-ГЭС подразумевают станции мощностью до 100 кВт, а под малыми (МГЭС) — общей установленной мощностью до 30 МВт с мощностью единичного гидроагрегата до 10 МВт и диаметром рабочего колеса гидротурбины до 3 м. Средняя годовая валовая мощность гидроресурсов России оценивается в 320 ГВт, что превышает установленную мощность всех электростанций энергосистемы России [10].

В настоящее время в России функционирует 22 объекта малой гидроэнергетики с мощностью от 10 до 30 МВт, общей установленной мощностью 542 МВт, и 93 с мощностью до 10 МВт, общей установленной мощностью 150 МВт, одной из крупных, установленных в Краснодарском крае на реке Мзымта является Краснополянская ГЭС, мощность которой 28,9 МВт.

Краснодарский край обладает значительным валовым и техническим потенциалом малой гидроэнергетики, составляющим 0,75% от общероссийского. Экономический потенциал малых ГЭС Краснодарского края составляет 25 – 30% от ожидаемого электропотребления в 2020 г [8].

В Краснодарском крае и Республике Адыгея в 50–е годы 20 века было построено и введено в эксплуатацию большое количество мини- и микроГЭС, функционировавших до 90–х годов 20 века. В настоящее время в рабочем состоянии осталось только три подобных ГЭС установленной мощностью 86,3 МВт, технико-экономические показатели которых приведены в таблице 2.

На территории Кубани можно выделить две группы рек, перспективных для строительства малых ГЭС: реки Черноморского побережья и левобережные притоки реки Кубань.

В результате анализа технических характеристик и условий строительства обосновано сооружение 17 малых ГЭС на реках Черноморского побережья и на притоках реки Кубань с общей установленной мощностью 75,3 МВт, со среднесуточной выработкой электрической энергии – 420,7 млн. кВт ч/год [8].

Таблица 2

Общая характеристика малых ГЭС Краснодарского края построенных в 50-х годах 20 века

| | Название ГЭС | Местоположение | Установленная мощность, МВт | Выработка электроэнергии, ГВт ч |
|---|---------------------|----------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | Краснополянская ГЭС | г. Сочи | 28,5 | 164,3 |
| 2 | Белореченская ГЭС | г. Белореченск | 48 | 232,7 |
| 3 | Майкопская ГЭС | г. Майкоп | 9,4 | 46,4 |

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Следует отметить, что из всех видов возобновляемых источников энергии наибольшие ресурсы в Краснодарском крае имеет геотермальная энергия: по имеющимся данным введено в эксплуатацию более 250 объектов нетрадиционной энергетики, которые обслуживают более тысячи человек. Среди этих объектов 12 геотермальных месторождений с потенциальной мощностью 258 МВт, для которых пробурено 79 скважин с температурой теплоносителя на устье 75-110 оС и тепловой мощностью до 5 МВт [1-3].

В настоящее время термальные воды широко используются в Мостовском, Лабинском, Отрадненском, Крымском районах, в бальнеологических целях – в Абшеронском, Белореченском, Сочинско – Мацестенском и других районах Краснодарского края.

Отдельно следует выделить наиболее крупный объект возобновляемой энергетики Краснодарского края – систему геотермального теплоснабжения в поселке Розовый Лабинского района, использующую энергию двух самых крупных месторождений края (Вознесенское и Южно-Вознесенское). Население данного поселка численностью 1000 человек проживает в 192 зданиях, в том числе в 12-ти двухэтажных домах. Для теплоснабжения поселка в 1975 г. была пробурена геотермальная скважина 3Т Вознесенского месторождения (глубиной 2500 м), в 1982 г. – скважина 4Т Южно-Вознесенского месторождения (глубиной 2500 м). В 2007 году ЗАО «Геотерм-ЭМ» (Москва) был разработан проект демонстрационной системы геотермального теплоснабжения пос. Розовый. На основании результатов исследований и проектной документации в 2010 г. построена 1 очередь геотермальной системы [4].

На рис. 4 представлена комплексная система теплоснабжения поселка Розовый на возобновляемых источниках энергии.

На рис. 5 показано оборудование геотермального центрального теплового пункта (ЦТП). При этом ЦТП обеспечивает половину расчётной тепловой нагрузки посёлка по вновь построенным подземным теплосетям с ППУ теплоизоляцией с подключением 12-ти двухэтажных жилых домов. [5, 6, 8].

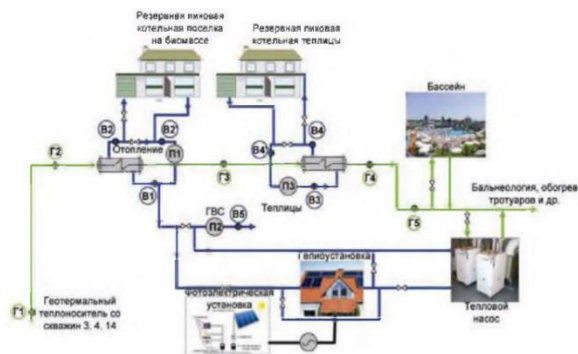


Рис. 4. Комплексная система теплоснабжения поселка Розовый



Рис. 5. Оборудование геотермального центрального теплового пункта в пос. Розовом, Лабинского района, Краснодарского края.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все источники возобновляемой энергии имеют недостатки. Солнечная энергия является дорогой в установке, а ветроэнергетика нестабильна в связи с непостоянством ветра. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что использование возобновляемых источников энергии в Краснодарском крае целесообразно в комбинированном варианте, чтобы данная система была взаимозаменяемой. Но, необходимо отметить, что учитывая возможности России и Краснодарского края в отношении ресурсов, схему можно сделать гибридной, т.е. добавить внешнюю сеть, чтобы полностью избежать перебоев в аварийных ситуациях и увеличить экономическую выгоду за счет применения возобновляемых ресурсов.

Краснодарский край по своим климатическим и природным особенностям активно развивающейся экономики, развитой сетевой инфраструктуре и наличием существенного дефицита энергообеспечения является одним из наиболее подготовленных регионов для развития и применения возобновляемой и нетрадиционной энергетики.

Из-за дефицита Кубанской энергосистемы, а так же в связи с повышением доли генерации тепловых электрических станций, ввод экологически чистых и использующих возобновляемые природные ресурсы ветроэлектрических станций является чрезвычайно актуальным [20]

Комплексное использование термальных вод, включающее в себя теплоснабжение, горячее водоснабжение, выработку электроэнергии, извлечение ценных микроэлементов, бальнеологию, производство сельхозпродукции (рыба, овощи, птица, КРС и др.) и строительных материалов повысит их эффективность.

Совместный анализ метеорологических и радиационных параметров с учетом физико-географических особенностей территорий определил на территории Краснодарского края 5 однородных радиационно-климатических зон: 1 – северная часть Черноморского побережья (Анапа – Тамань) и побережье Азовского моря, 2 – Побережье черного моря от Анапы до Адлера, 3 – Равнинные районы Краснодарского края, 4 – предгорные районы до горы Фишт, 5 – горные районы от верховья реки Мзымта до горы Фишт.

Практически существенное снижение радиационных показателей наблюдается в пятой зоне.

Как недостаток при эксплуатации гелиоустановок, наиболее часто встречающихся на территории Краснодарского края – гололедные образования и туманы, в первой и третьей зонах отмечаются пыльные бури в период с февраля по апрель.

Следует отметить, что каждый из рассмотренных видов ресурсов обладает своими преимуществами и недостатками, которые необходимо учитывать при выборе источника энергии. Однако для всех них характерно неравномерное поступление энергии в течение времени. Наибольшая зависимость от неравномерности поступающей энергии заметна для солнечной энергетики, где поступление энергии зависит не только от времени года и от части суток, но и от прозрачности атмосферы и погодных условий. Все это приводит к необходимости создания средств, предназначенных для выравнивания интенсивности поступления энергии от солнечной радиации к потребителю и способов накопления и хранения этой энергии.

Краснодарский край имеет достаточно благоприятные климатические условия для использования ветровой энергии.

В связи с поиском путей использования ветровой энергии для выработки электрической и тепловой энергии важным является оценка природных и технических ветроресурсов и районирование территории края по ветровому потенциалу, такая работа должна способствовать рациональному и оптимальному использованию ветроресурсов в Краснодарском крае.

Возможности восстановления и проектирования малых ГЭС следует рассматривать как объекты, обеспечивающие более полное использование богатейшего энергопотенциала района, а так же в качестве энергосберегающего фактора и фактора улучшения состояния воздушной среды.

Освоение технического потенциала малой гидроэнергетики Кубани, составляющего порядка до 10 млрд. кВт ч позволит высвободить из топливно-энергетического баланса примерно 1,2 млн. т органического топлива. Это так же скажется на смягчении экологической ситуации в регионе, за счет сокращения количества выбросов вредных веществ в атмосферу.

Основная часть проектируемых малых ГЭС располагается в горных, удаленных районах, на концевых участках ЛЭП, в районах ненадежного энергоснабжения.

В связи с этим малые ГЭС могут рассматриваться в качестве аварийного резерва мощности при отключении энергорайона от объединенной электросети.

Строительство малых ГЭС будет способствовать укреплению хозяйственной базы прилегающих к строительству региона, улучшению местного транспортного обеспечения, энергоснабжения и связи.

Проектируемые малые ГЭС окажут существенное влияние на развитие изолированных районов, стимулируя их рекреационное и хозяйственное использование.

Наконец, малая гидроэнергетика выгодно отличается от других источников энергии, прежде всего независимостью от конъюнктуры непрерывно растущих цен на топливо, потребностью в небольших единовременных вложениях средств, дающих быструю отдачу, по сравнению с другими нетрадиционными источниками энергии, а так же надежностью инвестирования капитала в сельскохозяйственном производстве Краснодарского края [16-20].

ЛИТЕРАТУРА

1. Amerkhanov R.A. Prospects for the use of renewable energy sources / R.A. Amerkhanov et al. // Proceedings of the Kuban State Agrarian University. – 2013. – №42. – P. 185-189.
2. Popel O.S. Atlas of solar energy resources in Russia / O.S. Popel et al. - Moscow: Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, 2010.
3. Amerkhanov R.A. The need to solve the problems of saving energy resources by using modern energy-saving technologies / R.A. Amerkhanov, A.I. Trubilin., K.A. Garkaviy // Proceedings of the Kuban State Agrarian University. – 2012. – № 36. – P. 281-283.
4. Butuzov V.A. Perspectives of Russian solar engineering // Energy saving. – 2012. – №4.
5. Butuzov V.A. Solar heat supply in Russia. Design, construction, operation. Lambert Academic Publishing. Saar-Brucken, 2012.
6. Amerkhanov R.A. Opportunities for the use of renewable energy sources in the Krasnodar Territory / R.A. Amerkhanov et al. // Alternative energy and ecology. – 2015. – № 13-14. –P. 12-25.
7. Butuzov V.A. Experience in the design and construction of a solar power plant for hot water supply of a district hospital / V.A. Butuzov, E.V. Bryantseva, V.V. Butuzov, I.S. Gnatyuk // Heat supply news. – 2012. – №2.
8. Konovalova A.V. The current state and prospects for the development of non-traditional renewable energy in the Krasnodar Territory // Scientific almanac. – 2016. –№. 2-3 (16). –P. 249-253.
9. Korzenkov P.G. Potential of renewable energy of the Krasnodar Territory / P.G. Korzenkov, M.S. Chumak // New Science: Current State and Development Paths. – 2015. –№ 4-1. –P. 33-36.
10. Bekirova K.N. Prospective directions for overcoming the energy shortage of the Krasnodar Territory / K.N. Bekirova, M.V. Zelinskaya // Economics and management: actual questions of theory and practice Materials of the scientific-practical conference. – 2015. – P. 21-25.
11. Bekirova K.N. Increasing the level of energy self-sufficiency of the Krasnodar Territory with the help of renewable energy sources / K.N. Bekirova, M.V. Zelinskaya // Innovative Economy: Prospects for Development and Improvement. –

2015. – № 4 (9). – P. 34-39.

12. Dizendorf A.V. Prospects for renewable energy / A.V. Dizendorf, A.E. Uskov // Political electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. – 2016. – № 124. – P. 1403-1416.

13. Kulinich K.S. Efficiency of renewable energy sources in southern regions of Russia / K.C. Kulinich, O.S. Zamerina // Engineering systems and structures. – 2015. – № 1 (18). – P. 74-78.

14. Grigorash O.V. On the efficiency and feasibility of using renewable energy sources in the Krasnodar Territory / O.V. Grigorash, V.V. Tropin, A.S. Oskina // The polytechnical network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. – 2012. – № 83. – P. 188-199.

15. Grigorash O.V. Non-traditional autonomous power sources / O.V. Grigorash, Yu.I. Strelkov // Industrial Power Engineering. – 2001. – No. 4. – P. 37-40.

16. Grigorash O.V. Renewable energy sources: monograph / O.V. Grigorash, Yu.P. Stepura, R.A. Suleymanov, E.A. Vlasenko, A.G. Vlasov; Under the Society. Ed. O.V. Grigorash. - Krasnodar: KubGAU, 2012, – 272 p.

17. Amerkhanov R.A. Features of the use and development of renewable energy in the Krasnodar Territory / R.A. Amerkhanov, A.S. Kirichenko, A.A. Kulichkina, Yu.L. Murtazaeva // Herald of the agrarian science of the Don. – 2015. – №.1 (29). – P. 26-38.

18. Launch ceremony of the Kosh-Agach solar power plant. (September 4, 2014) [The electronic resource] - URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/46560>.

19. Novak A.V. Results of the work of the fuel and energy complex of the Russian Federation in the first half of 2016 [Electronic resource] - URL:

<http://minenergo.gov.ru/node/5660>

20. Decree of the Government of the Russian Federation of 17.10.2009 № 823 "On schemes and programs for the long-term development of the electric power industry" // Collection of Legislation of the Russian Federation, 26.10.2009, No. 43, art. 5073.

21. Report on the functioning of the UES of Russia in 2016. JSC "SO UES". [Electronic resource] - URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2017/ups_rep2016.pdf

22. Topaz Solar Farm, California, NASA Earth Observer - URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=85403> & src = eoa-iotd

23. Amerkhanov R.A. Potential of renewable energy in the Krasnodar Territory / R.A. Amerkhanov, R.S. Kasyanov, I.V. Milovanov // Instruments of modern scientific activity. – 2016. – P. 13-14.

24. Verbitskaya S.V. Possibilities of using solar energy in the Krasnodar Territory / S.V. Verbitskaya, R.A. Amerkhanov, Yu.L. Murtazaeva, M.I. Milovanov // Proceedings of the Kuban State Agrarian University. – 2014. – № 48. – P. 146-149.

25. Amerkhanov R.A. Analysis of technical and economic indicators of the wind power plant // Energy saving and water treatment. – 2003. – № 3. – P. 66.

26. Butuzov V.A. Prospects for the development of renewable energy in the use of complex low-power solar-power plants / V.A. Butuzov, R.A. Amerkhanov, E.V. Bryantseva, V.V. Butuzov, I.S. Gnatyuk // Proceedings of the Kuban State University. – 2010. – № 24. – P. 188-196.

Power Supply of Agricultural Facilities of the Krasnodar Territory Through the use of Renewable Energy

Grigorash O.V.

Kuban State Agrarian University
Krasnodar, Russia
energyksau@mail.ru

Abstract. The possibility of using non-traditional and renewable energy sources, energy saving and energy supply for a separate economically independent region of Russia, developing in the conditions of market relations, has been considered. The necessity of satisfaction of the existing needs of population and industry in electricity and thermal energy, especially in agricultural areas remote from the central networks, due to a more in-depth study, development and use of renewable energy, including non-traditional and small energy was grounded. The interest in non-traditional and renewable energy sources due to the complexity of the economic situation in Russia in terms of energy resources, as well as in the creation of new energy consumption facilities in recreational areas, as well as in areas with severe climatic conditions, remote from power systems was substantiated. There was given the prognosis of world energetic development to 2050 on proposed electrical energy production. There was considered the problem of saving energy resources, environmental protection, which is of particular importance in agriculture. The ways of going out of well-

known power industry crisis, worsening due to regularly recurring natural and ecological disasters, as a result of which they come off as separate enterprises and the whole energy of areas, from central supply were considered. The analysis of a state of affairs in power supply of agricultural objects of Krasnodar Territory in the developed market conditions was given. The possibility of using the available RES reserves in the region which can reduce the organic fuel deficit has been presented. There was presented the experience of energy resources use of the Krasnodar Territory. The possibility of using qualified scientific and engineering personnel of the Krasnodar Territory for the introduction and use of renewable energy sources are set out. There was shown the specific importance which it attained to the preparation of highly qualified power engineering specialists in the sphere of development, installation and operation of power installations on the RES basis.

Keywords: energy resources, economy, renewable energy sources, energy supply, energy saving, energy complex enterprises.

Использование безопасного генератора в ветроэнергетике

Горячев С.В., Харченко П.А.

Оренбургский государственный университет

Оренбург, Россия

gsv_brent@mail.ru, pasha97_06@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена проблеме использования альтернативных, возобновляемых источников для получения электрической энергии из энергии ветра. Цель работы - разработка конструкции генератора, направленная на минимальное использование, и усовершенствование имеющихся устройств, для получения электрической энергии из ветра. Также, не менее важной целью является эксплуатация указанного устройства, как экологически чистого и не имеющего вредных воздействий на окружающую среду. Поставленная в работе цель достигается за счет введения новых элементов в генераторе. Новизна работа заключается в получении электрической энергии из ветра за счет колебательного движения устройства, которое происходит благодаря обтеканию жидкости или газа протяженных цилиндрических тел с продольной осью, перпендикулярной направлению движения сплошной среды. Проведенные эксперименты с установкой показали, что данный генератор способен генерировать большее количество энергии на меньшей площади; и происходит увеличение скорости амплитуды колебательного движения за счет добавления в установку – дополнительного элемента (пружины). Дается сравнение исследуемого ветрового генератора с существующими аналогами, то есть, с традиционными генераторами с лопастями и установкой близкой по конструкции и принципу действия нашего исследуемого устройства; рассмотрены их конструкции и приведены недостатки. В заключении раскрываются выгоды использования предложенного безопасного ветрового генератора по сравнению с аналогами и существующими установками в ветровой энергетике.

Ключевые слова: ветроэнергетика, энергия, устройство, генератор, станция, безопасной ветрогенератор.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день, ветроэнергетика – это еще одна возможность получения различных видов энергии, получающаяся за счет перемещения больших объемов воздуха, то есть на использовании энергии ветра. Энергия ветра – это экологически чистая, неисчерпаемая энергия, и, ее можно применять в домашних условиях. Ветряная энергия применялась населением земли с давних пор. И только тогда, когда люди открыли для себя выгоду электрической энергии, снова было сконцентрировано внимание за энергией ветра: создавались ветряные электрические станции для индустриального производства электрической энергии. Также были изобретены электрические станции для аграрного хозяйства, способные возводиться прямо на месте, а оборудование для их изготовления были легкодоступны. Данные устройства эксплуатировались как для света, так и для домашних дел (мельниц). Но в середине 20 века произошел спад ветроэнергетики из – за возникновения недорогих передающих и распределительных сетей электрической станции, утилизирующих традиционное органическое топливо, ГЭС. Ограниченность ресурсов к началу 21 века,

снова привела к возобновлению ветроэнергетики, которая, несомненно, неисчерпаема. [1-3]

Достоинства возобновляемых энергии источников по сравнению с другими:

1. Экологическая чистота;
2. Отсутствует потребление топлива;
3. Низкий уровень шума;
4. Автономность работы.

УСТРОЙСТВО БЕЗОПАСНОГО ВЕТРОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Безопасные ветровые генераторы являются одним из наиболее эффективных и выгодных устройств, они относятся к оборудованию электроэнергетики, а именно, к устройствам для получения электрической энергии из энергии ветра, и могут использоваться как на крупных ветровых электрических станциях, так и для оснащения отдельно взятых районов, населенных пунктов и частных владений энергией.

В отличие от традиционных ветровых генераторов новая система не вращается. Установка работает за счет вихревых цепочек, которые наблюдаются при обтекании жидкостью или газа протяженных цилиндрических тел с продольной осью, перпендикулярной направлению движения сплошной среды. Отрыв вихрей происходит с обеих сторон тела – поочередно; после срыва вихри образуют две цепочки с задней стороны обтекаемого тела, направления вращения вихрей в одной цепочке противоположно направлению в другой. Такая вихревая дорожка называется – дорожкой Кармана, она представлена на рисунке 1.

Безопасной ветровой генератор содержит: систему генерации. В нашем случае выбран линейный генератор, имеющий минимальное количество деталей: катушка, достаточно мощные неодимовые магниты, пружину; мачту. Мачта изготовлена в виде длинного конуса перевернутой формы, материал должен быть предельно легким, например: стекловолокно; текстолит. Так как текстолит электроизоляционный материал, на него и будут крепиться неодимовые магниты; инвертор – это устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии; аккумулятор для накопления электрической энергии; фундамент – основание, на которое будет устанавливаться устройство.

В основе работы предлагаемой установки базируется работа линейного генератора. На рисунке 2 представлена схема работы линейного генератора, а, как известно, работа линейного генератора достаточно проста и эффективна. Магнит (1) находящийся в корпусе (3), при движении или соприкосновении с электромагнитной катушкой (2) будет вырабатывать переменный ток.

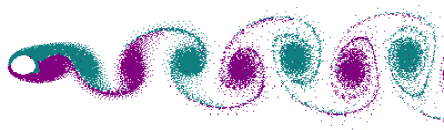


Рис.1. Дорожка Кармана

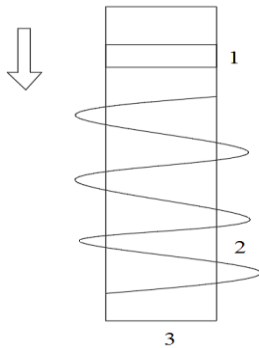


Рис.2. Схема работы линейного генератора: 1 - магнит, 2 - катушка, 3 – корпус

На рисунке 3 представлен безопасный ветрогенератор состоящий из мачты (1), текстолита (2), неодимовых магнитов (3), катушек (4), пружины (5), фундамента (6), стержня (7), верхняя часть (8), нижняя часть (9).

Новизна описывается принципом действия устройства (рис.3):

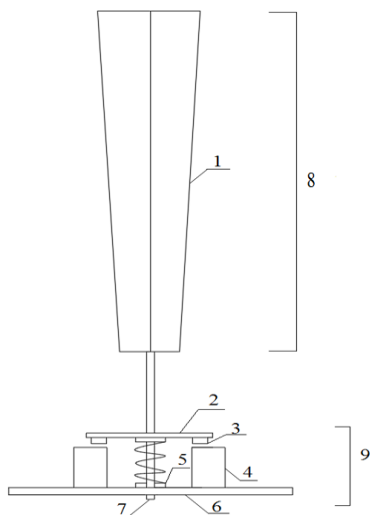


Рис. 3. Схема безопасного ветрового генератора
1 - мачты, 2 - текстолита, 3 - неодимовых магнитов, 4 - катушек, 5 - пружины, 6 - фундамента, 7 - стержня, 8 - верхняя часть, 9 - нижняя часть

Поток ветра, направляющийся в сторону мачты (1), заставляет ее совершать колебательные движения. При этом неодимовые магниты (3), которые закреплены на текстолите (2) параллельно друг другу, совершают движения взаимодействуя с катушками (4), в свою очередь катушки

установлены на фундаменте в диаметрально противоположных сторонах.

В научных трудах [4-16], существующих на данный момент, еще не рассматривался вопрос об увеличении колебательного движения и большего получения энергии для исследуемого устройства.

Новизна работы заключается в том, что в конструкцию безопасного ветрогенератора спроектированы дополнительные элементы, с целью повысить выработку электрической энергии и увеличить площадь колебательного движения и амплитуды колебаний.

Для увеличения скорости колебательного движения в конструкцию установки был введен дополнительный элемент – пружина (5), которая крепит стержень (7) к фундаменту. За счет этого возникает нагрузка и сжатие пружины, тем самым происходит увеличение скорости колебательного движения и амплитуды колебаний.

Для большей выработки электрической энергии в установку были введены неодимовые магниты (прим: неодимовые магниты – достаточно мощные магниты, сплав неодима, бора и железа; стойкость: 0.1—2 % своей намагниченности за 10 лет);

Ветрогенератор (1) (рис. 4.) за счёт энергии ветра (то есть ветровой поток направляется на мачту устройство), производит переменный ток, затем переменный ток поступает контроллер заряда (2), где контроллер регулирует зарядное напряжение, и, тем самым, предохраняет аккумуляторные батареи (3) от перезаряда, после, ток поступает в инвертор (4), где преобразуется из переменного тока в постоянный и направляется к потребителям (5).

Исследуемая ветровая установка может эксплуатироваться для электроснабжения бытовых нагрузок в жилом доме, таких как: освещение; теле и радиотехника; холодильники и другие (пылесосы, утюги, кипятильники, миксер); оргтехника (компьютеры, телефоны и так далее); промышленное электрооборудование небольшой мощности (насосы, компрессоры).

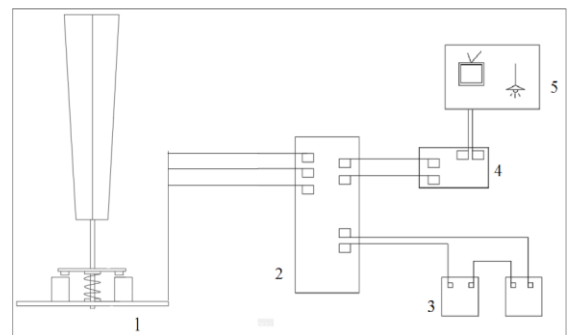


Рис. 4. Схема энергоустановки с ВЭУ: 1 - ветрогенератор, 2 - контроллер заряда, 3 - аккумуляторные батареи, 4 - инвертор, 5 - потребитель;

РАСЧЕТ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Технологический расчет

Для примера выбираем мощность генератора $P = 1$ кВт при скорости ветра 10 м/с;

В среднем при мощности 1 кВт, напряжение составляет $U = 24$ В;

1. Находим силу тока I , она рассчитывается по формуле:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1000 \text{ В}}{24 \text{ В}} = 41,6 \approx 42 \text{ А}; \quad (1)$$

2. Находим сопротивление цепи R, по формуле:

$$R = \frac{24 \text{ В}}{42 \text{ А}} = 0,57 \approx 0,6 \text{ Ом}; \quad (2)$$

Левая часть:

Генератор (рис. 5), который состоит из источника (1) ЭДС и внутреннего сопротивления $R_{\text{вн}}$; Внутреннее сопротивление – это то сопротивление провода которым наматываются обмотки.

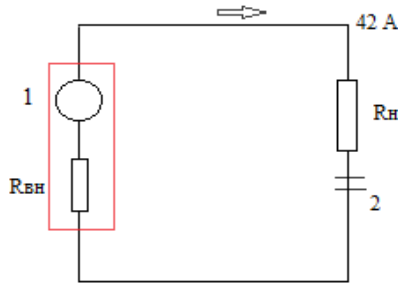


Рис. 5. Схема

Правая часть:

Нагрузка R_n (рис. 5), состоящая из одного или двух аккумуляторов (2), которые также имеют сопротивление;

С левой части должен течь ток $I = 42$ Ампера в правую часть.

Предположим, что внутреннее сопротивление генератора $R_{\text{вн}}$ равняется сопротивлению нагрузки R_n :

$$R_{\text{общ}} = R_{\text{вн}} + R_n = 0,6 \text{ Ом} = \frac{0,6}{2} = 0,3 \text{ Ом}; \quad (3)$$

$$R_{\text{ген}} = R_n = 0,3 \text{ Ом}; \quad (4)$$

3 - фазный генератор, на фазу 600 витков

Длина одного витка 60 метров.

60 метров провода должно иметь сопротивление 0,3 Ом;

3. Расчет аккумуляторов:

Поскольку напряжение ветрового генератора зависит от ветра, аккумуляторы выступают в виде накапливающих устройств; накапливают, когда энергия имеется, отдает, когда энергия отсутствует.

(на 1кВт мощности от 2 до 4 аккумуляторов);

Выбираем аккумулятор с характеристиками напряжением $U = 12 \text{ В}$, емкостью $F = 120 \text{ А} \cdot \text{ч}$ (ток который аккумулятор может отдать в течение часа, кратковременный ток в среднем на 8 раз превышает номинальный):

$$F = 190 \cdot 8 = 1520 \text{ А}; \quad (5)$$

Исходя из $F = 1520 \text{ А}$, находим внутреннее сопротивление аккумулятора $R_{\text{вн}}$ по формуле:

$$R_{\text{вн}} = \frac{12 \text{ В}}{1520 \text{ А}} = 0,0078 \text{ Ом}; \quad (6)$$

Поскольку 2 аккумулятора:

$$R_{\text{акб}} = 0,0078 \text{ Ом} \cdot 2 = 0,0156 \text{ Ом}; \quad (7)$$

4. Работа ветрогенератора:

При скорости 10 м/с - мы должны получить 1 Киловатт-час.

Если при скорости ветра 10 м/с ветрогенератор вырабатывает 24 В, то согласно закону Ома, ток для полной цепи будет зависеть от полного сопротивления $R_{\text{пол}}$:

$$R_{\text{пол}} = R_{\text{ген}} + R_{\text{акб}} = 0,3 + 0,0156 = 0,3156 \text{ Ом}; \quad (8)$$

Закон Ома:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{24 \text{ В}}{0,3156 \text{ Ом}} = 75,7 \approx 76 \text{ А}; \quad (9)$$

По цепи (рис. 4) протекает ток $I = 76 \text{ А}$, нам нужно определить какое напряжение приложено к аккумуляторам и какое напряжение будет теряться на генераторе.

Напряжение на аккумуляторах зависит от тока и сопротивления:

$$U_{\text{акб}} = I_{\text{акб}} \cdot R_{\text{акб}} = 76 \text{ А} \cdot 0,0156 = 1,18 \text{ В}; \quad (10)$$

Напряжение на генераторе:

$$U_{\text{ген}} = I_{\text{ген}} \cdot R_{\text{ген}} = 76 \text{ А} \cdot 0,3 = 22,8 \text{ В}; \quad (11)$$

5. Выбор инвертора:

Расчёт мощности инвертора.

Для расчёта мощности инвертора возьмём приборы, например:

телевизор ($P = 160 \text{ Вт}$);

холодильник ($P = 300 \text{ Вт}$);

ноутбук ($P = 340 \text{ Вт}$);

лампа ($P = 18 \text{ Вт}$) (4 шт).

Рассчитаем общую мощность этих устройств:

$$P = 18 \cdot 4 + 160 + 300 + 340 = 872 \text{ Вт}; \quad (12)$$

Округляем

$$P = 900 \text{ Вт};$$

Для расчета выходной мощности инвертора потребуется также автономная работа техники, возьмем, к примеру, 3 часа.

Мощность, которую приборы потребляет за это время:

$$P = 3 \cdot 900 = 2700 \text{ Вт}; \quad (13)$$

Затем рассчитываем пиковую нагрузку. Полученное значение умножаем на коэффициент 1,3:

$$P = 2700 \cdot 1,3 = 3510 \text{ Вт}; \quad (14)$$

Выбираем инвертор:

Инвертор DC-AC Мощность 4000 Вт

Входное напряжение 24 В (21 - 30 В)

Синусоидальное выходное напряжение 220 В, 50 Гц

Конструктивный расчет

1. Расчет индуктивности катушек:

В ветровом генераторе содержится две катушки по 600 витков на каждой.

Индуктивность определяется по формуле:

$$L = \frac{D^2 \cdot n^2}{45 \cdot D + 100 \cdot l} = \frac{0,03^2 \cdot 600^2}{45 \cdot 0,03 + 100 \cdot 4} = 0,8 \text{ мГн}; \quad (15)$$

где D – диаметр катушки в см (0,3 мм = 0,03 см); n – количество витков (600); l – длина намотки катушки (4-5 см).

Находим сопротивление катушки:

$$I = \frac{\varepsilon}{r + R} = \frac{0,3}{0,05 + 0,6} = 0,46 \text{ А}; \quad (16)$$

где ε – ЭДС (0,3 В); r – внутреннее сопротивление (при 0,8 мГн = 0,05 Ом); R – сопротивление цепи;

2. Расчет колебаний мачты:

Для большего колебания мачта устройства должна быть изготовлена из принципиально легких материалов, в нашем случае выбрано стекловолокно, так как оно обладает следующими качествами:

1. высокий уровень прочности (превосходство над высоколегированной сталью);

2. устойчивость к термообработке (структура сохраняется даже при сильном нагревании);
3. не горючесть;
4. экологичность;
5. противостоит деформации.

Колебания устройства непосредственно зависят от скорости ветра. Чем выше скорость ветра, тем больше колебания, соответственно большая генерация энергии; также генерация зависит от размера мачты, чем выше, тем больше выработка энергии (длина мачты предлагаемого устройства 6-7 метров). В нашей установке для увеличения скорости и амплитуды колебаний в основание устройства установлена пружина.

а) Период колебаний T (рис. 6.) (примерно 0,5 секунд);

б) Расчет частоты колебаний (число колебаний, совершаемых телом в единицу времени) определяется по формуле:

$$V = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ Гц}; \quad (17)$$

T – Период колебаний;

в) Расчет гармонических колебаний:

$$x = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha) = 2,5 \cdot \cos(12,56 \cdot 0,5 + 1) = 1,11 \text{ м}; \quad (18)$$

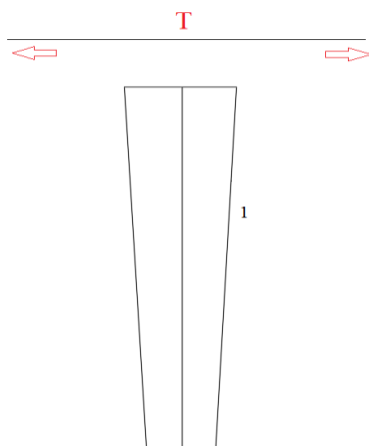


Рис.6. Период колебаний: 1 - мачта

где A – амплитуда колебаний (2-3 см); ω – круговая (циклическая) частота; t – время; α – начальная фаза.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot V = 2 \cdot 3,14 \cdot 2 = 12,56 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad (19)$$

3. Выбор неодимовых магнитов

Размер неодимовых магнитов зависит от количества катушек и требуемой мощности генератора.

Выбираем 2 магнита марки N35:

1. С остаточной магнитной индукцией B_r (1,17-1,20 Тесла); (5,3-12,0 кГаусс);
2. Форма – блок;
3. Размеры: 100x50x25 мм
4. Плотность: 7.9 г/см³

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Использование предложенной установки позволит существенно снизить финансовые затраты на производство, эксплуатацию и её ремонт, так как устройство содержит

минимизированное число деталей. Техническое обслуживание не требует значительного периода времени. Отсутствует необходимость в периодической смазке и замене запчастей.

В отличие от аналогичных ветряных генераторов с лопастями, наше устройство не оказывает воздействия на окружающую среду, то есть, не создает шума. И является безопасным для птиц. Недостатком устройства является то, что безлопастная турбина вырабатывает в среднем на 30% меньше энергии, чем обыкновенная. Исходя из этого безлопастных ветровых устройств необходимо устанавливать куда больше, чем устройств с лопастями. Но так как данное устройство обладает меньшими габаритными размерами в отличие от традиционных ветровых устройств, то на меньшей площади можно установить большее количество установок.

Требуемая мощность установки, несомненно, зависит от скорости ветра, размера магнитов, количества витков на катушках, а также от размера мачты (чем длиннее, тем больше выработка энергии).

Поскольку, самым распространенным в ветроэнергетике является горизонтальный ветровой генератор с лопастями, сравним его с предлагаемым устройством и сделаем выводы.

Отметим основные недостатки установки:

1.финансы;

Самым значительным минусом устройства является то, что за установку, которая способна вырабатывать 1 МВт энергии, начальная стоимость будет составлять 1 миллион долларов;

Окупаемость ветрогенератора с лопастями составляет около 10 лет, при этом в течение 10 лет нужно сменить как минимум один раз в батарею, инвертор и другие элементы устройства, по этой причине повышается финансовые затраты на техобслуживание и ремонт;

2.проектирование;

Громоздкость установки, для того чтобы возвести один ветрогенератор потребуются дополнительные оборудования (машины краны);

Для станции, на которой будут располагаться несколько ветровых установок, требуется огромная обширная территория;

В силу того, что одна ветровая установка достаточно большая, нахождение рядом с ней других нецелесообразно, поскольку будет создаваться барьер и мощность установок снизится.

3.обслуживание и ремонт;

Персонал обслуживающий ветрогенератор с лопастями должен регулярно проводить диагностику установки, то есть регулярно подниматься на 50 -100 метровую башню;

Если повышается техническое обслуживание, диагностика и ремонт, то повышаются затраты, то есть происходит дополнительная выплата зарплат обслуживающему персоналу;

4.конструкция

В системе генерации установлены подшипники, которые нуждаются в техническом обслуживании и замене через каждые 4000 часов эксплуатации;

Отказ лопастей: лопасти изнашиваются из-за ветровой нагрузки, усталости материала и вибрации, что может привести к их разрушению;

Износ сварных швов: стальные сварные швы со временем изнашиваются, в них появляются трещины из-за накапливаемых остаточных напряжений. Способность сохранения устойчивости башни уменьшается, и в конечном итоге корпус башни разрушается;

Дисбаланс ротора: ротор и лопасти имеют встроенный дисбаланс, из-за чего во время вращения возникает эксцентрическое движение. Снег или обледенение, неучтенные при проектировании, могут привести к критическим нагрузкам из-за разбалансировки ротора и лопастей;

Коррозия болтов основания из-за агрессивной почвы: почва обладает агрессивными свойствами, которые приводят к ухудшению состояния бетона и проникновению элементов почвы в болты / крепления. Коррозия болтов / креплений приводит к снижению структурных свойств основания, а, в конечном счете, и уменьшению жесткости;

Лопастей установки создают шумы сравнимые с шумом автомобиля движущегося со скоростью 70 км/ч, что создает дискомфорт для людей и отпугивает животных; являются угрозой для некоторых птиц, то есть, принуждая птиц мигрировать.

Предлагаемый безлопастной ветрогенератор по сравнению с описанным выше требует значительно меньше затрат на производство:

1. Стоимость катушки индуктивности около 1000 руб. и выше (для примера Visaton KN 6.8 MH/0.6 - 903 руб.);

2. Так как мачта изготавливается из стекловолокна, его стоимость оценивается 57 руб. /м. кв.

3. Стоимость неодимовых магнитов около 2000 руб. за штуку (для примера магнит марки N35 – 950 - 2000 руб.);

Проектирование:

Имеет значительно меньшие размеры по сравнению с ветрогенератором с лопастями, благодаря этому на той же площади можно установить куда большее количество безлопастных ветрогенераторов;

Для сооружения не требуется дополнительных устройств, установок, машин, его могут собрать 2-3 человека;

Обслуживание и ремонт:

Поскольку устройство содержит минимальное количество деталей и в нём отсутствуют детали нуждающиеся в смазке, необходимость в ремонте и техническом обслуживании уменьшается;

Конструкция:

В нашем устройстве не имеется подшипников, болтов, гаек, или же других элементов нуждающихся в смазке, поэтому отсутствует необходимость регулярно смазывать запчасти.

В устройстве нашего генератора имеется неодимовые магниты, которые теряют свою намагниченность после 10 лет эксплуатации.

Исходя из описанных выше финансовых затрат на изготовление установки, можно сказать, что по сравнению с традиционными ветрогенераторами, затраты на техническое обслуживание, ремонт, диагностику нужны в малых количествах.

Соответственно, окупаемость установки будет выше.

Также в сравнении с ветрогенератором с лопастями наша установка не наносит вреда окружающей среде, безопасно для птиц и издает низкий уровень шума

Можно было бы назвать недостатком то, что устройство вырабатывает в среднем на 30% процентов меньше энергии, чем установка с лопастями. Но при этом на той же площади, где установлена установка с лопастями можно установить куда больше безлопастных генераторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. – Москва: ИНФРА-М, 2005. – 278 с.

2. Безруких П.П. Ветроэнергетика. – Москва: Интехэнерго-Издатель, 2014. – 304 с.

3. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. – Москва: ОГИЗ, 1948. – 547 с.

4. Ветровая электростанция Vortex 2015 // vortexbladeless URL: <https://vortexbladeless.com/Т> (дата обращения: 25.11.2018).

5. Шейдлин А.Е. Новая энергетика. – М.: Наука, 1987. – 463 с.

6. Абдурашитов Ш.Р. Общая энергетика: учеб. пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. – Уфа: УГАТУ, 2006. – 334 с.

7. Бежан А.В. Развитие ветроэнергетики в мире / А.В. Бежан, В.А. Минин // Энергия: экон., техн., экол. – 2007. – № 6. – С.42-44.

8. Соколовский Ю.Б. Новые конструкции ветровых энергетических установок / Ю.Б. Соколовский, В.М. Роткин, А.Ю. Соколовский // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т.3, №4. – С. 22-29.

9. Антонио Морено-Муньос Крупномасштабная интеграция энергосберегающих источников энергии (IetEnergy Engineering). – Мадрид: Институт инженерии и технологии, 2017. – 333 с.

10. Вон К. Нельсон, Кеннет Л. Старчер. Введение в возобновляемую энергию. 2-е издание изд. CRC Press, – 2015. – 423 с.

11. Войцех О.Г. Новые перспективные ветроэлектростанции // Инженер. – 2005. – № 11. – С.8-9.

12. Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии / П.П. Безруких, Д.С. Стребков. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. – 264 с.

13. Бежан А.В. Экологические преимущества развития ветроэнергетики // Энергия: экон., техн., экол. – 2007. – №1. – С.45-47.

14. Анализ характеристик ветроэлектрических установок / Харитонов В.П. и др. // Техника в сельском хозяйстве. – 2004. – №5. – С.11-13.

15. Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 256 с.

16. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Якупов А.М. Ветроэнергетическая установка // Патент Рос. Федерация № 2282925. 2014г.

Use of a Bladed Generator in Wind Power

Goryachev S.V., Kharchenko P.A.

Orenburg State University

Orenburg, Russia

gsv_brent@mail.ru, pasha97_06@mail.ru

Abstract. The work is devoted to the problem of using alternative, renewable sources for obtaining electric energy from wind energy. The purpose of the work is the development of generator designs aimed at minimal use, and improvement of devices, to obtain electrical energy from the wind. In addition, it is equally important to exploit oneself as environmentally friendly and not having harmful effects at the environmental level. The goal set in the work is to take the introduction of new elements in the generator. The novelty of the work lies in obtaining electric energy from the wind due to oscillatory movements that occur throughout the day. The experiments performed with the installation showed that this generator is capable of generating and generating a greater amount of energy per area scrap; and there is an increase in the speed of the amplitude of the oscillation of motion before adding an additional

element (spring) to the installation. A comparison of the investigated wind turbine with existing analogues, that is, with traditional sources with blades and installation of a device similar in design and principle of operation of our studied device is given; their designs are considered and disadvantages are given. In conclusion, the advantages of the Islamic generator-rator are revealed in comparison with analogues and existing installations in wind energy.

Keywords: energy, energy, device, generator, station, without lobed aggregate.

Экспериментальное определение характеристик синхронизированной аксиальной двухвходовой генераторной установки

Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Христофоров М.С.
Кубанский государственный технологический университет
Краснодар, Россия
kklev1@mail.ru, jlms@mail.ru, khristoforov87@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрена синхронизированная аксиальная двухвходовая генераторная установка, предназначенная для одновременного преобразования энергии двух возобновляемых источников энергии (Солнца и ветра), показана программа эксперимента, описан экспериментальный стенд, продемонстрированы результаты эксперимента. Задачами эксперимента были: подтверждение возможности построения электротехнического комплекса на базе синхронизированной аксиальной двухвходовой генераторной установки; подтверждение возможности стабилизации выходного напряжения до соответствия потребительским свойствам электроэнергии ($U_{л}=380\text{ В}$, $f=50\text{ Гц}$); получение экспериментальных характеристик и их сравнение с результатами теоретических положений и математического моделирования. Работа выполнена в рамках исследований, проводимых в ФБГОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» на кафедре электротехники и электрических машин по теме возобновляемые источники энергии под руководством Заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора Б.Х. Гайтова.

Ключевые слова: энергия ветра, энергия Солнца, САДГУ, двухвходовой генератор, эксперимент.

ВВЕДЕНИЕ

Современной тенденцией в энергетике является отведение все большего внимания роли альтернативной энергетики. Согласно ежегодному отчету Renewables 2018 Global Status Report [1] в прошлом году с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ) было выработано примерно 26,5% мировой электроэнергии. Но использование ВИЭ предъявляет новые требования к генераторным установкам, предназначенным для работы в ветряных или солнечных электростанциях.

На кафедре электротехники и электрических машин ФБГОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» разработана синхронизированная аксиальная двухвходовая генераторная установка (САДГУ) [2-3]. САДГУ позволяет производить суммирование от двух ВИЭ (ветра и Солнца) и преобразование полученной суммарной энергии в электроэнергию в одном устройстве без использования инвертора.

САДГУ состоит из синхронизатора и аксиальной двухвходовой генераторной установки (АДГУ). На рис. 1 приведена конструкция АДГУ, на рис. 2 – ее электрическая схема (конструкция и схема представлены без ветроагрегата и солнечные батареи).

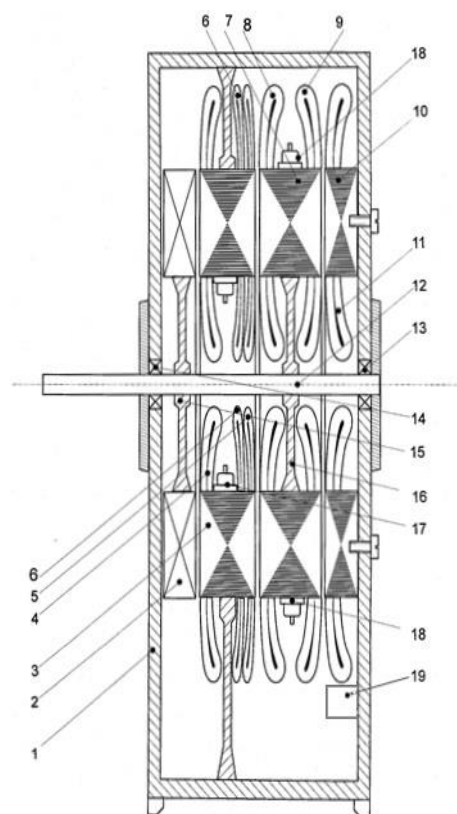


Рис.1. Конструкция аксиальной двухвходовой генераторной установки в разрезе

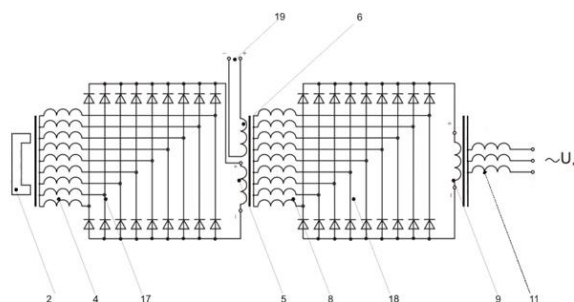


Рис.2. Электрическая схема аксиальной двухвходовой генераторной установки

АДГУ содержит (рис. 1): корпус 1, постоянный многополюсный магнит 2 индуктора подвозбудителя, магнитопровод 3 с обмоткой 4 якоря подвозбудителя, однофазной обмоткой 5 возбуждения возбудителя и дополнительной обмоткой 6 возбуждения возбудителя; внутренний аксиальный магнитопровод 7 с многофазной обмоткой 8 якоря возбудителя и однофазной обмоткой возбуждения 9 основного генератора, аксиальный магнитопровод 10 с многофазной обмоткой 11 якоря основного генератора, вал 12, закрепленный в подшипниковых узлах 13 и 14 и жестко связанный с постоянным многополюсным магнитом 2 индуктора подвозбудителя посредством диска 15 и с внутренним аксиальным магнитопроводом 7 посредством диска 16, девятифазных выпрямителей 17 и 18, контакты 19 для подключения внешнего источника постоянного тока (например, солнечной батареи) к дополнительной обмотке 6 возбуждения возбудителя. Однофазная обмотка 5 возбуждения возбудителя подключается к многофазной обмотке 4 якоря подвозбудителя через многофазный выпрямитель 17. Однофазная обмотка 9 возбуждения основного генератора подключена к многофазной обмотке 8 якоря возбудителя через многофазный выпрямитель 18.

АДГУ работает следующим образом. При вращении вала 12 внешним механизмом (например, ветротурбиной) вместе с валом 12 приводятся во вращение постоянный многополюсный магнит 2 индуктора подвозбудителя и магнитопровод 7 с обмотками 8, 9 и выпрямителем 18. Создаваемый постоянным многополюсным магнитом 2 магнитный поток взаимодействует с многофазной обмоткой 4 якоря подвозбудителя, уложенной в пазы магнитопровода 3 со стороны постоянного многополюсного магнита 2, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется девятифазным выпрямителем 17 и подается на однофазную обмотку 5 возбуждения возбудителя, уложенную в пазы внутреннего аксиального магнитопровода 3 со стороны магнитопровода 7. При этом в однофазной обмотке 5 возбуждения возбудителя создается магнитный поток.

При подаче постоянного тока (например, от фотоэлектрических преобразователей) через контакты 19 по дополнительной обмотке 6 возбуждения возбудителя протекает ток, при этом создается магнитный поток, направленный согласно с магнитным потоком, создаваемым однофазной обмоткой 5 возбуждения возбудителя. По принципу суперпозиции магнитных полей магнитные потоки, создаваемые обмоткой 5 и дополнительной обмоткой 6 возбуждения возбудителя, суммируются. Суммарный магнитный поток взаимодействует с многофазной обмоткой 8 якоря возбудителя, уложенной в пазы внутреннего аксиального магнитопровода 7, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется многофазным двухполупериодным выпрямителем 18 и подается на однофазную обмотку возбуждения 9 основного генератора, уложенную в пазы внутреннего аксиального магнитопровода 7. Магнитный поток однофазной обмотки возбуждения 9 основного генератора взаимодействует с многофазной обмоткой 11 якоря основного генератора, уложенной в пазы бокового аксиального магнитопровода 10, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая подается в сеть.

В целях подтверждения основных теоретических положений при разработке САДГУ были изготовлен натурная

модель мощностью 0,5 кВт на базе АДГУ и выполнен комплекс экспериментальных исследований.

Натурная модель (НМ) включает в себя установленные на одном валу аксиальную двухвходовую генераторную установку (АДГУ), синхронную машину, имитирующую синхронизатор, асинхронный электродвигатель, имитирующий ветроагрегат.

В связи со сложностью подачи механической энергии вращения от ветроагрегата при проведении экспериментальных исследований на вал натурной модели и подачи электрической энергии от фотоэлектрических панелей (ФЭП) при изменении освещенности на дополнительную обмотку 6 возбуждения возбудителя – в состав экспериментального комплекса включено следующее оборудование:

- регулируемый источник постоянного напряжения – имитатор ФЭП в составе разработанного электротехнического комплекса;

- преобразователь частоты – для питания и регулирования напряжения на входе асинхронного электродвигателя – имитатора ветроагрегата.

В задачу экспериментальных исследований входило:

- экспериментальное подтверждение работоспособности САДГУ;

- подтверждение возможности суммирования энергии разной природы в рамках одной энергоустановки;

- определение параметров выходного напряжения электротехнического комплекса;

- построение регулировочных характеристик САДГУ;

- определение соответствия характеристик, полученных путем математического моделирования, соответствующим характеристиками, полученным при проведении физического эксперимента;

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

Программа эксперимента включает в себя:

- разработку экспериментального стенда, позволяющего имитировать условия, близкие к реальным, и исследовать работу НМ САДГУ в этих условиях;

- получение экспериментальных зависимостей $U_{\text{вых}} = \varphi(U_{\text{фэп}})$ при $V_{\text{ветр}} = \text{var.}$ (где $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение НМ САДГУ, $U_{\text{фэп}}$ – напряжение на выходе ФЭП, $V_{\text{ветр}}$ – скорость ветра, пропорциональная частоте вращения вала ($n_{\text{вал}}$) НМ САДГУ);

- получение экспериментальных зависимостей $U_{\text{вых}} = \varphi(V_{\text{ветр}})$ при $U_{\text{фэп}} = \text{var.};$

- получение экспериментальных зависимостей $U_{\text{вых}} = \varphi(I_{\text{н}})$ при $U_{\text{фэп}} = \text{var.}$ (где $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки НМ САДГУ);

- получение экспериментальных зависимостей $f_{\text{вых}} = f(U_{\text{фэп}})$ при $V_{\text{ветр}} = \text{var.}$ (где $f_{\text{вых}}$ – частота выходного напряжения НМ САДГУ).

Испытание НМ САДГУ проводилось по методикам, изложенным в [4-14].

Определение мощности на входе НМ САДГУ выполнено методом определения мощности, потребляемой приводным асинхронным двигателем (АД) с учетом потерь в этом двигателе и электрической мощности, потребляемой дополнительной обмоткой возбуждения возбудителя от источника постоянного тока (ИПТ). Определение мощности на выходе НМ САДГУ выполнено также прямым методом:

Зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi(V_{\text{ветр}})$ при $U_{\text{фзп}} = \text{var.}$ приведены на рис. 5.

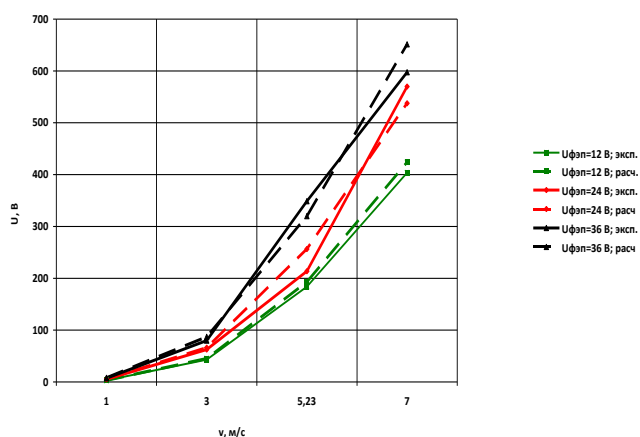


Рис. 5. Зависимость действующего значения установившегося выходного напряжения САДГУ от скорости ветра

На рис. 6 приведена внешняя характеристика $U_{\text{вых}} = \varphi(I_{\text{н}})$ при $U_{\text{фзп}} = \text{var.}$

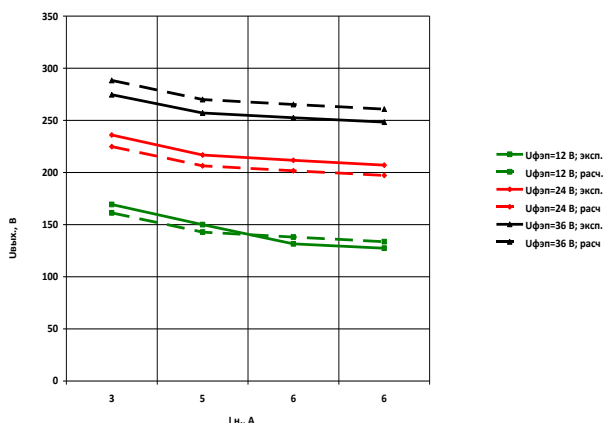


Рис. 6. Зависимость действующего значения установившегося напряжения выходного сигнала САДГУ от тока нагрузки

На рис. 7 приведена характеристика $f_{\text{вых}} = \varphi(U_{\text{фзп}})$ при $V_{\text{ветр}} = \text{var.}$

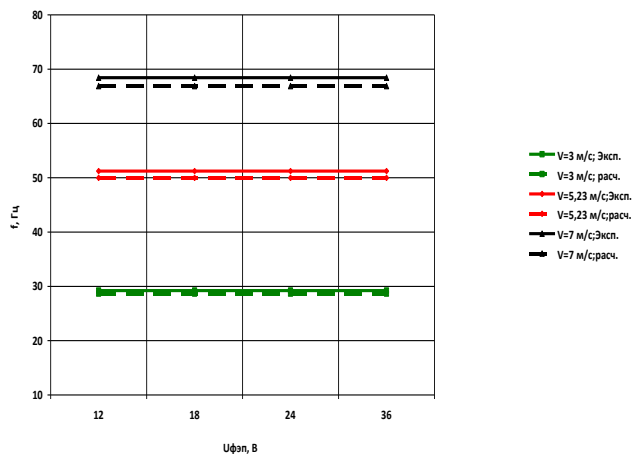


Рис. 7. Зависимость частоты выходного напряжения САДГУ от напряжения на выходе ФЭП

Анализ характеристик, приведенных на рис. 4-7 позволяет сделать заключение, что отклонение экспериментальных характеристик НМ САДГУ от расчетных САДГУ, полученных в процессе математического моделирования [15, 16], составляет не более 9,5%, что находится в пределах допустимых значений [17-20].

ВЫВОДЫ

Экспериментально подтверждена возможность построения на базе САДГУ электротехнического комплекса.

Экспериментально подтверждена возможность синхронизации выходных параметров САДГУ с внешней системой переменного тока присоединением к валу АДГУ дополнительной синхронной машины – установкой на валу АДГУ – синхронизатора.

Экспериментально исследованные и построенные характеристики НМ САДГУ подтверждают правильность теоретических положений, изложенных в [15, 16]. Полученные экспериментально характеристики близки к расчетным, погрешность при этом не превышает 9,5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Renewables 2018 Global Status Report. Режим доступа: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/> (дата обращения 20.11.18)
2. Кашин Я.М., Кашин А.Я., Копелевич Л.Е., Самородов А.В., Христофоров М.С. Синхронизированная аксиальная двухвходовая генераторная установка // Патент РФ на изобретение № 2647708. 2017. Бюл. № 8.
3. Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Кашин А.Я., Копелевич Л.Е., Самородов А.В. Аксиальный двухвходовый бесконтактный электрический ветро-солнечный генератор // Патент РФ на изобретение № 2561504. 2014 г. Бюл. № 24.
4. Котеленец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: учеб. для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов – М.: Академия, 2003. – 384 с.
5. ГОСТ Р 53472-2009. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.
6. ГОСТ Р МЭК 60034-4-2012. Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин.
7. ГОСТ Р 52776-2007 (МЭК 60034-1-2004). Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики.
8. ГОСТ 11828-86 Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний (с Изменениями N 1, 2).
9. ГОСТ 2582-2013 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия
10. Инкин А.И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин: учебное пособие. – Новосибирск: ООО «Издательство ЮКЕА», 2002. – 464 с.
11. Хайруллин И.Х. Анализ современных методов диагностики электромеханических преобразователей / И.Х. Хайруллин, Д.Ю. Пашали // Электромеханика,

электротехнические комплексы и системы: Сборник научных трудов – Уфа: УГАТУ, 2002. – 208 с.

12. Стрижков И.Г. Лабораторный практикум по электрическим машинам: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений по специальности «Электрификация и автоматизация с.х.» / И.Г. Стрижков, Е.Н. Чеснюк. – Краснодар: КубГАУ, 2006. – 296 с.

13. Ганджа С.А. Вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком. Анализ, синтез, внедрение в производство: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Челябинск, 2011. – 271 с.

14. Математические методы планирования эксперимента / под ред. В.В. Пененко. – Новосибирск: Наука, 1981. – 256 с.

15. Кашин Я.М. Promising converters of wind and solar energy into electric energy for electrotechnical complexes / Кашин Я.М., Самородов А.В., Ким В.А., Христофоров М.С. // AER-Advances in Engineering Research / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME), – 2018. – Т 157, – P. 255 – 261.

16. Копелевич Л.Е. Wind-solar generator / Л.Е. Копелевич, Б.Х. Гайтов, А.Я. Кашин, М.С. Христофоров, П.В. Серeda // AER-Advances in Engineering Research / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME). – 2017. – Т. 133, – С. 343-349.

17. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учебное пособие. – Москва: Высшая школа, 1982. – 272 с.

18. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов - 4е изд. перераб. и доп. / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.

19. Копылов И.П. Расчет на ЦВМ характеристик асинхронных машин / И.П. Копылов, О.П. Щедрин, – М.: Энергия, 1973, – 121 с.

20. Копылов И.П., Мамедов Ф.А., Беспалов В.Я. Математическое моделирование асинхронных машин / И.П. Копылов, Ф.А. Мамедов, В.Я. Беспалов. – М.: Энергия, 1969. – 95 с.

Experimental Determination of Characteristics of Synchronized Axial Two-input Generator

Gaitov B.K., Kashin Ya.M., Khristoforov M.S.

Kuban State Technological University
Krasnodar, Russia

kklev1@mail.ru, jlms@mail.ru, khristoforov87@mail.ru

Abstract. The article considers a synchronized axial two-input generator set designed for simultaneous energy conversion of two renewable energy sources (Sun and wind), shows the program of the experiment, describes the experimental stand, and demonstrates the results of the experiment. The objectives of the experiment were: confirmation of the possibility of building an electrical complex on the basis of a synchronized axial two-input generator set; confirmation of the possibility of stabilization of the output voltage to match the consumer properties of electricity ($U_l=380$ V, $f=50$ Hz); obtaining experimental characteristics and comparing them with the results of theoretical positions and mathematical

modeling. The work was performed within the framework of research conducted in the IN the state budgetary educational institution "Kuban state technological University" at the Department of electrical engineering and electrical machines on the topic of renewable energy sources under the leadership of Honored worker of science and technology of the Russian Federation Professor B.Kh. Gaytov.

Keywords: wind energy, solar energy, SADGU, two-way generator, experiment.

Обоснование сетевой электростанции на базе возобновляемых источников энергии на территории Алтайского края

Вольмер Е.А., Дерюгина Г.В., Пугачев Р.В.
ФГБОУ НИУ «Московский энергетический институт»
Москва, Россия
volmerya@mpei.ru

Аннотация. В статье проведен анализ топливно-энергетического комплекса Алтайского края, показана целесообразность строительства сетевых ВЭС и СЭС в данном регионе, приведены показатели энергетической и экономической эффективности ВЭС и СЭС в Алтайском крае.

Ключевые слова: энергия солнца, энергия ветра, возобновляемые источники энергии, энергоэффективность, солнечная электрическая станция, ветроэлектрическая станция.

ВВЕДЕНИЕ

Алтайский край является энергодефицитным регионом – 45,5% от всего потребления производится за его пределами. Наблюдается сильная зависимость края от ископаемого топлива, высокий уровень выбросов вредных веществ в окружающую среду [1]. Дефицит электроэнергии в регионе частично можно компенсировать за счет возобновляемой энергетики, в частности за счет использования энергии ветра и солнца. Требуется оценка возможности использования альтернативных источников энергии.

ВЫБОР ПЛОЩАДКИ РАЗМЕЩЕНИЯ

Для оценки перспективности строительства крупных ВЭС в данном регионе был проведен подробный расчет и анализ ветровых ресурсов по методике кафедры ГВИЭ [2] на всей территории Алтайского края по данным 25 наземных метеостанций с сайта «Погода России» [3], результаты показаны на рис. 1 и 2.

Выбранная площадка расположена у крупного озера и имеет достаточно большой свободный участок земли. В качестве метеостанции (МС) аналога для нее выбрана МС Славгород.

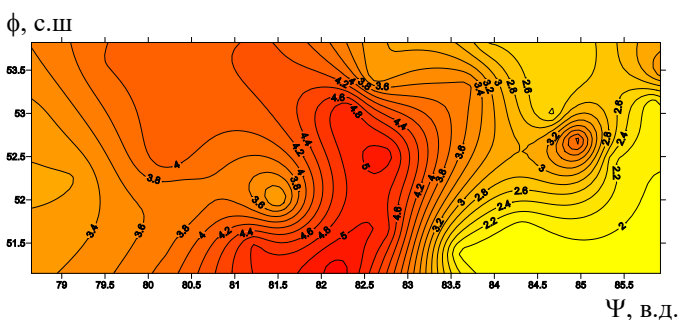


Рис.1 Карта распределения среднемноголетней скорости ветра на высоте 10 м по территории Алтайского края

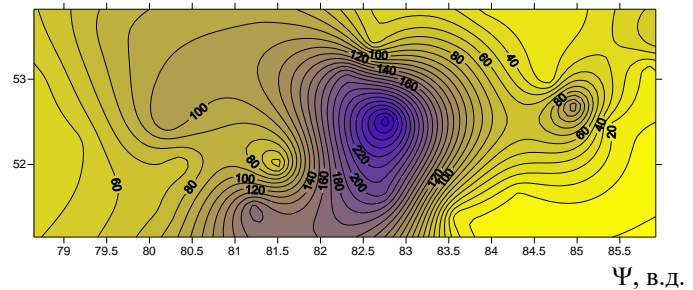


Рис. 2 Карта распределения удельной мощности на высоте 10 м по территории Алтайского края

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МНОГОЛЕТНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПЛОЩАДКИ ВБЛИЗИ Г. ЯРОВОЕ

Расчет основных энергетических характеристик солнечной энергии производился для выбранной площадки вблизи г. Яровое по данным трех баз данных (БД): БД НПС (АМС Благовещенка 52,9° с.ш., 79,7° в.д.), БД Meteororm (53° с.ш., 79° в.д.), БД NASA (52,5° с.ш., 78,5° в.д.) и сведен в таб. 1.

Сравнение данных по приходу солнечной радиации из трех БД производится по отклонениям от средних значений, полученным по данным трех БД (см. рис. 3). Для данных БД Meteororm наибольшие отклонения от средних значений наблюдаются в летние месяцы, особенно в июле, что приводит к увеличению суммарной осредненной солнечной радиации в этот месяц и, соответственно, к возникновению значительных отклонений данных из БД НПС и БД NASA, причем данные БД NASA занижены, а БД Meteororm завышены. Ближе всего к средним значениям лежат данные БД НПС по всем видам солнечной радиации.

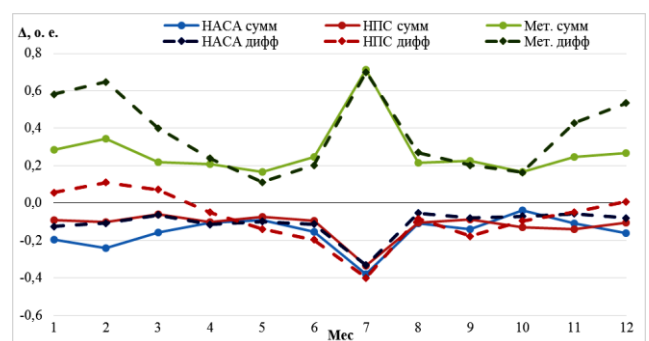


Рис. 3 Отклонение суммарной и диффузной солнечной радиации

Таблица 1

Суммарные, диффузные и прямые месячные данные солнечной радиации в кВт·ч/м² по трем базам данных

| Сумм. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Год |
|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|--------|
| НАСА | 29,1 | 50,7 | 102,0 | 144,3 | 181,7 | 189,0 | 184,8 | 157,8 | 107,4 | 66,0 | 35,4 | 23,9 | 1270,2 |
| НПС | 32,9 | 60,0 | 113,8 | 145,2 | 185,3 | 202,2 | 197,9 | 158,5 | 113,8 | 59,8 | 34,2 | 25,5 | 1329,1 |
| МЕТ | 46,5 | 89,8 | 147,6 | 194,8 | 233,2 | 278,3 | 509,2 | 215,6 | 153,2 | 80,0 | 49,4 | 36,1 | 2033,6 |
| Среднее | 36,2 | 66,8 | 121,1 | 161,4 | 200,1 | 223,1 | 297,3 | 177,3 | 124,8 | 68,6 | 39,6 | 28,5 | 1544,3 |
| Дифф. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Год |
| НАСА | 18,3 | 28,0 | 50,5 | 61,5 | 77,8 | 81,6 | 80,6 | 68,5 | 50,7 | 35,0 | 21,3 | 15,2 | 587,7 |
| НПС | 22,0 | 34,8 | 57,9 | 66,0 | 74,4 | 73,8 | 72,4 | 66,4 | 45,3 | 34,1 | 21,5 | 16,6 | 585,4 |
| МЕТ | 22,3 | 31,4 | 53,5 | 80,8 | 106,8 | 120,4 | 208,7 | 82,3 | 69,3 | 44,0 | 25,0 | 17,7 | 862,3 |
| Среднее | 20,9 | 31,4 | 54,0 | 69,4 | 86,3 | 92,0 | 120,6 | 72,4 | 55,1 | 37,7 | 22,6 | 16,5 | 678,5 |
| Прям. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Год |
| НАСА | 10,9 | 22,7 | 51,5 | 82,8 | 103,9 | 107,4 | 104,2 | 89,3 | 56,7 | 31,0 | 14,1 | 8,7 | 682,6 |
| НПС | 10,9 | 25,2 | 56,0 | 79,2 | 110,9 | 128,3 | 125,5 | 92,1 | 68,6 | 25,7 | 12,7 | 8,9 | 743,8 |
| МЕТ | 24,2 | 58,4 | 94,1 | 114,0 | 126,4 | 157,8 | 300,5 | 133,3 | 83,9 | 35,9 | 24,3 | 18,4 | 1171,3 |
| Среднее | 15,3 | 35,4 | 67,2 | 92,0 | 113,7 | 131,2 | 176,7 | 104,9 | 69,7 | 30,9 | 17,0 | 12,0 | 865,9 |

Сравнение осредненных по трем БД часовых значений суммарного прихода солнечной радиации на приемную площадку с часовыми значениями из рассматриваемых баз данных, выявило, что наименьшие отклонения имеют данные из БД Meteororm. Однако график, построенный по данным БД НПС, по форме более симметричен и имеет более равномерное суточное распределение СР, как показано на рисунке 4.

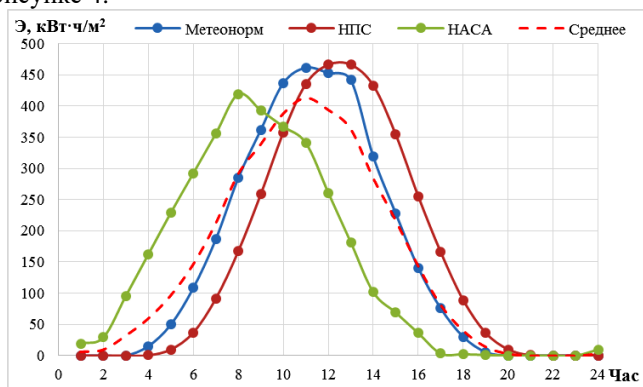


Рис. 4 Средние по месяцам часовые значения прихода суммарной СР

Таким образом, было принято решение в качестве основного информационного источника рассматривать БД НПС.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Определение оптимального угла наклона приемной

площадки проводилось по методу Лю и Джордана [4]. Результаты расчетов представлены в таблицах 2 и 3.

Оптимальный угол наклона приемной площадки: $\beta_{\text{опт}} = 41^\circ$, годовой суммарный приход СР на наклонную площадку для оптимального угла: $\Sigma^{\beta} = 1586,64$ кВт·ч/м² в год. По данным таблицы 5 видно, что в диапазоне от 35° до 44° годовой приход суммарной солнечной радиации меняется мало, наиболее оптимальным положением является наклон площадки на угол $\beta_{\text{опт}} = 41^\circ$, однако для простоты установки рекомендуется устанавливать фотоэлектрические модули под углом $\beta = 40^\circ$.

Выбор модели солнечного фотоэлектрического модуля (СФЭМ) производился среди 15-и предварительно отобранных вариантов СФЭМ на основе кремния номинальной мощности в диапазоне от 100 до 300 Вт (см. табл.5) по энергетическим и ценовым показателям: коэффициенту использования установленной мощности $K_{\text{иум}}$, удельной выработке СФЭМ $\Sigma_{\text{уд}}$ и удельной стоимости $\Pi_{\text{уд}}$. Расчет годовой выработки единичного СФЭМ производился без учета влияния температуры на КПД СФЭМ ($\Sigma_{\text{год}}^{\beta}$). КПД СФЭМ с учетом температуры определялся в соответствии с методикой [5].

Для дальнейшего сопоставления были оставлены два варианта СФЭМ: TopRaySolar 250П (TPS-P6U) (Китай) и FSM 260M (SunWays PV Systems) (Россия) (табл.4).

Для сравнения были выбраны сетевые инверторы GE 1 MW Brilliance* Solar Inverter, мощностью 1 МВт, производства General Electric и PVH-L2500GR, мощностью 2,5 МВт, производства Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corporation.

Таблица 2

Суммарный годовой приход солнечной радиации на наклонную приемную площадку

| β° | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Σ^{β} , кВт·ч/м ² в год | 1326,5 | 1433,4 | 1514,9 | 1566,6 | 1586,5 | 1572,0 | 1523,1 | 1440,9 | 1329,1 | 1189,2 |

Таблица 3

Нахождение оптимального угла наклона приемной площадки

| β° | 35° | 36° | 37° | 38° | 39° | 40° | 41° | 42° | 43° | 44° |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Σ^{β} , кВт·ч/м ² в год | 1580,5 | 1582,4 | 1583,9 | 1585,2 | 1586,0 | 1586,5 | 1586,6 | 1586,4 | 1585,8 | 1584,9 |

Выбор марки СФЭМ

| № | Название | Мат | Э _{год} ¹ кВт·ч/год | Э _{год} кВт·ч/год | К _{нум} ¹ о.е. | К _{нум} , о.е. | Δ, % | Э _{уд} кВт·ч/м ² | Ц _{уд} руб/Вт |
|----|------------------------|-----|--|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-------|---|---------------------------|
| 1 | FSM 100M | М | 99,43 | 100,17 | 0,114 | 0,114 | 0,741 | 153,48 | 82,50 |
| 2 | ХЕВЕЛ Р-СЕРИИ | А+П | 128,08 | 128,63 | 0,117 | 0,117 | 0,423 | 89,57 | 76,00 |
| 3 | FSM 150P | П | 148,41 | 149,60 | 0,121 | 0,122 | 0,795 | 155,40 | 67,40 |
| 4 | FSM 155M | М | 150,47 | 151,60 | 0,115 | 0,115 | 0,741 | 157,57 | 73,67 |
| 5 | FSM 200M | М | 190,82 | 192,24 | 0,109 | 0,110 | 0,741 | 149,47 | 76,12 |
| 6 | FSM 200P | П | 200,63 | 202,13 | 0,115 | 0,115 | 0,741 | 152,76 | 63,54 |
| 7 | FSM 260M | М | 261,07 | 263,07 | 0,119 | 0,120 | 0,761 | 160,47 | 74,90 |
| 8 | FSM 250P | П | 250,79 | 252,66 | 0,115 | 0,115 | 0,741 | 154,15 | 63,66 |
| 9 | TopRaySolar 250П | П | 259,49 | 261,43 | 0,118 | 0,119 | 0,741 | 159,50 | 60,39 |
| 10 | One-Sun 250M | М | 251,06 | 253,21 | 0,115 | 0,116 | 0,846 | 154,32 | 70,00 |
| 11 | TCM-250 А | П | 250,52 | 252,66 | 0,114 | 0,115 | 0,846 | 163,90 | 101,95 |
| 12 | JAP6 60 3ВВ 255 ПОЛИ | П | 253,91 | 256,07 | 0,114 | 0,115 | 0,846 | 156,23 | 62,35 |
| 13 | FSM 300P | П | 300,63 | 303,19 | 0,114 | 0,115 | 0,846 | 154,86 | 63,53 |
| 14 | АХИТЕС АС-300P/156-72S | П | 300,63 | 303,19 | 0,114 | 0,115 | 0,846 | 189,88 | 71,88 |
| 15 | FSM 310M | М | 309,32 | 311,96 | 0,114 | 0,115 | 0,846 | 159,33 | 74,50 |

Таблица 5
Выбор числа инверторов, требуемых для электро-
станции мощностью 3 МВт

| п, шт | TopRaySolar 250П | | FSM 260M | |
|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------|
| | EA-100KL-M/T GE 1 MW | PVH- L2500GR | EA-100KL-M/T GE 1 MW | PVH-L2500GR |
| п _{нармах} | 411,4 | 299,9 | 400,4 | 291,9 |
| п _{вхмах} | 4000 | 10000 | 4000 | 10000 |
| п _{мод в цепи} | 21 | 35 | 20 | 34 |
| п _р | 291 | 318 | 287 | 314 |
| п _{мод к инв} | 6111 | 11130 | 5740 | 10676 |
| п _{инв расч} | 1,96 | 1,08 | 2,09 | 1,12 |
| п _{инв} | 2 | 1 | 2 | 2 |

Окончательно для СЭС выбраны СФЭМ из поликристаллического кремния TopRaySolar 250П (TPS-P6U) китайского производства и инвертор PVH-L2500GR, мощностью 2,5 МВт, производства Toshiba Mitsubishi Electric Industrial Systems Corporation.

Для сравнения были выбраны сетевые инверторы GE 1

MW Brilliance* Solar Inverter, мощностью 1 МВт, производства General Electric и PVH-L2500GR, мощностью 2,5 МВт, производства Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corporation.

ВЫБОР МОДЕЛИ ВЭУ

Выбор модели ВЭУ производился на основе технико-экономического обоснования.

Выбор энергоэффективных моделей ВЭУ производился по критерию максимального значения коэффициента использования установленной мощности ВЭУ $K_{нум}$ из 12-ти предварительно отобранных моделей в соответствии с ГОСТ Р 51991-2002 и ГОСТ Р 54435- 2011 (см.табл.6-8). В качестве дополнительного критерия использовался показатель удельной энергии с единицы ометаемой площади $Э_{взу}^{уд}$ по ГОСТ Р 51991-2002. Годовая выработка единичных ВЭУ определялась по их паспортным энергетическим характеристикам по 6-ти часовому модельному ряду скорости ветра за 2003 год, выбранный в качестве расчетного. Моделирование ряда скорости ветра на высоту башен ВЭУ проводилось в соответствии с методикой кафедры ГВИЭ [2].

Таблица 6

Сравнение энергетических показателей ВЭУ с высотой башни 100-105 м

| Марка | H _б , м | D _{рк} , м | F, м ² | K _{нум} , о.е. | Э _{взу} ^{год} , ГВт·ч | Э _{взу} ^{уд} МВт·ч/м ² в год | h _{взу} ^{исп} , ч | Потери, % | K _{нум} , о.е. | Э _{взу} ^{год} пот, ГВт·ч в год | Э _{взу} ^{уд} МВт·ч/м ² в год | h _{взу} ^{исп} , ч |
|--------------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------------|---|---|-------------------------------------|-----------|-------------------------|--|---|-------------------------------------|
| HZ Windpower | 100 | 92,8 | 72,9 | 0,368 | 116,87 | 1604 | 3895,6 | 6,87 | 0,343 | 108,85 | 1494 | 3628,2 |
| Goldwind | 100 | 100 | 78,5 | 0,347 | 110,06 | 1402 | 3668,5 | 7,45 | 0,321 | 101,86 | 1298 | 3395,3 |
| W2E | 100 | 120 | 94,2 | 0,392 | 124,36 | 1320 | 4145,4 | 6,63 | 0,366 | 116,11 | 1233 | 3870,4 |
| Siemens | 99,5 | 113 | 88,7 | 0,435 | 148,17 | 1670 | 4601,5 | 6,05 | 0,408 | 139,20 | 1569 | 4323,1 |
| AVIC Huide | 100 | 93,2 | 73,2 | 0,347 | 110,09 | 1505 | 3669,7 | 6,99 | 0,322 | 102,40 | 1400 | 3413,3 |
| Eviag | 100 | 100 | 78,5 | 0,365 | 115,84 | 1476 | 3861,4 | 6,79 | 0,340 | 107,98 | 1376 | 3599,3 |
| Kenersys | 100 | 100 | 78,5 | 0,356 | 113,10 | 1441 | 3770,1 | 6,99 | 0,331 | 105,19 | 1340 | 3506,4 |
| Vestas | 105 | 100 | 78,5 | 0,328 | 104,12 | 1326 | 3470,7 | 7,35 | 0,304 | 96,47 | 1229 | 3215,5 |

Таблица 7

Сравнение энергетических показателей ВЭУ с высотой башни 90-98 м

| Марка | H _б , м | D _{рк} , м | F, м ² | K _{нум} , о.е. | ЭВЭУ ^{год} , ГВт·ч | ЭВЭУ ^{уд} МВт·ч/м ² в год | h _{вэу, исп} , ч | Потери, % | K _{нум} , о.е. | ЭВЭУ ^{год} пот, ГВт·ч в год | ЭВЭУ ^{уд} МВт·ч/м ² в год | h _{вэу, исп} , ч |
|---------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------|---|---------------------------|-----------|-------------------------|--------------------------------------|---|---------------------------|
| Enercon | 98 | 82 | 64,37 | 0,271 | 86,15 | 1338 | 2871,6 | 8,68 | 0,248 | 78,67 | 1222 | 2622,3 |
| Vestas | 95 | 100 | 78,50 | 0,377 | 119,72 | 1525 | 3990,8 | 6,73 | 0,352 | 111,66 | 1422 | 3722,2 |
| Vestas | 90 | 90 | 70,65 | 0,312 | 98,98 | 1401 | 3299,4 | 7,50 | 0,288 | 91,56 | 1296 | 3051,9 |

Таблица 8

Сравнение энергетических показателей ВЭУ с высотой башни 80-85 м

| Марка | H _б , м | D _{рк} , м | F, м ² | K _{нум} , о.е. | ЭВЭУ ^{год} , ГВт·ч | ЭВЭУ ^{уд} МВт·ч/м ² в год | h _{вэу, исп} , ч | Потери, % | K _{нум} , о.е. | ЭВЭУ ^{год} пот, ГВт·ч в год | ЭВЭУ ^{уд} МВт·ч/м ² в год | h _{вэу, исп} , ч |
|--------------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------|---|---------------------------|-----------|-------------------------|--------------------------------------|---|---------------------------|
| AVIC Huide | 85 | 93,2 | 73,2 | 0,328 | 104,27 | 1425 | 3475,8 | 7,21 | 0,305 | 96,76 | 1323 | 3225,2 |
| HZ Windpower | 80 | 82,4 | 64,7 | 0,307 | 97,47 | 1507 | 3248,9 | 7,55 | 0,284 | 90,10 | 1393 | 3003,5 |
| Enercon | 85 | 82 | 64,4 | 0,254 | 80,68 | 1253 | 2689,2 | 9,07 | 0,231 | 73,36 | 1140 | 2445,3 |
| Eviag | 85 | 100 | 78,5 | 0,346 | 109,84 | 1399 | 3661,4 | 7,00 | 0,322 | 102,16 | 1301 | 3405,3 |
| Vestas | 84 | 112 | 87,9 | 0,349 | 110,81 | 1260 | 3693,5 | 7,01 | 0,325 | 103,04 | 1172 | 3434,6 |
| Vestas | 80 | 100 | 78,5 | 0,360 | 114,23 | 1455 | 3807,6 | 6,87 | 0,335 | 106,39 | 1355 | 3546,2 |
| Vestas | 80 | 90 | 70,7 | 0,299 | 94,95 | 1344 | 3165,0 | 7,67 | 0,276 | 87,66 | 1241 | 2922,1 |
| Kenersys | 85 | 100 | 78,5 | 0,338 | 107,22 | 1366 | 3574,2 | 7,14 | 0,314 | 99,57 | 1268 | 3318,9 |

Окончательный выбор модели ВЭУ производится по экономическим критериям: максимальному индексу доходности ИД и минимальному сроку окупаемости (см. табл. 11 и рис. 6).

Таблица 9

Сравнение экономических показателей вариантов ВЭУ

| Марка | ППЭ, млн. руб/год | ЧДД, млн. руб/год | ΣЧДД ^{инфл} , млн. руб/год | T _{ок} , год | ИД, о.е. |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------|
| W2E-120/3fc | 3426 | 347 | 490 | 11,46 | 1,23 |
| SWT-2.3-113 | 4034 | 345 | 516 | 12,45 | 1,184 |
| V112/3000 (95 м) | 3213 | 267 | 404 | 12,6 | 1,177 |
| V112/3000 (84 м) | 2826 | 135 | 260 | 15,17 | 1,091 |
| V100/2000 | 2551 | -167 | -40 | 27,6 | 1,435 |

Вывод: Модель V100/2000 экономически неэффективна. В качестве наиболее экономически эффективной модели ВЭУ для дальнейших исследований выбран вариант ВЭУ W2E 120/3fc производства W2E (Китай).

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЭС И ВЭС НА ТЕРРИТОРИИ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

Сравнение экономической и энергетической эффективности интеграции сетевых ВЭС и СЭС в ТЭК Алтайского края проводится по следующим показателям: занимаемой площади F, м²; годовой выработке электроэнергии Э_{год}, МВт·ч; удельной энергии Э_{уд}, МВт·ч/м²; капиталовложениям в строительство электростанции K, млн. руб.; удельной стоимости производимой электроэнергии Ц_{э^{уд}} (руб/кВт·ч) по формуле: $Ц_{э^{уд}} = K / Э_{год}$.

В таблице 10 приводятся показатели энергетической и экономической эффективности интегрируемых СЭС и ВЭС мощностью 15 МВт. В расчетах принимались: среднее значение кадастровой стоимости земли 1433900,303 руб.;

средний удельный показатель кадастровой стоимости 1,978 руб/м² [7]; расстояние между ВЭУ равным 6·D; расстояние между рядами СФЭУ 9,6 м.

Таблица 10

Показатели энергетической и экономической эффективности интегрируемых СЭС и ВЭС мощностью 15 МВт в ТЭК Алтайского края

| Параметр | ВЭС | СЭС |
|--|------------|--------------|
| F, м ² | 2244737,85 | 1170,77 |
| Э _{год} , ГВт·ч в год | 58,055 | 15,78042 |
| Э _{уд} , кВт·ч/м ² | 25,86 | 13478,66 |
| Ц _{всн} , млн. руб. | 753,75 | 905,82 |
| Ц _{всн} , млн. руб. | 753,75 | 462,5+226,46 |
| K, млн. руб. | 1511,94 | 1594,777 |
| Ц _{э^{уд}} руб/кВт·ч | 26,04 | 101,061 |

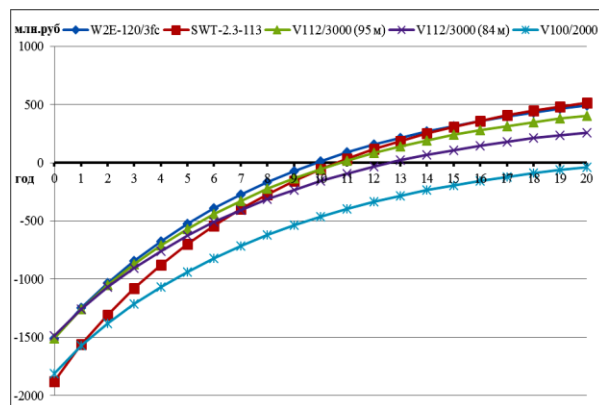


Рис. 5 Чистый дисконтированный доход рассматриваемых ВЭУ с учетом инфляции

ВЫВОДЫ

По экономическим и энергетическим показателям эффективности на территории Алтайского края наиболее целесообразно сооружение ВЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://altai.regnews.org/doc/nq/ee-3.htm> (дата обращения 01.09.2018)
2. Васьков А.Г. Ветроэнергетика: учеб. пособие для вузов / А.Г. Васьков, Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин – М.: Издательство МЭИ, 2016.

3. <http://www.info.space.ru> (дата обращения 01.09.2018)
4. Виссарионов В.И. Солнечная энергетика: учеб. пособие для вузов/ В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин. – М.: Издательство МЭИ, 2008.
5. Diaf S. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system/ S.Diaf, D. Diaf, M.Belhamel. // Energy Policy, Elsevier, 2007. – №35, – P. 5708-5718.
6. <http://solarcrown.ru/magazin2/folder/630587421>(дата обращения 01.09.2018).
7. http://www.altaregion-im.ru/zemlya/kadastr/documents/post_145.html (дата обращения 01.09.2018).

Rationale for the Efficiency of the On-grid Power Plant Based on Renewable Energy Sources in the Territory of the Altai Krai

Volmer E.A., Deryugina G.V., Pugachev R.V.

MPEI

Moscow, Russia
volmerya@mpei.ru

Abstract. This article analyzes the fuel and energy complex of the Altai Krai, shows the expediency of building on-grid wind and solar plants in the region, the indexes of energy and economic efficiency of WPP and SPP in the Altai Krai are given.

Keywords: solar energy, wind energy, renewable energy, energy efficiency, solar power plant, wind power plant.

Модель индукционного нагревателя на постоянных магнитах, использующего энергию ветра

Григораш О.В., Кириченко А.С., Пигарев К.В.
Кубанский государственный аграрный университет
Краснодар, Россия
energyksau@mail.ru

Аннотация. Выполняется моделирование и численный анализ ветрогенератора на постоянных магнитах. Рассмотрены пути решения проблемы энергоснабжения тепловой энергией децентрализованных потребителей АПК. Разработаны рекомендации по разработке ветроэнергетической индукционной тепловой энергетической системы на постоянных магнитах и показано описание конструкции ветроэнергетической индукционной тепловой энергетической системы на постоянных магнитах. Приводятся результаты моделирования ветроэнергетической индукционной тепловой энергетической системы на постоянных магнитах.

Ключевые слова: индукционные, вихревые токи, отопление, энергия ветра, возобновляемые источники энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Использование индукционных нагревателей с катушками индуктивности является распространенным и имеет большое количество исследований в отличие от индуктивных нагревателей на постоянных магнитах. Это во многом связано с тем, что производство, передача и использование электрической энергии получили большее распространение, чем механическая. Однако, некоторые установки нетрадиционной и возобновляемой энергетики производят механическую энергию, а потребителям необходима тепловая, в таком случае возможно использование индукционного нагревателя на постоянных магнитах.

Одним из видов ВИЭ, производящим механическую энергию, является ветер. Ветроэнергетические установки широко используются во всем мире, на сегодняшний день общая установленная мощность ветрогенераторов превышает 530 ГВт, что составляет более 5% от общего количества генерируемой энергии [1].

Из-за дефицита Кубанской энергосистемы, а также в связи с повышением доли генерации тепловых электрических станций, ввод экологически чистых и использующих возобновляемые природные ресурсы ветроэлектрических станций является чрезвычайно актуальным. Имеющиеся в Краснодарском крае развитая инфраструктура и дорожно-транспортная структуры позволяют

без лишних затрат доставлять необходимое оборудование для сооружения ветроэнергетических станций.

В настоящее время на территории Краснодарского края эксплуатируется более 50 ветроустановок общей установленной мощностью около 250 кВт, а в ближайшие годы планируется построить и ввести в эксплуатацию оборудование общей мощностью более 450 кВт (рисунок. 1).



Рис.1. Проектируемые ветроэнергетические парки Краснодарского края: 1 – «Ейск», 2 – «Камышевский», 3 – «Приморско-Ахтарск», 4 – «Темрюк», 5 – «Анапа»

При этом следует отметить, что большая часть энергии, вырабатываемой энергостанциями Краснодарского края, расходуется на обеспечение агропромышленного комплекса.

Типовой сельскохозяйственный потребитель представляет собой совокупность расположенных на большой территории потребителей малой мощности, удаленных от централизованных сетей тепло- и электроснабжения. При этом, если вопрос электроснабжения может быть решен прокладыванием многокилометровых линий электропередачи, то теплоснабжение может быть решено только за счет автономных источников. При этом чаще всего используются угольные или дизельные котельные. Иногда в качестве топлива могут использоваться отходы сельскохозяйственного производства или биогаз, однако, такое топливо доступно не во всех хозяйствах.

Так, например, на Таманском полуострове, значительные сельскохозяйственные площади занимают виноградники и бахчевые культуры, а на черноморском побережье чайные плантации, отходы от которых не могут использоваться в энергетических целях, при этом потребление тепловой энергии на производство вина и чая требует значительного количества тепловой энергии. Помимо этого, в крае активно используется метод выращивания с/х животных на вольном выпасе, что не позволяет использовать биогазовые установки.

Использование энергии ветра для получения тепла является актуальной задачей энергоснабжения потребителей агропромышленного комплекса Краснодарского края.

К сожалению, из-за своей малой распространенности тепловые ветроэнергетические установки не получили широкого научного обоснования, большая часть имеющихся разработок имеет только эмпирическое выражение, поэтому построенные модели и составление рекомендаций по проектированию могут иметь большое значение.

Целью данной статьи является подготовка рекомендаций по проектированию тепловых ветроэнергетических индукционных нагревателей на постоянных магнитах. Для достижения поставленной цели были выработаны и решены следующие задачи. Во-первых, провести обзор существующих конструкций и методов расчета тепловых ветроэнергетических индукционных установок на постоянных магнитах. Во-вторых, предложить собственную конструкцию. В-третьих, провести расчет предложенной конструкции и, в-четвертых, разработать рекомендации по проектированию.

ПРАКТИЧЕСКАЯ СТОРОНА ВОПРОСА

На сегодняшний день предложено несколько принципиально отличающихся конструкций индукционных теплогенераторов на постоянных магнитах (рис. 2-4).

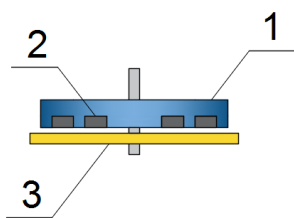


Рис. 2. Плоский индуктивный нагреватель на постоянных магнитах: 1 – вращающийся диск, 2 – постоянные магниты, 3 – теплоприемник

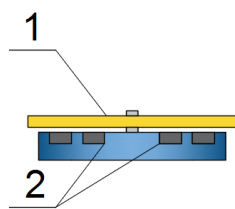


Рис. 3. Плоский индуктивный нагреватель на постоянных магнитах: 1 – вращающийся теплоприемник, 2 – постоянные магниты

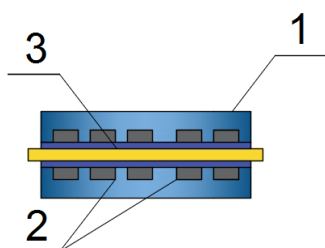


Рис. 4. Цилиндрический индуктивный нагреватель на постоянных магнитах: 1 – вращающаяся трубка, 2 – постоянные магниты, 3 – теплоприемник

Первый из них использует вращающийся диск с постоянными магнитами. Такая конструкция рассмотрена в [10.11.12], преимуществами такой конструкции является

высокая инерционность, стабильность, простота изготовления и монтажа. Недостатки: высокая материалоемкость, большой вес конструкции.

Вторая схема подразумевает вращение теплоприемника в поле постоянных магнитов [13.14]. Особенностью данной установки является сложный процесс теплопередачи от нагреваемого тела потребителю. Подобные установки могут быть использованы в тех случаях, когда вращающееся тело само является потребителем теплоты.

Третий вид установок используется для нагрева прямых трубопроводов с теплоносителем, и используют вращающуюся вокруг трубопровода муфту с постоянными магнитами [15].

Проведение математического моделирования и теоретического исследования подобных установок невозможно без компьютерного расчета, так как входящие в состав математических моделей уравнения имеют сложные функции, вычисление которых требует больших затрат ресурсов.

Решение подобных задач может быть осуществлено с помощью построения математической модели с последующим расчетом на компьютере в Excel, Mathcad и т.д. [16.17.18].

Или выполняться в специализированных программах, таких как Comsol, Matlab Simulink, Elcat и др. [19,20]

Или написанных самими авторами программ [21].

Для наших целей был выбран первый вариант конструкции индуктивного нагревателя на постоянных магнитах и программа Comsol.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Типовой автономный сельскохозяйственный потребитель тепловой энергии, такой как ферма КРС на 200-500 голов, требует около 50 кВт установленной мощности в летний период и до 500 кВт – в зимний. Такое неравномерное в течение года количество энергии не может быть обеспечено за счет энергии солнца, как популярного в Краснодарском крае вида ВИЭ, при этом может быть обеспечено за счет использования энергии ветра, так как в крае наблюдается сезонное увеличение скорости ветра в холодный период года. При этом, для обеспечения тепловой энергией могут быть использованы ветроэнергетические установки малой мощности.

В категорию ВЭУ малой мощности, согласно стандарту МЭК (IEC) 61400-2, попадают ВЭУ, имеющие ометаемую площадь ротора менее 200 м², что соответствует номинальной мощности около 50 кВт при напряжении ниже 1 000 В переменного тока или 1 500 В постоянного тока. В дополнение к этому стандарту несколько стран разработали свое собственное определение ВЭУ малой мощности, где значение максимальной мощности колеблется от 10 кВт до 100 кВт.

Выбор ориентации оси вращения для ветрогенераторов малой мощности, предназначенных для выработки тепловой энергии, преимущественно падает на вертикально-осевые, так как они, в отличие от ветрогенераторов с горизонтальной осью вращения, больше подходят по ряду признаков.

Для ВЭУ с горизонтальной осью вращения, как отмечается во многих публикациях [10-15], основными недостатками конструкции являются: большая длина лопастей;

необходимость принудительной раскрутки ротора при возникновении ветра; необходимость применения аэродинамического торможения при сильном ветре; работа конструкции в условиях циклической знакопеременной нагрузки; низкие резонансные частоты конструкции; более высокие эксплуатационные расходы, большой вес оборудования для выработки тепла не позволяет размещать его на мачте, и требуется использование длинного вращающегося вала для передачи механической энергии.

Благодаря аэродинамическим свойствам, ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения не производит инфразвуковых колебаний и не создает шума.

Поскольку у вертикально-осевых ВЭУ ротор вращается с гораздо меньшей скоростью, то вероятность травматизма птиц снижается почти до нуля. Это подтверждается тем, что отсутствуют зарегистрированные случаи гибели птиц от столкновения с вертикально-осевыми ВЭУ. А сами ветрогенераторы могут быть расположены на незначительном расстоянии от зданий ферм, расстояние будет зависеть преимущественно от вызываемых строениями затенений, а не от расстояния разлета лопастей в случае аварии ветроустановки.

Лопастей для горизонтально-осевых ВЭУ (ГОВЭУ), как правило, изготавливаются вручную, что приводит к увеличению стоимости конечного изделия. В отличие от горизонтально-осевых ВЭУ, лопасти вертикально-осевых конструкций имеют неизменный по размеру профиля лопасти. Это значит, что процесс изготовления можно автоматизировать, при этом для формования профиля потребуется минимальное количество пресс-форм.

КОНСТРУКЦИЯ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ ВЕТРОУСТАНОВКИ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

Предлагаемая установка представлена на рисунке 5 и состоит из ротора с вертикальной осью вращения, нижний конец оси через редуктор подсоединен к ротору с расположенными на нем магнитами постоянного тока. Под вращающимся ротором расположен медный змеевик с теплоносителем. Змеевик имеет тепловую изоляцию из минеральной ваты в нижней части по периметру. Для увеличения стабильности работы ротор выполнен утяжеленным, так чтобы выступать в роли маховика.

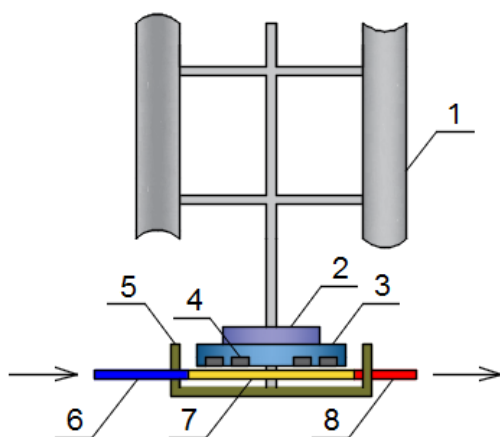


Рис. 5. Тепловая ветроэнергетическая установка: 1 – ветроколесо, 2 – редуктор, 3 – утяжеленный диск, 4 – постоянные магниты, 5 – корпус с тепловой изоляцией, 6 – вход холодной воды, 7 – змеевик, 8 – выход горячей воды

Такая конструкция позволяет поддерживать постоянную скорость вращения ротора, что важно для поддержания температуры внутри нагревательной установки ниже точки Кюри (у неодимовых магнитов порядка 200-300оС), препятствующей размагничиванию постоянных магнитов.

ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Работа теплового ветрогенератора основана на сложном взаимодействии между механическими, электромагнитными и тепловыми явлениями.

Так постоянные магниты, закрепленные на вращающемся роторе, генерируют в трубке-змеевике вихревые токи, что вызывает нагрев трубки за счет эффекта Джоуля. Нагрев трубок приводит к изменению удельного сопротивления материала, так как он изменяется с температурой. Изменение удельного сопротивления изменяет амплитуду индуцированных токов. Однако повышение температуры трубки ограничено, поскольку в ней находится охлаждающий ее теплоноситель.

Вихревые токи, индуцированные в трубке, создают тормозной момент, уменьшая скорость ветровой турбины, изменяя в том же время индуктивность, индуцированную мощность и тепловое поле.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что углубленное численное моделирование выработки тепловой энергии ветротурбиной - сложная задача, которая предполагает связанный анализ переходных электромагнитных, переходных термических и переходных механических явлений.

Принимая во внимание, что тепловые, механические и электромагнитные постоянные времени очень разные (минуты, секунды и миллисекунды соответственно), связанный анализ системы потребует огромного времени и ресурсов для вычислений, поэтому необходимо ввести некоторые упрощения: свойства материала для анализа электромагнитного поля считаются постоянными, индуцированная мощность вычисляется один раз для всего диапазона температур и используется впоследствии для анализа теплопередачи; свойства окружающего воздуха считаются постоянными; вязкостью воздуха в прослойке между ротором и змеевиком пренебрегают; лучистым теплообменом через ограждающие конструкции и с поверхности ротора пренебрегают.

При расчете принимаем, что ротор и тепловая трубка окружены воздухом с минимальной электромагнитной проводимостью (1С/м), а граница воздушной области считается бесконечной.

Расчет характеристик теплогенератора проводят для стандартных условий, принятых по ГОСТ 2939-63 (температура 20°С, давление 760 мм рт. ст.), температура холодного теплоносителя 10 °С.

Свойства материала, учитываемые для анализа FE, следующие: электросопротивление стали (используется для стенки статора и сердечника ротора) $\rho_s = 1,6 \cdot 10^{-7}$ мкм, плотность потока насыщения стали $B_s = 1,9$ Тл, начальная относительная магнитная проницаемость стали $\mu_s = 500$,

постоянный магнит типа магнитоласт Nd-Fe-B со следующими техническими характеристиками [5]: $\mu_0 M_{ra} = 0.52 Tл$; $M_{r\beta} = 0$; $K_a = 0.1074$; $K_\beta = K_a / 50 = 0.0021 Tл$, удельное сопротивление меди $\rho_{со} = 1,88 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

При проектировании теплового расчета принимаем теплоизоляции на нижней и боковой стенках, теплоотдача с верхней границы трубки постоянна и составляет 5 Вт/м² на внутренней стенке меди, теплопередача осуществляется за счет вынужденной конвекции из-за воды, протекающей через медный змеевик. Значения теплопроводности, используемые для моделирования, составляют 390 Вт /мК для меди, 54 Вт /мК для стали, 8 Вт / мК для постоянных магнитов и 3 Вт / мК для воздушного зазора [20].

ГЕОМЕТРИЯ ВЕТРОКОЛЕСА

Для предварительного расчета размеров ветроколеса примем ветроколесо Н-образной конструкции с вертикальной осью вращения, КПД ветротурбины $\eta = 90\%$, коэффициент использования ветра для данной конструкции $C_p = 0,3$, рабочая скорость ветра $V = 10$ м/с

Мощность, вырабатываемая ветрогенератором

$$P_w = \frac{\rho A V_0^3}{2} C_p \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, A – ометаемая площадь ветроколеса, V_0 – скорость набегающего потока, C_p – коэффициент использования ветра.

Ометаемая площадь вертикально-осевого Н-образного ветроколеса

$$A = 2RH \quad (2)$$

где R – радиус ветроколеса, H – длина лопасти.

Исходя из того, что радиус ветроколеса связан с быстротходностью ветроколеса Z :

$$Z = \frac{\omega R}{V_0} \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi \frac{n}{60}$ – угловая скорость турбины, n – частота вращения ветроколеса.

Для ветроколеса данной конструкции $Z=2$.

Таким образом, для дальнейших расчетов выберем ветрогенератор мощностью 10 кВт и с радиусом ветроколеса 3,6 м и длиной лопасти 13,5 м.

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЧАСТИ

В настоящее время не существует готовой математической модели, которая бы описывала работу индукционного нагревателя на постоянных магнитах использующего энергию ветра. Существуют аналитические формулы, приведенные в [40-42], но они не учитывают все сложные аспекты, такие как форма трубки змеевика, ее толщина, влияние массы ротора и т. д. Таким образом, расчет конструкции нагревателя будет в значительной степени основываться на методе конечных элементов (FEM), который является одним из самых универсальных численных методов, предназначенный для решения дифференциальных уравнений. Исследование модели проводится с использованием профессионального пакета программного обеспечения COMSOL Multiphysics 5.3a.

Магнитное поле, формируемое вращающимся ротором с закрепленными на нем магнитами, действует по двум осям: α – легкой и перпендикулярной ей оси β – трудного намагничивания и описывается уравнением [50]:

$$B_x = \mu_0 \left[M_{ra(\beta)} + (1 + K_{\alpha(\beta)}) H_{\alpha(\beta)} \right], \quad (4)$$

где $M_{ra(\beta)}$, $K_{\alpha(\beta)}$ – остаточная намагниченность и восприимчивость по указанным осям.

В рамках теоретической физики, исходя из общего признания вихревой природы токов Фуко, а значит, и вихревого характера электрического поля [7], их описание основывается на индукционной паре уравнений Максвелла [4]:

$$\begin{aligned} \text{rot} E &= -\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t}, \quad \text{div} E = 0, \\ \text{rot} H &= \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} j, \quad \text{div} D = 4\pi \rho. \end{aligned} \quad (5)$$

В предположении равенства нулю плотности ρ свободных зарядов в проводнике и стандартной связи между плотностью тока и напряженностью поля

$$j = \sigma E, \quad (6)$$

получают уравнение для напряженности магнитного поля, описывающего токи Фуко, как и скин-эффект:

$$\nabla^2 H = \frac{4\pi\sigma\mu}{c^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (7)$$

Формула для вычисления глубины скин-слоя в мм:

$$\Delta = 10^3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu\mu_0\pi f}}, \quad (8)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная Гн/м, ρ — удельное электрическое сопротивление материала, Ом·м, f — частота электромагнитного поля, Гц.

При этом сила вихревого тока по закону Ома равна

$$I_{\text{вихр}} = \frac{emf}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi_m}{dt}, \quad (9)$$

где Φ_m – магнитный поток, сцепленный с контуром тока, R – сопротивление цепи вихревого тока [8].

Для приведения анализа были выбраны 3 размера маховика ($D=2$ м, 5 м, 10 м), толщина маховика $h = 0,2$ м, диаметр магнитов $d = 0.1$ м.

Для нашей установки выбираем диаметр ветроколеса 5 м, на котором закреплено 50 постоянных магнитов.

РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Важной частью является расчет характеристики крутящего момента для ветрового индукционного нагревателя на постоянных магнитах, поскольку она представляет крутящий момент нагрузки ветровой турбины.

В [41] приводятся график и сведения, что кривая крутящего момента аппроксимируется полиномиальной функцией второго порядка:

$$T_L(n) = -0,0003n^2 + 0,3588n = 0 \quad (10)$$

Дифференциальным уравнением, управляющим работой ветровой системы, является следующее:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_{\text{вт}} - T_L - F\Omega, \quad (11)$$

где $J = 20 \text{ кгм}^2$ - момент инерции движущихся частей, $T_{\text{вт}}$ - крутящий момент ветровой турбины, T_L - крутящий момент нагрузки (тормозной момент, создаваемый РМЕСН) F - коэффициент вязкого трения $F = 0,01 \text{ Нм} / (\text{рад} / \text{с})$.

Режимы электромагнитного перехода между двумя значениями скорости из-за вихревых токов, индуцированных в стенке нагревателя игнорируются, поскольку изменение скорости турбины является равномерным из-за относительно большого момента инерции и, следовательно, постоянные электромагнитного времени намного меньше механических.

Скорость ветроколеса в рабочем режиме равна скорости вращения маховика, таким образом выходная мощность установки соответствует профилю скорости ветра с определенной задержкой из-за относительно важного момента инерции системы. Таким образом, разработанная динамическая модель ветровой системы, успешно используется для оценки производительности и поведения индукционного нагревателя на постоянных магнитах, приводимого в действие энергией ветра.

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЧАСТИ

Тепловой расчет ветроэнергетической тепловой индукционной установки на постоянных магнитах проводится для того, что бы определить скорость теплоносителя, при котором температура постоянных магнитов не увеличивается выше критического значения точки Кюри, которое может повлечь за собой их необратимое размагничивание. Анализ теплоотдачи основан на дифференциальном уравнении Фурье с частными производными в стационарном состоянии [15]:

$$\nabla(k\nabla T) + p_j = 0 \quad (12)$$

где T - температура, k - теплопроводность, p_j - индуцированная плотность мощности, которая считалась равномерно распределенной в областях вихревых токов, ее значение взято из электромагнитного анализа.

Скорость потока воды зависит от температуры стенки и величины коэффициента теплопередачи при принудительной конвекции (принята в диапазоне $100 \div 1500 \text{ Вт} / \text{м}^2\text{К}$ в зависимости от режима течения жидкости).

График зависимости представлен на рисунке 10, и показывает, что температурное поле сильно зависит от расхода теплоносителя. Эта информация очень важна, поскольку это означает, что при регулировании расхода воды температура постоянных магнитов может поддерживаться ниже требуемого предела.

При анализе результатов можно также отметить, что для того, чтобы поддерживать постоянные магниты в области низких температур (ниже 100°C), коэффициент теплопередачи конвекции должен быть выше $1100 \text{ Вт} / \text{м}^2\text{К}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, оптимальная конструкция индукционного нагревателя на постоянных магнитах имеет следующие параметры:

Геометрические размеры ветроколеса мощностью 10 кВт - радиус ветроколеса $3,6 \text{ м}$, длина лопасти $13,5 \text{ м}$, скорость вращения ветроколеса 160 об/мин . Геометрические размеры ротора - диаметр $D = 5 \text{ м}$, толщина $h = 0,2 \text{ м}$, диаметр магнитов $d = 0,1 \text{ м}$, количество магнитов - 50 , скорость

вращения ротора 160 об/мин , длина трубки 15 м , сечение трубки $d_1 = 50 \text{ мм}$, толщина стенки $b = 10 \text{ мм}$, скорость течения теплоносителя 40 л/мин .

Использование энергии ветра для теплоснабжения сельскохозяйственных потребителей позволит в существенной степени сократить расходы традиционного топлива и снизить выбросы парниковых газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Правительства РФ от 17.10.2009 г. № 823 «О схемах и программах перспективного развития электроэнергетики» // Собрание законодательства РФ, 26.10.2009, – № 43, – 5073 с.
2. Ермоленко Г.В. Проект строительства ветроэлектростанции установленной мощностью 60 МВт на территории п. Мирный Ейского района Краснодарского края. // Возобновляемые источники энергии: курс лекций. – М.: Университетская книга, 2012 – Выпуск 7. – С. 186 – 212.
3. Wind in power 2017: Annual combined onshore and offshore wind energy statistics <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2017>.
4. Фортов В.Е. Состояние развития возобновляемых источников в мире и в России. / В.Е. Фортов, О.С. Попель // Теплоэнергетика, –2014. – №6. – С. 4.
5. G. Eason B. Noble and I. N. Sneddon. On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions. Phil. Trans. Roy. Soc. London, April 1955. – vol. A247, –P. 529–551.
6. Григораш О.В. Нетрадиционные автономные источники электроэнергии / О.В. Григораш, Ю. И. Стрелков // Промышленная энергетика. – 2001. – № 4. – С.37-40.
7. Григораш О.В. Возобновляемые источники энергии: монография / О.В. Григораш, Ю.П. Степура, Р.А. Сулейманов, Е.А. Власенко, А.Г. Власов; под общ. ред. О.В. Григораш. – Краснодар: КубГАУ, 2012, – 272 с.
8. Григораш О.В. Ресурсы возобновляемых источников энергии Краснодарского края / О.В. Григораш, А.А. Хамула, А.В. Квитко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 92. – С. 630-641.
9. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] – URL: <http://www.gks.ru>.
10. Toru Okazaki a, Yasuyuki Shirai b , Taketsune Nakamura b. Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage // Renewable Energy. – 2015. – № 83. – P. 332-338.
11. I. Sobor V. Rachier A. Chiciuc and R. Ciupercă. Small wind energy system with permanent magnet eddy current heater, Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Electrical Engineering, Power Engineering, Electronics. – 2013. –Vol. LIX (LXIII), Issue 4, – P. 143- 150.
12. Афанасьев А.А. Математическая модель ветроэлектромеханического нагревателя воды с постоянными магнитами / А.А. Афанасьев, А.Г. Бабак, А.В. Николаев // Электричество. – 2006. – № 3. – С. 30-34.
13. Clerk Maxwell J. A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed. Oxford: Clarendon, 1892, – Vol. 2. – P. 68–73.
14. Tudorache T. Analysis of a permanent magnet eddy current heater driven by a wind turbine / T. Tudorache, L. Mel-

cescu, M. Predescu. // Advances in Electrical and Computer Engineering. Volume 15, Number 3, 2015, p. 53-58.

15. Jacobs I. S. and Bean C. P. Fine particles, thin films and exchange anisotropy in Magnetism, Vol. III, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963. –P. 271–350.

16. Elissa K. Title of paper if known, unpublished.

17. Nicole R. Title of paper with only first word capitalized.

J. Name Stand. Abbrev., in press.

18. Yorozu Y., Hirano M., Oka K. and Tagawa Y. Electron

spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface. IEEE Transl. J. Magn. Japan, vol. 2, pp. 740–741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetism Japan, p. 301, 1982].

19. Young M. The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.

20. Кекало И.Б. Быстрозакаленные магнитно твердые материалы системы Nd-Fe-B / И.Б. Кекало, В.П. Менушенков – М.: Изд-во Московского института стали и сплавов, 2000.

Model of Induction Heater on Permanent Magnets Using Wind Energy

Grigorash O., Kirichenko A., Pigarev K.

Kuban State Agrarian University

Krasnodar, Russia

energyksau@mail.ru

Abstract. Modeling and numerical analysis of a wind induction heater on permanent magnets are performed. The ways of solving the energy supply problem by the thermal energy of decentralized AIC consumers are considered. Recommendations for the design of wind powered induction thermal energy system on permanent magnets are developed and description of the design of the wind powered induction thermal energy system on permanent magnets

is shown. The results of simulation of the wind powered induction thermal energy system on permanent magnets are presented.

Keywords: induction, eddy currents, heating, wind energy, renewable energy sources.

Повышение устойчивости и снижение эксплуатационных затрат на ЛЭП за счет установки композитных опор

Шлейников В.Б., Коблова Т.В., Муллаянов Р.И.

Оренбургский государственный университет
Оренбург, Россия

shleinikov@yandex.ru, koblova97@mail.ru, mullayanov.roma@mail.ru

Аннотация. Тема композитных опор для воздушных линий (ВЛ) появилась сравнительно недавно и вызвала в России немалый интерес. Неоспоримые преимущества легких и прочных композитных конструкций позволяют предполагать появление новых технических решений для строительства и ремонта воздушных ЛЭП. Возможно повышение надежности ВЛ при использовании новых опор, упрощение ремонтных работ, снижение эксплуатационных затрат и многое другое.

Ключевые слова: линия электропередачи, композитные опоры, стоимость, технико-экономические показатели.

ВВЕДЕНИЕ

Линия электропередачи является основным компонентом электрических сетей, главное предназначение которой – передача электрической энергии от установок, ее производящих (электростанций), преобразующих и распределяющих (электроподстанций) к потребителям.

На бесперебойность электроснабжения влияют все входящие в состав ЛЭП элементы. Проводники, арматура, изоляторы и опоры - их прочность, устойчивость к внешним воздействиям должны быть максимально высокими.

Наиболее затратными по капиталовложениям и в то же время наиболее уязвимыми к действию неблагоприятных климатических факторов являются воздушные линии электропередач, особенно это относится к распределительным сетям классов напряжений 6/10 кВ, которые имеют упрощенные элементы конструкции (опоры, арматуру) со сравнительно низким запасом прочности, но высокой удельной массой.

В последние годы наметилась тенденция замены железобетонных опор на более эффективные аналоги, особенно на труднодоступных участках линий и проходящих в сложных климатических условиях, таких как горные районы и болотистая местность Севера и Сибири. Поэтому появился интерес к новым типам опор: стальным многогранным, стальным из гнутого профиля и композитным.

КОМПОЗИТНЫЕ ОПОРЫ

Композитные опоры воздушных линий электропередач – сравнительно новый тип мачтовых конструкций, история которых насчитывает не более 15 лет. Опыт применения их в настоящее время еще небольшой, но характеристики современных композиционных материалов придают этим опорам ряд необычных для других типов опор свойств, представляющих интерес с точки зрения снижения затрат на монтаж и повышение эксплуатационной надежности воздушных линий электропередач.

Технические характеристики стеклопластики и базальтопластики, которые служат для изготовления опор, позволяют создавать сверхлегкие мачтовые конструкции, устойчивые к действию повышенных статических и динамических нагрузок. Кроме того, стеклопластики и базальтопластики являются диэлектриками с очень высокими изолирующими свойствами. Основной недостаток материалов – достаточно высокая цена. Поэтому их применение оправдано лишь на линиях, сооружаемых в труднопроходимой местности (горы, болото, тайга, тундра) или для строительства линий высокой степени надежности, обслуживание которых затруднено.

Рассмотрим достоинства и недостатки композитных опор:

- минимальная температура: $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- максимальная температура: $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- тип атмосферы: промышленная;
- предельная высота эксплуатации над уровнем моря: 1000 м;
- рабочее значение влажности воздуха (среднегодовое/верхнее): 75–100 %;
- интенсивность осадков: 3 мм/мин;
- интегральная поверхностная плотность потока энергии солнечного излучения (верхнее рабочее значение): 1125 Вт/м^2 [$0,027\text{ кал/}(\text{см}^2\cdot\text{с})$];
- плотность потока ультрафиолетовой части спектра (длина волн 200–400 нм): 140 Вт/м^2 [$0,0033\text{ кал/}(\text{см}^2\cdot\text{с})$].

Для обеспечения защиты стойки опоры от низового пожара, на наружной поверхности нижнего модуля опоры выполнено покрытие огнезащитным составом, на высоту не менее 2 м от поверхности земли.

Для повышения стойкости к ультрафиолетовому спектру облучения и солнечной радиации, в состав стеклопластика интегрирован светостабилизатор. В связи с этим частично прозрачная труба стойки защищена от негативного воздействия инсоляции на всю толщину слоя.

Экономический эффект от внедрения композитных опор обусловлен:

- стоимостью композитных опор не превосходит стоимости многогранных металлических;
- снижением расходов на их хранение, транспортировку и монтаж;
- отсутствием расходов на подвесную изоляцию;
- снижением расходов на землеотвод (просеки);
- крепление провода к траверсе позволяет снизить габариты применяемых стоек либо увеличить длину пролетов;
- расходы на эксплуатацию снижаются при том, что срок службы опор увеличивается до 50–70 лет.

Также, благодаря современным полимерным материалам композитные опоры:

- просты в сборке и установке;
- компактны при складировании и транспортировке;
- легкие (имеют малый вес конструкции);
- противостоят разрушающим климатическим нагрузкам (ураганным ветрам, гололёдам);
- не подвержены коррозии;
- эстетичны и экологичны;
- вандалоустойчивы.

Существенным достоинством является удобство транспортировки, хранения и установки.

Модульная конструкция элементов стойки опоры, а также относительно большие габариты конических труб модулей, позволяют разместить полную комплектацию промежуточной опоры во внутреннем пространстве модулей в транспортном положении.

По предварительным оценкам, такой вариант позволяет транспортировать на одном автомобильном трейлере от 5 до 7 полностью укомплектованных опор с изолирующими траверсами, арматурой крепления траверс, элементов подвеса проводов, грозотроса и других элементов опоры. Кроме этого, компактность транспортного положения опоры позволяет минимизировать складские площади аварийного резерва энергетической системы.

Конструкция стойки из композитных материалов состоит из модулей в виде усеченных конусных труб различных диаметров. Разработаны шесть типов модулей, позволяющих собрать стойки необходимой высоты и требуемого класса напряжения опоры ВЛ.

Сборка стойки опоры из модулей может выполняться либо на организованном полигоне, либо на месте установки опоры ВЛ. Сборка стойки представляет собой телескопическую стыковку модулей «конус в конус» с перекрытием (нахлестом) не менее 1,5 диаметра ствола в месте стыка. После сопряжения модулей стойки необходима их подпрессовка, с продольным усилием до 40 кН, для плотной посадки с последующей фиксацией стыков путём применения разжимных анкеров.

Модули для стойки опор состоят из базовой стеклопластиковой композиции, воспринимающей основную механическую нагрузку.

Фундаментная установка опор выполняется, как правило, закреплением нижних модулей стойки в грунт в пробуренном котловане во всех типах песчаных, супесчаных, суглинистых и глинистых грунтов.

Возможны доработки фундаментных подкрепляющих конструкций в виде обсадных труб, ригелей или свай с ростверками с учётом коэффициента пористости грунта. При установке стоек в обсадную трубу, нижние модули допускается выполнять укороченными, в частности, для одноцепной опоры ПК220-1 нижний модуль может быть укорочен на 1,5 м, для двухцепной опоры ПК220-2 нижний модуль может быть укорочен на 2 м. Возможен фланцевый фундамент.

Для болотистых и скальных грунтов варианты фундаментов рассматриваются отдельно.



Рис. 1. Транспортное (складское) положение двухцепной промежуточной опоры

Как только производительность и гибкость этих модульных композитных опор стали широко известны, а их длительный срок службы – все более очевидным, старый метод для оценки «какие опоры стоит покупать», безусловно, может измениться. Многие энергокомпании все еще будут покупать деревянные опоры, так как сравнительно низкая стоимость древесины позволяет приобрести большее количество опор за определенную сумму денег. Однако, это решение о покупке опор, выполненных из древесины, абсолютно невыгодно из-за их обслуживания, что становится особенно очевидным, когда деревянные опоры начнут стареть. Прочие расходы менее очевидны, но также существуют: с использованием более дешевых опор приходит осознание того, что надежность электрической сети становится ниже. Как и во многих решениях по коммерческим вопросам, должна быть проведена тонкая грань между доступностью в цене и надежностью. Сосредоточив внимание на стоимости жизненного цикла опоры, так же, как это сделано для трансформаторов, энергокомпании могут теперь получить продукт (опору), который является одновременно доступным в цене и который значительно повысит надежность всей энергосистемы.

Для подтверждения вышесказанного выполним количественную оценку стоимости эксплуатации ВЛ по следующей методике. Общая стоимость эксплуатации определяется как:

$$C_{\Sigma} = Z_E + Z_{\Sigma} + Z_{\Pi} + Z_B + Z_K, \quad (1)$$

где Z_E – единовременные затраты на организацию эксплуатации и ТОиР объекта; Z_{Σ} – периодические затраты на эксплуатацию; Z_{Π} – затраты на проведение планового ТОиР; Z_B – затраты на проведение внепланового ТОиР; Z_K – затраты на проведение капитального ремонта.

Единовременные затраты на организацию эксплуатации и ТОиР объекта могут определяться как:

$$Z_E = Z_{\text{Зип}} + Z_{\text{Об}} + Z_{\text{Д}} + Z_{\text{Оп}}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{Зип}}$ – затраты на приобретение начального комплекта запасных частей для проведения ТОиР объекта; $Z_{\text{Об}}$ – затраты на приобретение необходимого оборудования и инструмента для проведения ТОиР; $Z_{\text{Д}}$ – затраты на разработку и согласование документации по ТОиР; $Z_{\text{Оп}}$ – затраты на обучение персонала и пр.

Периодические затраты на эксплуатацию объекта могут определяться как:

$$Z_{\Sigma} = Z_{\text{От}} + Z_{\text{Соц}} + Z_{\text{Топл}} + Z_{\text{ММ}} + Z_{\text{пр.мат}} + Z_{\text{АМ}} + Z_{\text{Э.пр}}, \quad (3)$$

где $Z_{\text{От}}$ – затраты на приобретение комплекта запасных частей для проведения ТОиР объекта; $Z_{\text{Соц}}$ – отчисление на социальные нужды; $Z_{\text{Топл}}$ – затраты на топливо (ГСМ и пр.); $Z_{\text{ММ}}$ – затраты на эксплуатацию машин и механизмов;

$Z_{\text{пр_мат}}$ – прочие материальные затраты; $Z_{\text{ам}}$ – амортизационные отчисления на оборудование для выполнения ТОиР; $Z_{\text{э_пр}}$ – прочие затраты.

Затраты на проведение планового ТОиР, внепланового ТОиР и капитального ремонта могут определяться как:

$$Z_{\text{П (ЗВ; ЗК)}} = Z_{\text{П_ТОиР}} + Z_{\text{соц_ТОиР}} + Z_{\text{мат_ТОиР}} + Z_{\text{ГСМ_ТОиР}} + Z_{\text{прМАТ-ТОиР}} + Z_{\text{ам_ТОиР}} + Z_{\text{пр_ТОиР}}, \quad (4)$$

где $Z_{\text{П_ТОиР}}$ – затраты на оплату труда персонала, занятого проведением планового ТОиР, внепланового ТОиР и капитального ремонта; $Z_{\text{соц_ТОиР}}$ – отчисление на социальные нужды; $Z_{\text{мат_ТОиР}}$ – затраты на материалы (запасные части), используемые при проведении планового ТОиР, внепланового ТОиР и капитального ремонта; $Z_{\text{ГСМ_ТОиР}}$ – затраты на топливо (ГСМ и пр.); $Z_{\text{прМАТ-ТОиР}}$ – прочие материальные затраты; $Z_{\text{ам_ТОиР}}$ – отчисление на амортизацию оборудования, используемого при проведении планового ТОиР, внепланового ТОиР и капитального ремонта; $Z_{\text{пр_ТОиР}}$ – прочие затраты.

Стоимость эксплуатации ВЛ должна определяться по информации эксплуатирующей организации. В качестве исходных данных для расчетов предоставляются:

- перечень и стоимость начального комплекта запасных частей;
- перечень и стоимость необходимых материалов для проведения планового ТОиР, внепланового ТОиР и капитального ремонта;
- перечень и стоимость необходимого оборудования для проведения осмотров и ремонтов;
- периодичность проведения осмотров и ремонтов, установленная на предприятии;
- длительность проведения осмотров, ремонтных работ элементов ВЛ: опор, фундаментов, изоляции и т.п.;
- стоимость нормо-часа обслуживающего персонала;
- стоимость нормо-часа ремонтного персонала;
- длительность использования машин и механизмов при проведении осмотров и ремонтов;
- расход ГСМ при проведении осмотров и ремонтов;
- перечень прочих затрат и их стоимостное выражение.

При определении состава и количества материалов, объема трудозатрат персонала и времени использования машин и механизмов необходимо учитывать тип и объем основного оборудования на единицу длины ВЛ, на 100 км или на один объект. Таким образом, при выполнении сравнения стоимости эксплуатации ВЛ с различными типами опор, эксплуатирующей организацией должна быть выдана информация по каждому из рассматриваемых типов.

Методика оценки экономической эффективности проекта строительства ВЛ 110–220 КВ на композитных опорах для сравнения с ВЛ на опорах традиционных типов (металлические решетчатые и многогранные, железобетонные)

Оценка экономической эффективности проекта строительства ВЛ на композитных опорах выполняется на основании сравнения затрат на строительство ВЛ с опорами других типов. Оценку экономической эффективности целесообразно выполнять также и с учетом затрат на эксплуатацию ВЛ с применением опор различных типов.

Оценка экономической эффективности проекта строительства ВЛ выполняется на стадии основных технических

решений при разработке проектной документации. Расчеты ведутся на основании выполненных предварительных инженерных изысканий.

При разработке Основных технических решений оценка экономической эффективности выражается в выполнении техникоэкономического сравнения вариантов строительства ВЛ. Техникоэкономическое сравнение может быть выполнено, по меньшей мере, двумя способами – упрощенным и детальным.

При упрощенном сравнении предполагается, что для всех рассматриваемых вариантов марка провода и количество (стоимость) анкерных опор являются одинаковыми, а собственно сравнение выполняется только по стоимости строительства промежуточных опор и их фундаментов. При этом, количество промежуточных опор различных типов определяется при расстановке по профилю трассы ВЛ на длине 5 или более километров. В расчетах учитывается также стоимость доставки промежуточных опор на место строительства. Результаты сравнения сводятся в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты сравнения при упрощенном сравнении

| Параметры | Вариант 1 | Вариант 2 | Вариант..N | |
|--|-----------|-----------|------------|-----------|
| | ПК220-2 | ПМ220-2 | 2П220-2 | |
| Пролет габаритный, м | 245 | 260 | 350 | |
| Пролет ветровой, м | 290 | 400 | 400 | |
| Пролет весовой, м | 370 | 350 | 400 | |
| Количество промежуточных опор, шт | ~21 | ~20 | ~15 | |
| Вес одной опоры, т | 3,500 | 7,160 | 6,728 | |
| Вес опор, всего, т | 73,5 | 143,2 | 100,92 | |
| Тип закрепления ¹ | K1 | M1 | P1 | |
| Сборный железобетон, всего, м ³ | - | - | 107,4 | |
| Металлоконструкции фундаментов, всего, т | - | 50,0 | - | |
| СМР (опоры), тыс. руб. с НДС | СМР | 552,00 | 2 194,21 | 1 678,57 |
| | Материалы | 15 115,80 | 13 452,86 | 12 570,03 |
| | Всего | 16 035,79 | 15 647,07 | 14 248,61 |
| СМР (фундаменты), тыс. руб. с НДС | СМР | 367,99 1 | 1 277,79 | 623,34 |
| | Материалы | 0,00 | 3 996,71 | 3 012,00 |
| | Всего | 0,00 | 5 274,49 | 3 635,33 |
| ИТОГО стоимость, тыс. руб. с НДС | 16 035,79 | 20 921,57 | 1 7883,94 | |
| Стоимость доставки, тыс. руб. с НДС | 726,60 | 1 400,54 | 421,21 | |
| ВСЕГО стоимость с доставкой, тыс. руб. с НДС | 16 762,38 | 22 322,11 | 18 305,15 | |

При необходимости, дополнительно может быть выполнено сравнение стоимости постоянного/временного отвода для различных типов опор (таблица 2).

При детальном сравнении необходимо выполнять оценку стоимости строительства ВЛ по всей длине трассы с учетом стоимости провода, промежуточных и анкерно-угловых опор и их фундаментов, стоимости доставки опор на место строительства. При необходимости учитывается стоимость потерь электроэнергии при применении проводов различных марок.

Таблица 2
Сравнение стоимости постоянного и временного отвода

| Параметры | Вариант 1 | Вариант 2 | Вариант..N |
|---|--|--|--|
| | ПК220-2 | ПМ220-2 | 2П220-2 |
| Площадь землеотвода в постоянное пользование на 1 опору/всего, м ² | 20,0/400,0 | 26,0/468,0 | 70,0/980,0 |
| Ширина полосы временного отвода, м | 10,3 | 13,0 | 17,4 |
| Ширина охранной зоны, м | 56,3 | 59,0 | 63,4 |
| Ширина просеки, м | 58,3 | 59,0 | 63,4 |
| Стоимость постоянного/временного отвода земли, тыс. руб. с НДС | зависит от тарифа района строительства | зависит от тарифа района строительства | зависит от тарифа района строительства |

Сравнение стоимости промежуточных опор в зависимости от их количества при применении с различными марками проводов, приводится в таблице 3.

Таблица 3
Сравнение стоимости опор с различными проводами

| Наименование провода | σ_{\max} провода, кгс/м ² | Тип опоры | Кол-во опор | Стоимость установки одной опоры, млн. руб. | Сумма всего, млн. руб. |
|----------------------|---|-----------|-------------|--|------------------------|
| АС 300/39 | 12,15 | ПК220-2 | 90 | 0,789 | 71,010 |
| | | ПМ220-2 | 85 | 1,038 | 88,230 |
| | | 2П220-2 | 63 | 1,163 | 73,269 |
| АС 400/513 | 12,15 | ПК220-2 | 85 | 0,789 | 67,065 |
| | | ПМ220-2 | 79 | 1,038 | 82,002 |
| | | 2П220-2 | 58 | 1,163 | 67,454 |
| АСк2у 300/39 | 14,5 | ПК220-2 | 82 | 0,789 | 64,698 |
| | | ПМ220-2 | 76 | 1,038 | 78,888 |
| | | 2П220-2 | 56 | 1,163 | 65,128 |

Подсчет стоимости потерь электрической энергии на нагрев и корону приведен в таблице 4.

Таблица 4
Стоимость потерь электрической энергии на нагрев и корону

| Характеристика | АС 300/39 | АС 400/51 | АСк2у 300/39 |
|--|-----------|-----------|--------------|
| Сопротивление провода при рабочей температуре, Ом/км | 0,096 | 0,073 | 0,0947 |
| Потери активной мощности на нагрев, кВт | 257,23 | 195,61 | 253,74 |
| Число часов максимальных потерь, час | 4592 | 4592 | 4592 |
| Потери ЭЭ на нагрев за год, МВт×ч | 1181,14 | 898,2 | 1165,2 |
| Удельные потери на корону, кВт/км | 4,3 | 3 | 4,3 |
| Потери активной мощности на корону, кВт | 131,8 | 91,95 | 131,8 |
| Потери ЭЭ на корону за год, МВт×ч | 1154,53 | 805,48 | 1154,53 |
| Стоимость потерь на нагрев и корону за год, млн. руб. | 3,712 | 2,708 | 3,687 |
| Стоимость потерь на нагрев и корону за 50 лет, млн. руб. | 185,6 | 135,4 | 184,35 |

Итоговая стоимость строительства промежуточных опор с учетом стоимости провода и стоимости потерь электрической энергии приводится в таблице 5.

Таблица 5
Итоговая стоимость строительства промежуточных опор

| Марка провода | Стоимость провода, млн. руб. | Промежуточные опоры | | Суммарная стоимость, млн. руб. | Стоимость потерь на нагрев и корону за 50 лет, млн. руб. | Стоимость с учетом потерь, млн. руб. |
|---------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------------|
| | | Тип опор | Сумма строительства, млн. руб. | | | |
| АС 300/39 | 48,151 | ПК220-2 | 71,010 | 119,161 | 185,6 | 304,761 |
| | | ПМ220-2 | 88,230 | 136,381 | | 321,981 |
| | | 2П220-2 | 73,269 | 121,420 | | 307,020 |
| АС 400/51 | 61,139 | ПК220-2 | 67,065 | 128,204 | 135,4 | 263,604 |
| | | ПМ220-2 | 82,002 | 143,141 | | 278,541 |
| | | 2П220-2 | 67,454 | 128,593 | | 263,993 |
| АСк 2у 300/39 | 59,847 | ПК220-2 | 64,698 | 124,545 | 184,35 | 308,895 |
| | | ПМ220-2 | 78,888 | 138,735 | | 323,085 |
| | | 2П220-2 | 65,128 | 124,975 | | 309,325 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты показали, что, несмотря на высокую удельную стоимость (композит примерно в три раза дороже оцинкованной стали), установка композитных опор обходится дешевле многогранных. На наш взгляд, по технико-экономическим показателям, композитные опоры вполне готовы к применению, особенно с учётом того, что для класса напряжения 110 кВ и выше данные опоры давно уже применяются.

ЛИТЕРАТУРА

- Бочаров Ю.Н. К вопросу о композитных опорах воздушных линий / Ю.Н. Бочаров, В.В. Жук // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. №1. URL:<http://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-kompozitnyh-oporah-vozdushnyh-linij>.
- Поров И.С. Опыт эксплуатации композитных опор ВЛ-110 кВ в ОАО «Тюменьэнерго».
- Преображенский, А.И. Стеклопластики – свойства, применения, технологии // Главный механик. –2010. –№5. –С. 27–36.
- Кравцов А. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0,4–750 кВ / А. Кравцов, Б. Узелков, Е. Гологорский. –М.: ЭНАС, 2007. – 630с.
- Методические указания по проектированию ВЛ 110-220 КВ с применением композитных опор// Филиал ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». – Еовосибирск: СибНИИЭ, 2015.– С. 24-30.

Stability Enhancement and Cut Down Cost of the High Voltage Power Lines Due to Installation of Composite Supports

Shleynikov V.B., Koblova T.V., Mullayanov R.I.

Orenburg State University

Orenburg, Russia

shleinikov@yandex.ru, koblova97@mail.ru, mullayanov.roma@mail.ru

Abstract. The topic of composite supports for overhead electric lines appeared comparatively recently and aroused considerable interest in Russia. The undeniable advantages of lightweight and durable composite structures suggest the emergence of new technical solutions for the construction and repair of overhead electric lines. It is possible improving reliability of overhead lines when using new supports, simplify repairs, reduce operating costs and many other things.

Keywords: power line, composite supports, cost, technical and economic indicators.

Применение MES-систем в контексте обмена информацией между производственными участками и отделами контроля продукции на предприятии

Шутиков М.А., Феофанов А.Н.

ФГБОУ ВО «МГТУ «Станкин»

Москва, Россия

mi.shutikov93@yandex.ru

Аннотация. Контроль изделий в современных условиях перехода к технологиям Индустрии 4.0 предполагает использование систем автоматизации деятельности предприятия. Сформулировано, что внедрение таких систем, как MES, в отделах, занимающихся контролем выпускаемой продукции, позволяет оперативно передавать информацию о потенциальном браке на производство. Таким образом, появляется возможность принять решение адекватное ситуации, а так же осуществить оптимальную загрузку оборудования, в том числе и производственного. Указано, что использование MES-систем выводит на более высокий уровень организацию всей производственной деятельности. Применение метода автоматизации производственной деятельности, основанного на использовании MES позволяет повысить прозрачность функционирования предприятия. Определено, что с помощью MES-систем предприятие имеет возможность создать единую информационную среду для управления производственной деятельностью, совместимую с другими платформами, используемыми для управления бизнес-процессами предприятия.

Ключевые слова: автоматизация, MES-система, производство, отдел технического контроля.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы автоматизации, машинное обучение, интернет вещей – все эти инструменты являются составляющими Индустрии 4.0 и предполагают переход к облачному хранению данных, цифровой модели производства, интеграцию различных производств в единый кластер на основе виртуального представления их деятельности. В концепции Индустрии 4.0 главным ресурсом и главной ценностью является информация. [1] Именно работа с ней, а так же адекватное и актуализированное её представление является ключом к эффективному функционированию предприятия. Одним из актуальных вопросов, который стоит перед современным предприятием, является возможность наиболее эффективного использования имеющихся у предприятия ресурсов, в том числе и информационных. Организация, использующая цифровые технологии, может воспользоваться возможностями конвергенции, при которой данные о продукте доступны на всех этапах его жизненного цикла – от разработки до технического обслуживания и утилизации. Автоматизация процессов деятельности служит целям цифрового производства. Таким образом, применение систем управления деятельностью предприятия позволяют повысить эффективность функционирования всех его про-

цессов, в том числе и процесса оптимальной загрузки оборудования. Возможность интеграции различных производственных систем, повышение прозрачности функционирования предприятия, возможности создания цифровых двойников предприятия и изделия – все это является предпосылками к переходу на безлюдное производство в контексте Индустрии 4.0.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Контроль качества продукции является неотъемлемым процессом функционирования предприятия. Это процесс является составной частью производственных процессов и направлен на проверку надежности в процессе изготовления, потребления или эксплуатации продукции. Суть контроля качества продукции на предприятии заключается в получении информации о состоянии объекта и сопоставлении полученных результатов с установленными требованиями, зафиксированными в чертежах, стандартах, договорах поставки, ТЗ, НТД, ТУ и других документах. Чаще всего, ответственным подразделением за контроль выпускаемой предприятием продукции является отдел технического контроля (ОТК). Главные задачи ОТК - предотвращение выпуска продукции, не соответствующей требованиям стандартов, технических условий, эталонов, технической документации, договорным условиям, укрепление производственной дисциплины и повышение ответственности всех звеньев производства за качество выпускаемой продукции. В соответствии с перечисленными задачами ОТК выполняет ряд функций:

- планирование и разработку методов обеспечения качества продукции, контроль и стимулирование качества;
- уровень качества изделия, планирование контроля качества и технических средств контроля;
- сбор информации о качестве, определение затрат на обеспечение качества, обработку информации и анализ данных о качестве из сферы производства и эксплуатации;
- управление качеством продукции, поставляемой поставщиками, и продукции собственного предприятия;
- разработку методик контроля, обеспечивающих сравнимость и надежность результатов контроля качества;
- разработку (совместно с техническими подразделениями) технических условий, кондиций, стандартов для управления качеством продукции.

Продукция предприятия может быть реализована только после приемки ее ОТК. Для контроля выпускаемой

продукции используется различное оборудование, например, координатно-измерительные машины. Иногда возникает ситуация, когда продукция необходима к определенному сроку (требования заказчика, сроки выполнения государственного заказа), однако большая часть продукции не прошла приемку отдела технического контроля. В этом случае возникает необходимость срочно изготовить дополнительное количество продукции, либо исправить те изделия, которые забракованы. Для этого необходимо дополнительно выделить как временные, так и материальные ресурсы для изготовления или восстановления бракованной продукции.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ НОВИЗНА

Чтобы определить, сколько времени необходимо будет затратить на изготовление дополнительных единиц продукции или на ее восстановление и, в тоже время, не останавливать основное производство, есть возможность воспользоваться средствами автоматизации, например MES-системами. MES-система занимается планированием технологических операций на рабочие места, которые эти операции могут выполнить. Системы такого типа решают задачи синхронизации, координируют, анализируют и оптимизируют выпуск продукции в рамках какого-либо производства. MES-системы, собирая и обобщая данные, полученные от различных производственных систем и технологических линий, выводят на более высокий уровень организацию всей производственной деятельности, начиная от формирования производственного заказа и до отгрузки готовой продукции на склады, а также позволяют эффективно загружать оборудование за счет расчета оптимального производственного расписания выполняемых на нем работ.

Для решения задачи оперативного планирования в MES-системах строится динамическая компьютерная модель производства. Она реализует непрерывное имитационное моделирование движения материальных потоков внутри организации в соответствии с технологическими маршрутами. Производственное расписание наглядно описывается временной диаграммой, где каждой операции ставится в соответствие отрезок прямой, длина которого пропорциональна ее длительности. Эти отрезки, именуемые временными линиями, располагаются напротив номеров технологических процессов. Обеспечивается своевременная доставка и ввод информации о совершаемых действиях, происходящих событиях и отклонениях от составленного оперативного плана. Производственное расписание поддерживается в оптимальном состоянии за счет непрерывной компенсации отклонений методом коррекции либо полного перерасчета. В результате все процессы, происходящие в организации, становятся прозрачными, достигается управляемость и идентифицируемость материальных потоков производств.

По данным статистики MES обеспечивает:

- снижение продолжительности цикла производства в среднем на 45%;
- сокращение времени ввода данных, обычно на 75% или более;
- сокращение количества незавершенной продукции в среднем на 24%;

- снижение объема бумажной отчетности между смежными в среднем на 61%;
- сокращение времени освоения новой продукции в среднем на 27%;
- сокращение бумажной документации в среднем на 56%;
- сокращение объема брака в среднем на 18%.

MES-системы призваны решать задачи составления производственного расписания с целью оптимальной загрузки оборудования. [2]. Важно отметить, что эти системы, оперируя исключительно производственной информацией, позволяют корректировать, либо полностью расчитать заново производственное расписание в течение рабочей смены столько раз, сколько это необходимо. Таким образом, при интеграции информации поступающей от ОТК и производственных участков в MES-систему, появляется возможность получить практически полностью автоматическую систему расчета производственного расписания, которая будет рассчитывать оптимальную загрузку производственного и измерительного оборудования на предприятии. В частности, одной из MES-систем, которая хорошо себя зарекомендовала, является система «ФОБОС», разработанная специалистами ФГБОУ ВО «МГТУ «Станкин». Оперативное планирование и диспетчерский контроль прохождения заказов осуществляется в системе посредством расчета оптимального производственного расписания и последующего мониторинга его выполнения. В основу расчета и управления производственным расписанием положен математический оптимизационный аппарат, позволяющий моделировать 100 сценариев по 3 выбранным значениям критериев из 14 возможных. Также существует возможность вести детальный анализ возникающих задержек обработки деталей на каждом производственном участке, контролируется их текущий дефицит, производится оперативный анализ производственных затрат (Activity Based Costing) в разрезе как основного технологического оборудования, так и отдельных производственных заказов.

В состав системы входят:

- автоматизированное рабочее место диспетчера-планировщика;
- автоматизированное рабочее место технолога;
- автоматизированное рабочее место сотрудника ОТК;
- автоматизированное рабочее место комплектовщика (кладовщика);
- автоматизированное рабочее место мастера;
- автоматизированное рабочее место руководителя производства, а также другие вспомогательные программы. Подобная интеграция функций рабочих мест обеспечивает комплексное управление процессами загрузки оборудования и распределения мощностей на основе общего обмена данными о текущей ситуации на производственном участке.

В рассмотренном выше случае, продукция после изготовления поступает на контроль в отдел технического контроля. Сотрудники указанного отдела с помощью измерительного оборудования производят контроль поступающих изделий. К сожалению, возникает ситуация, когда продукция не проходит проверку, то есть продукция содержит брак определенного вида. Ситуация может усугубиться в том случае, когда указанная партия продукции необходима

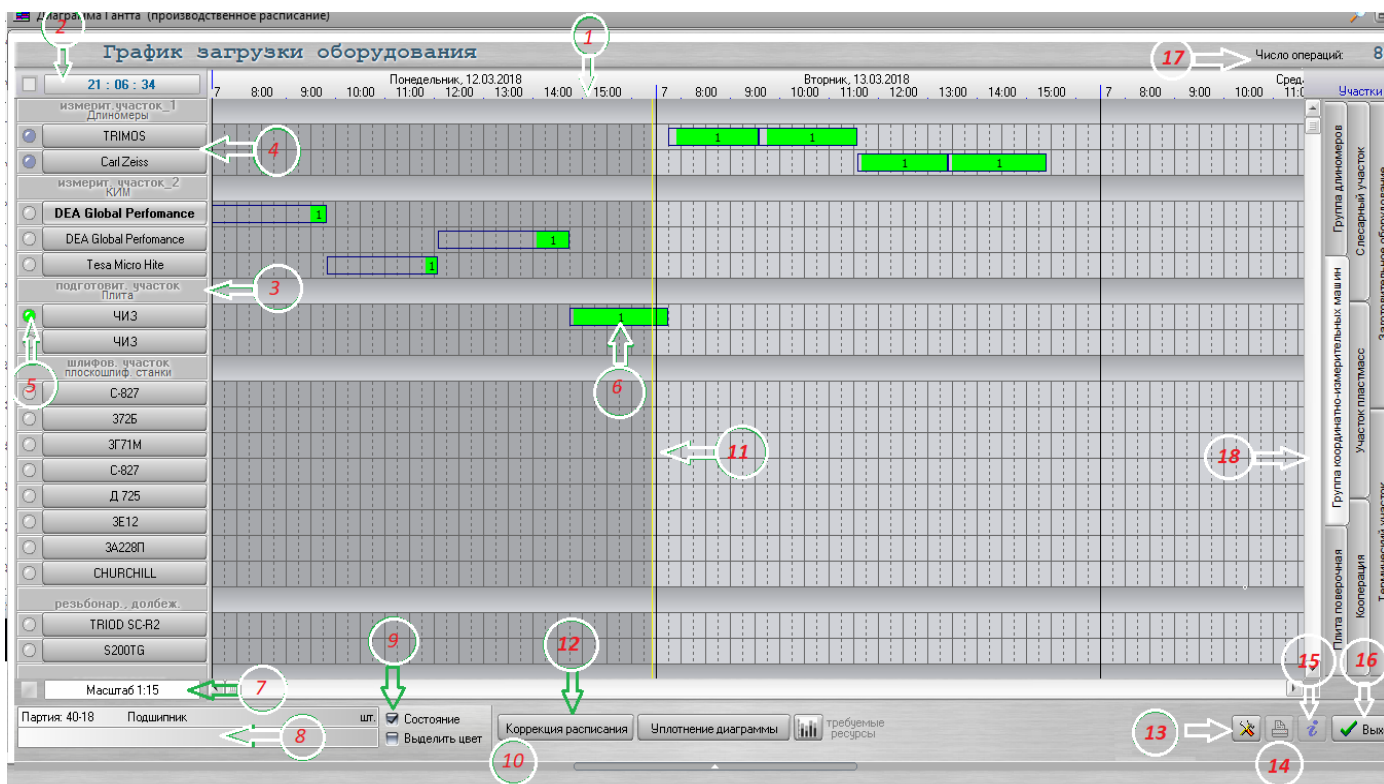


Рис 2. Сформированное производственное расписание в виде диаграммы Гантта

13 - Кнопка «Настройка параметров» позволяет настраивать диаграмму и получать дополнительную информацию о загрузке оборудования по участкам и группам;

14 - Кнопка «Печать документов» — позволяет распечатать основные цеховые документы на принтере;

15 - Информация о состоянии обрабатываемого заказа, — нажатие этой кнопки вызывает соответствующее информационное окно;

16 - Кнопка «Выход» закрывает диаграмму Гантта;

17 - Число операций — указывает число линий Гантта (запланированных операций) на диаграмме;

18 - Участки. Указав на одну из закладок, можно выбрать производственный участок (группу станков). После такого выбора соответствующие станки отобразятся на диаграмме. [4]

Кроме того, использование такого рода систем позволяет повысить прозрачность функционирования предприятия. Существует возможность предоставить возможность уполномоченным сотрудникам предприятия (представителям заказчика) контролировать ход выполнения производственных процессов. [5]

Еще одним из преимуществ такого решения является исключение бумажной отчетности, так как данные существуют в цифровом виде. Таким образом, исключается брак, связанный с неправильным занесением данных в протокол, то есть понижается влияние риска, связанного с воздействием человеческого фактора. Кроме того, есть возможность переносить протоколы в систему электронного документооборота, что повышает удобство передачи и поиска протоколов, а так же дает возможность архивации и однозначной идентификации протоколов в едином информационном пространстве предприятия.

Однако, необходимо особое внимание уделить вопросам защиты информации при ее передаче от подразделения в MES-систему. Действительно, в случае искажения информации существует потенциальная вероятность неверного расчета производственного расписания, и как следствие, невыполнения требований заказчика или срыва сроков, что может грозить финансовыми и информационными потерями.

Внедрение MES-системы является актуальным в аспекте повышения автоматизации и перехода к цифровой экономике. Согласно принятой программе развития цифровой экономики необходимо проводить комплексную автоматизацию и компьютеризацию технологических процессов предприятия, в том числе внедрять системы электронного документооборота, комплексного управления данными об изделии в течении всего жизненного цикла, управления и распределения ресурсов и информационных потоков предприятия, в том числе и MES-систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с помощью систем предприятие имеет возможность создать единую информационную среду для управления производственной деятельностью, совместимую с другими платформами, используемыми для управления бизнес-процессами предприятия, что является одним из инструментов Индустрии 4.0.

ЛИТЕРАТУРА

1. Феофанов А. Н. Создание мобильного портала для организации работы предприятия / А.Н. Феофанов, И.Ю. Юнин, Ю.М. Соломенцев. // Технология машиностроения. – 2012. – №5 – С.70-73.

2. Соломенцев Ю.М. Оперативное планирование и управление машиностроительным производством на основе исполнительных производственных систем / Ю.М. Соломенцев, Е.Б.Фролов, А.Н.Феофанов. // Вестник машиностроения. – 2017. – №8. – С. 41-43.

3. Соломенцев Ю.М. Проблемы мирового рынка станкостроения в 1980-2017. / Ю.М. Соломенцев, А.Н. Феофанов, Н.Д. Бондарчук. // Технология машиностроения. – 2017. – №9 (183). – С. 15.

4. Феофанов А.Н. Составления производственного расписания в системе MES в программной среде «ФОБОС»: учеб. пособие / А.Н. Феофанов, Е.Б. Фролов, М.А. Шутиков — М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2018. — 78 с.

5. Магамадалиев Э.А. Разработка методов и средств проектного управления машиностроительным автоматизированным мелкосерийным производством: дис. канд. техн. наук. – Махачкала, 2008. – С. 5.

Application of MES-systems in the Context of Information Exchange Between Production Sites and Product Control Departments at the Enterprise

Shutikov M.A., Feofanov A.N.

Moscow State University of Technology «STANKIN»

Moscow, Russia

mi.shutikov93@yandex.ru

Abstract. Control of products in modern conditions of transition to technologies of the Industry 4.0 assumes use of systems of automation of activity of the enterprise. It is formulated that the introduction of such systems as MES, in the departments involved in the control of products, allows quickly to transmit information about the potential faults of the production. Thus, it is possible to make an adequate decision to the situation, as well as to carry out the optimal loading of equipment, including production equipment. It is indicated that the use of MES-systems leads to a higher organization level of the entire production activity. The use of the production automation method based on the use of MES allows to

increase the transparency of the enterprise operation. It is determined that with the help of MES-systems the enterprise has the ability to create a single information environment for the management of production activities, compatible with other platforms used to manage the business processes of the enterprise.

Keywords: automatization, MES-system, enterprise, quality control department.

О разработке глубинного каротажного зонда для исследования структуры лунных пород на космическом аппарате «Луна-Ресурс-1»

Сапрыкин О.А., Погонин В.И.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского

Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

Москва, Россия

oleg.sapr@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается задача исследования лунного грунта с использованием глубинного каротажного зонда, опускаемого с помощью самозаглубляющегося пенетратора на глубины в несколько метров. В составе глубинного каротажного зонда рассмотрено размещение двух датчиков – датчика остаточной намагниченности (ДОН) и датчика диэлектрической проницаемости (ДДП). Предложены принципы работы этих датчиков и их конструктивное исполнение с учетом особенностей применения в условиях работы пенетратора на Луне. Зонд предполагается использовать на борту российского космического аппарата «Луна-Ресурс-1» (на посадочном аппарате).

Ключевые слова: лунный грунт, реголит, глубинный каротажный зонд, пенетратор, остаточная намагниченность, диэлектрическая проницаемость, самозаглубляющееся устройство, ферромагнитные свойства, амплитуда колебаний, циклограмма работы, температурные условия.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее актуальных научных задач современных исследований Луны – определение теплофизических свойств лунного грунта – реголита с учетом глубины его залегания. Распределение этих свойств по глубине многое говорит о фактическом составе лунных пород, мощности тех или иных слоев, о наличии слабо связанных, летучих составляющих, столь важных для задач освоения Луны. Кроме того, данные о наличии ферромагнетиков могут прояснить многое в истории формирования Луны, также интересны с точки зрения оценки лунных ресурсов и технологий их освоения.

Данную задачу начали решать еще в прошлом веке. Первые полеты космических кораблей по программе «Аполлон» включали в том числе и инструментарий для определения теплофизических свойств реголита по глубине залегания [1]. Эти исследования проводились в экваториальных и средних широтах Луны. Вместе с тем современные дистанционные данные свидетельствуют о существенных различиях в составе и плотностях реголита в полярных областях относительно экваториальных [2]. В полярных районах контактные исследования пока не проводились. Однако именно эти районы представляют в настоящее время высокий научный и практический интерес для предстоящих автоматических и пилотируемых экспедиций.

ГЛУБИННЫЙ КАРОТАЖНЫЙ ЗОНД И БУРОВАЯ УСТАНОВКА – ВАЖНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ГЛУБИННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛУНЫ

В современной геологии классическим инструментом для решения задачи теплофизического анализа является глубинное зондирование с использованием глубинного каротажного зонда (ГКЗ). Механизм размещения ГКЗ на глубинах предполагает использование пенетратора или буровой установки (БУ), как наиболее распространенного универсального средства для работ такого сорта на Земле. БУ имеют неоспоримое преимущество, являясь, как правило, многократными. К их достоинствам также относятся следующие возможности:

заглубления на большие глубины – десятки и сотни метров;

поднятия шлама для последующего исследования в соответствии с глубиной его залегания;

изучения слабо связанных и летучих составляющих пород;

оперативной замены ГКЗ различного назначения и размеров, ограниченных лишь диаметром скважины;

многократного применения, в частности, за счет смены шнеков.

Пенетраторы обычно используются как одноразовое средство заглубления, поскольку гарантированно извлечь его из породы далеко не всегда удается из-за обрушения устья скважины. Вместе с тем, в ряде случаев применение пенетратора более предпочтительно из-за простоты его конструкции, компактности, относительно высокой скорости заглубления на глубины в несколько метров. Указанные преимущества определяют и область использования пенетраторов: пионерские исследования, разведывательные миссии. В этих случаях важна оперативность, дешевизна исследования, а надежность получения данных приоритетна по отношению к их полноте. Таким образом, для исследований в полярных областях Луны использование пенетраторов представляется вполне оправданным.

На космическом аппарате (КА) «Луна-Ресурс-1» (посадочный аппарат, ПА) в составе научной аппаратуры (НА) присутствует как БУ, так и пенетратор. БУ разрабатывают итальянские ученые из ЕКА, а пенетратор российский институт – ГЕОХИ РАН им. В.И. Вернадского. Здесь мы рассмотрим проект российского научного прибора.

В состав научной аппаратуры КА «Луна-Ресурс-1» входит глубинный каротажный зонд (ГКЗ) для прибора ТЕРМО-ЛР. ГКЗ состоит из датчика остаточной намагниченности (ДОН), датчика диэлектрической проницаемости (ДДП) и датчиков температуры. Зонд погружается в реголит с использованием самозаглубляющегося устройства (СЗУ) – пенетратора. Конструктивно ГКЗ прикреплен к хвостовой части СЗУ и проникает в породу вслед за СЗУ. Диаметры ДОН и ДДП соответствуют диаметру СЗУ, образуя с ним единое тело цилиндрической формы диаметром 25 мм. В центральной части датчиков проходят требуемые коммуникации. Платиновые датчики температуры располагаются в корпусе ГКЗ и на гибкой ленте, связывающей зонд с бортом КА. Заглубление СЗУ осуществляется по ударному механизму: внутренний сердечник, «молоток» ускоряется в магнитном поле и СЗУ продвигается за счет соударения с его корпусом. Движение молотка контролируется магнитным полем соленоида.

Датчик остаточной намагниченности – ДОН

ДОН предназначен для обнаружения железосодержащих компонентов в лунном грунте и определение их влияния на остаточную намагниченность реголита, сохранившуюся с времен формирования Луны.

Принцип работы ДОН базируется на изменении резонансной частоты электромагнитного контура при попадании металлических частиц в открытый магнитный зазор индуктора. Внутри ДОН находится вакуум с относительной магнитной проницаемостью $\mu_{\text{вак}} = 1$. Частицы реголита, которые могут содержать железо с $\mu_{\text{рег}}$ до $10^2 \dots 10^4$ ед. окружают корпус ДОН снаружи и попадают в открытый магнитный зазор датчика, меняя его магнитное сопротивление и индуктивность. Относительный рост индуктивности dL/L_0 приводит к соответствующему снижению резонансной частоты контура:

$$dF / F_0 = - dL / 2L_0$$

где F_0 и L_0 – исходные значения частоты и индуктивности в вакууме.

Изменения частоты регистрируются в режиме самописца по мере погружения ГКЗ, и позволяют судить о распределении железосодержащих компонентов в породе по глубине. Рабочая частота контура выбирается относительно низкой (10...25 КГц), где ферромагнитные свойства доменов железа выражены лучше.

Конструктивно ДОН (рис.1) выполнен в форме пустотелого цилиндра и представляет собой два вложенных друг в друга металлических кольца (1 и 2) высотой 25 мм, между которыми располагаются 6 - 8 сердечников (3) с полюсами, обозначенными S и N и обмотками (4)).

Малое стальное кольцо объединяет внутренние полюса сердечников, замыкая магнитное поле индуктора внутри датчика. Внешнее большое титановое кольцо защищает рабочие узлы ДОН, не препятствуя проникновению магнитного поля индуктора в окружающую среду. Соседние обмотки сердечников намотаны встречно друг к другу и включены последовательно. Такая конструкция обеспечивает формирование открытых зазоров с чередованием полюсов. По результатам замеров

индуктивности с погружением ДОН в сыпучие среды с различным содержанием частиц железа можно решать обратную задачу по корреляции данных ДОН с магнитными свойствами реголита.

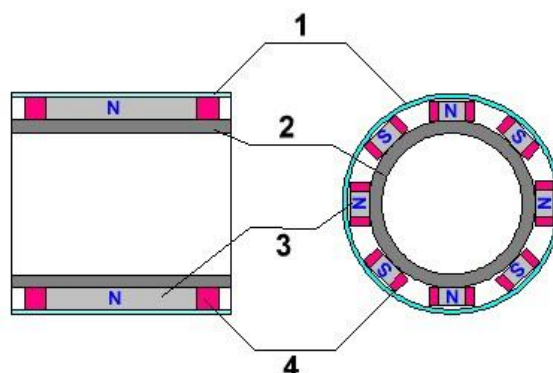


Рис. 1 Конструкция ДОН

Датчик диэлектрической проницаемости – ДДП

Второй датчик ГКЗ, ДДП устанавливается для оценки диэлектрических характеристик окружающего реголита путем измерения коэффициента относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r среды вокруг зонда. По изменениям ϵ_r можно судить о распределении слоев в грунте, их плотности и составе породы.

Принцип работы ДДП базируется на изменении емкости открытого конденсатора, пластины которого покрыты диэлектриком с переменным ϵ_r [3]. Датчик ДДП представляет собой конденсатор, сформированный двумя изолированными обмотками, намотанными бифилярно с шагом 3 мм на цилиндрическую основу из диэлектрика диаметром 25 мм (рис.2).

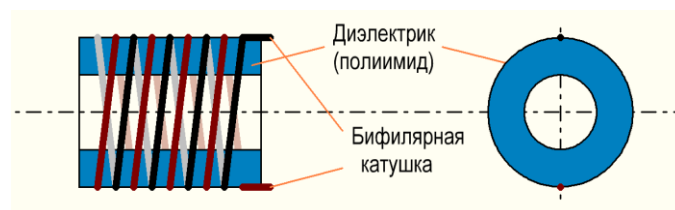


Рис. 2 Конструкция ДДП

Длина катушки датчика также составляет 25 мм. Результаты предварительных замеров катушек, выполненных на каркасах из различных диэлектриков, а также для катушки в окружении из кварцевого песка показали, что емкость датчика меняется в пределах $C_{\text{ддп}} = 22 \dots 28$ pF.

Конденсатор ДДП входит в состав последовательно колебательного контура, частота которого зависит от его емкости. На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости амплитуды колебаний в контуре от внешней частоты (АЧХ) для датчика в воздухе (сплошная линия) и в окружении речного песка (пунктир).

ДДП питается от внешнего опорного генератора с рабочей частотой 2,0 МГц (вертикальная серая линия), которая располагается слева от его резонансного пика.

Амплитуда отклика контура на рабочей частоте зависит от положения максимума и характеризует диэлектрические свойства окружающей среды. Эта амплитуда детектируется и в форме постоянной составляющей поступает в измерительный тракт прибора ТЕРМО-ЛР.

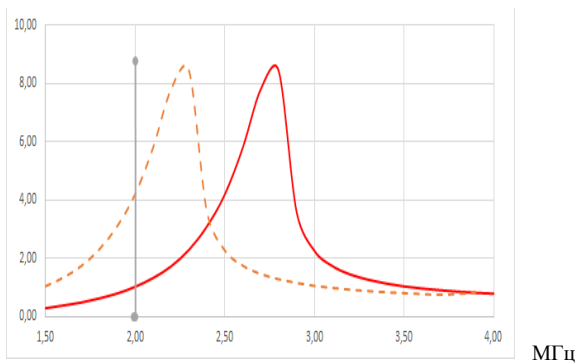


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний в контуре от внешней частоты (АЧХ) для ДДП в воздухе (сплошная линия) и в окружении речного песка (пунктир). Серым показан пик внешней рабочей частоты 2 МГц

ГЛУБИННЫЕ ТЕРМОДАТЧИКИ. СИНХРОНИЗАЦИЯ РАБОТЫ ДАТЧИКОВ ГКЗ

Связь ГКЗ и СЗУ с бортом КА обеспечивается специальной гибкой лентой длиной 3,5 м с нанесенными медными дорожками. По ленте передается электропитание на СЗУ, ДОН и ДДП и выводятся выходные сигналы датчиков. Также на ленте размещены три глубинных термодатчика (ГТД1...3), которые измеряют температуру грунта как при заглаблении СЗУ, так и в последующие 12 месяцев работы КА на Луне. Выбор ленты в качестве соединителя обусловлен требованием обеспечения плотного контакта ГТД с грунтом. При соответствующем выборе упругости ленты и наличии у нее эффекта «памяти» создается требуемый контакт. Дорожки на ленте имеют погонную емкость около 100 пФ/м. Таким образом, при длине 3,5 м лента будет обладать паразитной емкостью 300...400 пФ, которая добавится к исходной емкости Сддп и существенно снизит его эффективность.

Для исключения влияния паразитной емкости ленты предлагается разместить элементы опорного генератора и детектора в корпусе самого ДДП. В таком случае по ленте передается выходной сигнал детектора, и ее емкость не будет влиять на работу датчика.

Кроме того, возникают другие ограничения, связанные с температурными условиями перелета и работы ГКЗ на

Луне. Согласно ТЗ на ТЕРМО-ЛР разрабатываемый прибор должен сохранять работоспособность при температурах за бортом – 180...+ 170 град. Цельсия. Современная элементная база электроники в таком температурном диапазоне не работает, как и не гарантируется сохранение ее работоспособности. В связи с этим необходимо обеспечить приемлемые температурные условия для ДДП и его компонентов. Поскольку ДДП и ДОН в составе комплекса научной аппаратуры будет работать только при заглаблении СЗУ, то необходимо выдержать требуемый диапазон температур – 60...+ 130 град. Цельсия на этапе перелета КА между Землей и Луной (около 4...7 суток) с выключенным оборудованием, а также в течение первых суток после посадки на поверхность. Однако, данное ограничение частично снимается, поскольку все научные приборы КА размещаются на термостатированной платформе, а блок глубинных исследований (БГИ) с датчиками ДОН и ДДП снабжен кожухом экранно-вакуумной изоляции (ЭВТИ). Однако полностью проблема не снимается, и для окончательной оценки требуются тепловые расчеты и дополнительные испытания.

В процессе разработки ГКЗ возникла задача синхронизации работы ДОН, ДДП и СЗУ. Все элементы БГИ функционируют в одном сеансе, при заглаблении ГКЗ. Поскольку СЗУ работает в импульсном режиме с периодом 1...2 с и с большими бросками тока, то сигналы датчиков подвергаются сильным наводкам и их показания будут иметь динамические отклонения от реальных значений. Так, датчики ДДП и ДОН включены в состав колебательных контуров, настроенных на частоты 2,0 МГц и 10...25 КГц соответственно, и их работа будет заметно возмущаться при срабатывании ударного молотка СЗУ. Для обеспечения устойчивой работы датчиков и СЗУ необходимо разделить их циклы работы по времени. Для срабатывания молотка выделяется временное окно (около 300 мс), достаточное для срабатывания молотка и затухания переходных процессов в цепях питания СЗУ, когда датчики не работают (рис.3). В паузе между ударами производится последовательное включение датчиков и соответствующие измерения. Вариант поочередного включения датчиков, показанный на циклограмме, также рассматривается нами. Пауза в работе СЗУ используется также для проведения измерения температуры платиновыми датчиками ГТД1...3, расположенными на ленте. Таким образом, работа по циклограмме позволит минимизировать взаимовлияние узлов прибора.

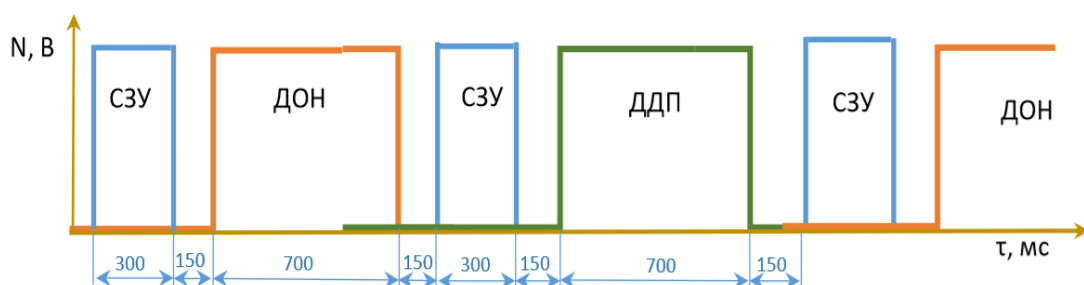


Рис. 4. Циклограмма работы СЗУ, ДОН и ДДП

В настоящее время ведутся работы по физическому моделированию ГКЗ и СЗУ. О результатах этих исследований авторы будут сообщать позже.

Выводы

Результаты проведенных работ показывают следующее:

1. Для будущего российского посадочного аппарата «Луна-Ресурс-1» предлагается использовать самозаглубляющееся устройство (СЗУ), в состав которого входит глубинный каротажный зонд (ГКЗ) с тремя типами датчиков – датчик остаточной намагниченности, датчик диэлектрической проницаемости и термодатчики.

2. Создание датчика остаточной намагниченности лунного грунта возможно на основе достаточно простого технического решения, базирующегося на эффекте изменения резонансной частоты электромагнитного контура при попадании металлических частиц в открытый магнитный зазор.

3. Реализация датчика диэлектрической проницаемости базируется на использовании «открытого» конденсатора, емкость которого зависит от диэлектрических свойств окружающей среды. Проведенные тестовые замеры на макетных образцах

катушек из различных материалов показали эффективность данного подхода.

4. При активной работе самозаглубляющегося устройства возникает задача синхронизации работы датчиков и СЗУ. Использование разделения по времени в представленной циклограмме позволяет минимизировать негативное взаимное влияние узлов прибора при последовательном переключении источников данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слюта Е.Н. Физико-механические свойства лунного грунта // *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы.* – М.: Издательство «Наука». 2014. – Том 48. – 358 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21857615>.

2. Козлова Е.А. О природе аномальных образований в полярных областях Меркурия и Луны. // *Астрономический вестник*– М.: Издательство «Наука», 2004. Том 38. –№5, – С.1-13. http://selena.sai.msu.ru/Kozl/Publications/AstVest5_04KozlovaLO.pdf.

3. Компаненко Л. Прибор для определения диэлектрической проницаемости материалов. / *Радио* – 2008. – №9, – С. 17-18. <http://nice.artip.ru/pribor-dlya-opredeleniya-dielektricheskoy-pronicaemosti-materialov>.

About of the development of a deep logging probe for the study of the lunar rocks structure on Luna-Resource-1 spacecraft

Saprykin O.A., Pogonin V.I.

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry
of Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAN),
Moscow, Russia
oleg.sapr@gmail.com

Abstract. The article deals with the problem of studying the lunar soil using a deep logging probe, lowered by means of a self-penetrating penetrator to a depth of several meters. As part of the deep logging probe, the placement of two sensors is considered - the residual magnetization sensor (DON) and the dielectric constant sensor (DDP). The principles of operation of these sensors and their design, taking into account the features of use in the working conditions of the penetrator on the moon, are proposed.

The probe is supposed to be used on board the Russian Luna-Resource-1 spacecraft (on a landing craft).

Keywords: lunar soil, regolith, deep logging probe, penetrator, residual magnetization, dielectric constant, self-deepening device, ferromagnetic properties, amplitude of oscillations, cyclorama of work, temperature conditions.

Изучение возможностей применения мобильных роботов в машиностроительном производстве

Зинина И.Н., Ильченко Е.Н.

Московский политехнический университет

Москва, Россия

i.n.zinina@mospolytech.ru, il4enkat@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается возможность применения мобильных роботов для обслуживания станков в среднесерийном и мелкосерийном производстве в качестве замены стационарных промышленных роботов. Анализируется опыт разработки мобильных роботов для разных областей применения и обосновываются преимущества мобильности в условиях гибкого производства. Для выяснения особенностей управления подобными роботами, подбора компонентов для его оптимальной конструкции и выбора подходящих датчиков, авторами проводится ряд исследований на экспериментальном образце. Макетный образец представляет из себя мобильную четырехколесную платформу с элементами контроля и управления, на которой проводятся предварительные опыты, отсеивающий и многофакторный эксперименты, создается математическая модель. Результаты проведения данных исследований и рекомендации по созданию мобильного робота приведены в выводах этой статьи.

Ключевые слова: мобильные роботы, многофакторный эксперимент, автоматизация производства.

ВВЕДЕНИЕ

Современное производство сложно представить без элементов автоматизации. Одним из наиболее простых и эффективных способов автоматизировать производственный процесс, это внедрение в процесс промышленных роботов (ПР). По данным The International Federation of Robotics [1] интерес к роботам со стороны предприятий растет с каждым годом во всем мире. В 2017 году глобальный операционный запас промышленных роботов вырос на 15%, а в дальнейшем рост этого запаса ускорится в среднем до 16% в год. По предварительным оценкам, в период с 2018 по 2021 год на предприятиях по всему миру будут установлены почти 2,1 миллиона новых ПР. Их внедрение позволяет повысить качество и точность производимой продукции, увеличить производительность и облегчить процесс работы. [2]

Однако на пути развивающегося предприятия, которое готово увеличить объемы выпускаемой продукции при помощи внедрения ПР стоит ряд препятствий с ними связанных. Чем больше производство, тем больше требуется роботов для его обеспечения, ведь у ПР весьма ограниченная рабочая область и их перемещение связано с демонтажем, что является времяемким и не всегда простым процессом. Не все предприятия, особенно средние и мелкосерийные, в состоянии позволить себе приобретение достаточного количества ПР, которые имеют весьма высокую стоимость.

Альтернативой стационарным ПР могут быть роботы,двигающиеся по направляющим [3]. Их рабочая область

значительно выше в связи с чем сокращается общее количество роботов, но монтаж и обслуживание становится значительно сложнее. Кроме того, они так же не могут покидать расширенную, но все еще ограниченную рабочую область.

В данных условиях решением могут стать мобильные роботы [4]. Помимо основных функций, таких как загрузка / выгрузка деталей и заготовок на станки, а также смена инструментов станка, мобильные роботы способны перевозить на себе детали и инструменты и обслуживать не один, а несколько станков. При смене технологических процессов и планировки таких роботов значительно проще приспособить к изменившимся условиям.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Мобильные роботы в производстве применяются еще не так широко, однако в подобных разработках многие производители роботов видят перспективу. Например, компания KUKA [5] разработала автономного робота KMR iiwa (рис.1), который с успехом сочетает в себе особенности легкого робота манипулятора LBR iiwa и подвижную платформу. Модульный принцип создания данного робота позволяет пользователям создавать подходящие для их условий конфигурации по требуемым параметрам. Он оснащен системой, которая защищает робота от столкновений с неживыми объектами, а также живые объекты от столкновения с роботом – KMR iiwa способен выполнять свои функции в производстве как совместно с человеком, так и без него. [6]



Рис. 1. Автономный робот KMR iiwa от компании KUKA

Еще один мобильный робот, а точнее система роботов Fetch и Freight представленная на рис. 2, предназначена для выполнения работ в условиях склада. Робот разделен на две отделяемые части способные функционировать как вместе, так и врозь. Fetch это манипулятор, а Freight – мобильная

база, которая используется как платформа для манипулятора и как автономная корзина для товаров. На роботе есть достаточное количество креплений, как для контейнеров, так и для датчиков – при изменении задач его можно модифицировать. [7]



Рис. 2. Роботы Fetch и Freight

Применение мобильных роботов возможно не только в области машиностроения, но и в области сельского хозяйства. Например, в 2016 году сотрудники компании Ostinion (Бельгия) представили прототип землянико- или клубничко-уборочного робота, который представляет собой автоматический манипулятор на мобильной платформе (рис. 3). При смене схвата робот можно применять для сбора и других фруктов или овощей [8].



Рис. 3. Мобильный робот для сбора клубники

Мобильные роботы в России разрабатываются для оборонной промышленности, где они являются одним из приоритетных направлений [9]. Мобильные робототехнические комплексы (РТК) создаются путем дооснащения уже существующих образцов военной техники модульным встраиванием или навесным оборудованием. Данные РТК управляются безэкипажным (дистанционным) способом [10]. Их используют для расчистки завалов, разведки, разминирования, поддержки огнем и перевозки оборудования.

Например, боевой робот (мобильный робототехнический комплекс) МРК-27 – БТ (рис. 4). Его разработало СТКБ ПР МГТУ им. Н.Э.Баумана. Всё оружие находится на специальных легкосъёмных консолях. Таким образом легко можно снять с робота оружие и закрепить другое. Эта машина очень устойчива благодаря гусеницам новой конструкции и системы уменьшения отдачи. [11]



Рис. 4. МРК-27 – БТ

Из вышесказанного можно сделать вывод что роботы на мобильных платформах универсальны и уже используются во многих областях [12]. Их применение облегчает работу человека, устраняя его из зон повышенной опасности. В связи с подвижностью и легкой перенастройкой данных роботов, для наиболее полного применения на выделенном участке их требуется в разы меньше. В промышленности подобные МРК, при должном подборе функциональных частей, обеспечат большую гибкость производства, а также позволят внедрить роботизацию в тех областях, где ранее она была неэффективна из-за высоких затрат на оборудование.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Выполняемая авторами работа направлена на создание концепции мобильного промышленного робота для обслуживания механосборочных производств. Для создания подобного робота требуется определить основные для него параметры, такие как: способ его ориентации в пространстве, способ его взаимодействия с окружающими объектами, его размеры, конфигурацию и специфику отдельных компонентов.

На основе изученной литературы определить данные параметры возможно, но для уточнения некоторых подробностей следует провести эксперименты

СОЗДАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА

Для проведения экспериментов требовалось создать модель изучаемого объекта. Создание образца в масштабе 1:1 было затруднительно по финансовым причинам, поэтому решено было создать уменьшенную модель.

Был создан макетный образец, представляющий из себя четырехколесную, полноприводную мобильную платформу.

форму с прикрепленными к ней элементами питания и контроля (рис. 5). В качестве управляющего элемента был использован контроллер Arduino Uno R3 [13], так как он является наиболее доступным и имеет достаточное количество совместимых модулей.

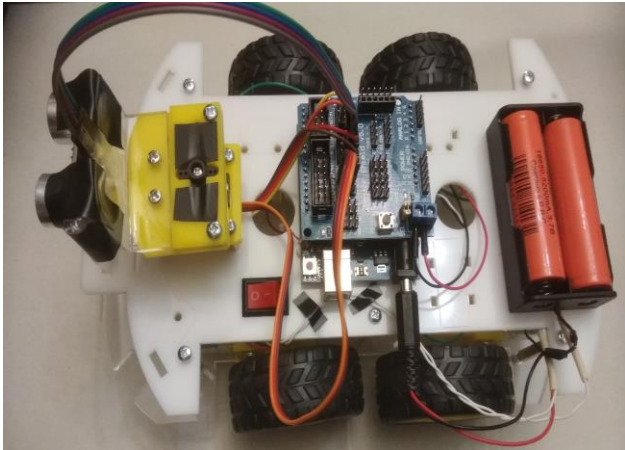


Рис. 5. Внешний вид макетного образца

Во время экспериментов предполагалось выяснить особенности управления такой платформой и особенности ориентации робота при помощи датчиков. Для этого были выбраны и добавлены к основной конструкции платформы следующие датчики разного принципа действия:

- 1) Ультразвуковой дальномер HC-SR04;
- 2) Инфракрасный детектор препятствия FC-51 (3 шт.);
- 3) Инфракрасный дальномер Sharp GP2Y0A021 [14-16].

Итоговые габариты робота составили: в длину – 260 мм, в ширину – 170 мм. Высота платформы без верхнего крепления – 56 мм. Высота платформы с ультразвуковым дальномером – 120 мм, вместе с инфракрасным дальномером – 130 мм. Дорожный просвет – 16 мм.

Первые испытания платформы были направлены на выяснение особенностей работы с платформой и факторов, влияющих на перемещение. Испытания всех датчиков проходили на одной и той же площадке, имитирующей промышленное помещение в масштабе 1:50. Платформа перемещалась [17-19] используя датчик или набор датчиков по небольшому лабиринту, состоящему из двух поворотов по 90° и должна была останавливаться в области финиша, представляющей из себя прямоугольник размером 175x265 мм (рис. 6).

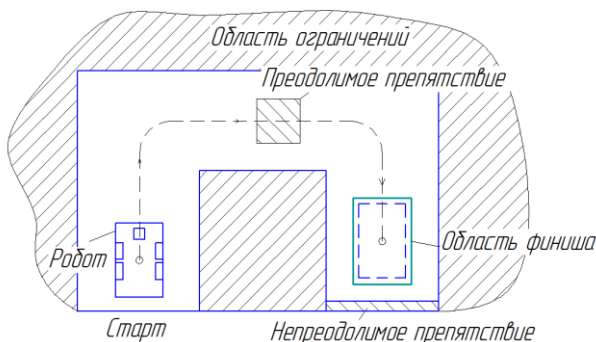


Рис. 6. Область проведения испытаний

Во время опытов на траектории робота иногда размещались препятствия, менялось освещение (естественное/искусственное), менялись настройки датчиков и программы их считывания, менялись сами датчики.

Область испытаний имела размеры 800x800 мм вместе с препятствиями, ширина прохода внутри лабиринта – 280 мм, длина от непреодолимого препятствия в области финиша до стенки лабиринта – 600 мм.

В результате предварительных испытаний были выявлены факторы влияющие на точность попадания платформы. Ими оказались:

- X₁ – Препятствия на дороге;
- X₂ – Вид датчика;
- X₃ – Освещение;
- X₄ – Цвет стенок лабиринта;
- X₅ – Дальность срабатывания датчика;
- X₆ – Скорость перемещения платформы.

Далее был проведен отсеивающий эксперимент [20], в результате которого были выявлены самые влиятельные факторы. На итоговой диаграмме ранжирования (рис. 7) показаны все представленные факторы (ось абсцисс) в порядке убывания их значимости, выраженной в процентах (ось ординат).

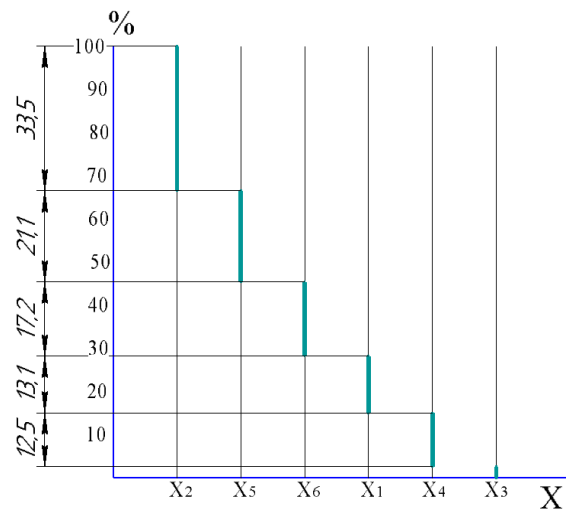


Рис. 7. Диаграмма ранжирования

Самыми влиятельными факторами оказались:

- X₂ – Вид датчика;
- X₅ – Дальность срабатывания датчика;
- X₆ – Скорость перемещения платформы;

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Далее, для выяснения взаимовлияния отобранных факторов следовало провести многофакторный эксперимент [21-23]. Перед составлением плана экспериментов на основании полученных знаний были внесены некоторые изменения. Для повышения точности опытов была изменена конфигурация датчиков (рис. 8): было добавлено по одному дополнительному ультразвуковому (HC-SR04) и инфракрасному (модель GP2Y0A41) дальномеру, так чтобы всегда один датчик смотрел вперед, а другой направо. Верхнее крепление робота с этого момента стало неподвижным.

Также было принято решение исключить фактор "дальность срабатывания", сделать его неварьируемым. Принято оно было на основании того, что для каждой области, в которой используется робот она (дальность) имеет свои оптимальные значения. Во время испытаний для каждого датчика этот фактор принимался постоянным исходя из характеристик датчика.

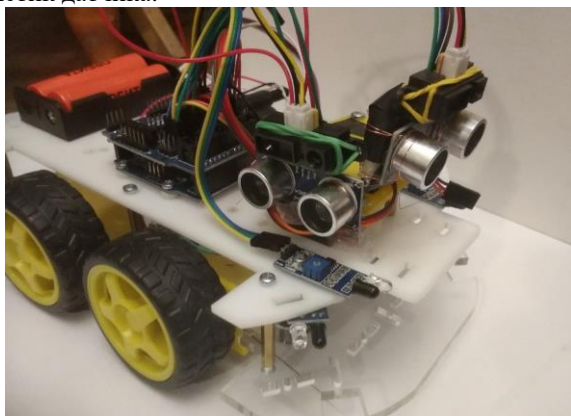


Рис. 8. Новая конфигурация датчиков

После этих изменений остается два фактора, которые можно варьировать на трех уровнях, следовательно, берется план экспериментов типа 3^2 . Число оригинальных опытов в данном случае 9. Для повышения точности показаний рекомендуется также проводить параллельные опыты, что и было сделано (по 2 дополнительных опыта). Итоговое число опытов составляет – 27.

Сначала была заполнена таблица натуральных значений факторов (табл. 1.).

Таблица 1

Натуральные значения факторов

| Факторы | Вид датчика (p) | Скорость перемещения, см/с (v) |
|----------------------|-----------------|--------------------------------|
| Обозначение | X_1 | X_2 |
| Верхний уровень (+1) | +1 | 54 |
| Основной уровень (0) | 0 | 36,5 |
| Нижний уровень (-1) | -1 | 19 |

Так как "Вид датчика" является качественным фактором его натуральные значения записываются как "+1", "0" и "-1" в соответствии с оценкой датчиков, поставленной на основании предыдущих опытов. Значение верхнего уровня (+1) соответствует набору инфракрасных дальномеров Sharp, основного уровня (0) – набору ультразвуковых дальномеров HC-SR04, а нижнего уровня (-1) – набору инфракрасных датчиков препятствий FC-51.

После этого закодированы натуральные значения – введены условные обозначения верхнего (+), нижнего (-) и основного уровня (0) для количественного фактора ("Скорость перемещения"). Затем построен план эксперимента, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования

| № | Φ_1 (p) | Φ_2 (v) | X_1 | X_2 | X_1^2 | X_2^2 | $X_1 X_2$ | $X_1^2 X_2$ | $X_1 X_2^2$ | $X_1^2 X_2^2$ |
|---|--------------|--------------|-------|-------|---------|---------|-----------|-------------|-------------|---------------|
| 1 | -1 | 19 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 2 | -1 | 36,5 | -1 | 0 | 1 | -2 | 0 | 2 | 0 | -2 |
| 3 | -1 | 54 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 4 | 0 | 19 | 0 | -1 | -2 | 1 | 0 | 0 | 2 | -2 |

| № | Φ_1 (p) | Φ_2 (v) | X_1 | X_2 | X_1^2 | X_2^2 | $X_1 X_2$ | $X_1^2 X_2$ | $X_1 X_2^2$ | $X_1^2 X_2^2$ |
|---|--------------|--------------|-------|-------|---------|---------|-----------|-------------|-------------|---------------|
| 5 | 0 | 36,5 | 0 | 0 | -2 | -2 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 6 | 0 | 54 | 0 | 1 | -2 | 1 | 0 | 0 | -2 | -2 |
| 7 | 1 | 19 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| 8 | 1 | 36,5 | 1 | 0 | 1 | -2 | 0 | -2 | 0 | -2 |
| 9 | 1 | 54 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

По данному плану проведены эксперименты, результаты которых представлены в табл. 3. Проведены дисперсионный и регрессионный анализы.

Таблица 3

Результаты экспериментов

| № | Y_1 | Y_2 | Y_3 | Y |
|---|-------|-------|-------|--------|
| 1 | 325 | 338 | 316 | 326,33 |
| 2 | 307 | 328 | 334 | 323 |
| 3 | 277 | 344 | 304 | 308,33 |
| 4 | 352 | 361 | 374 | 362,33 |
| 5 | 401 | 408 | 420 | 409,67 |
| 6 | 333 | 352 | 348 | 344,33 |
| 7 | 375 | 386 | 397 | 386 |
| 8 | 398 | 439 | 421 | 419,33 |
| 9 | 383 | 351 | 330 | 354,67 |

Математической моделью [22] данного процесса был выбран полином второй степени, который после проверки коэффициентов на значимость принимает вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{112} x_1^2 x_2 \quad (1)$$

где b_0, b_1, \dots, b_n – коэффициенты регрессии.

Модель проверена и признана адекватной.

После подстановки коэффициентов и раскодирования условных обозначений факторов:

$$y = 267,63 - 19,41p + 5,45v + 43,2p^2 - 0,077v^2 - 0,031pv^2 + 2,99pv + 0,042p^2v^2 - 3,07p^2v \quad (2)$$

где p – вид датчика, v – скорость перемещения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате обработки экспериментальных данных получен графики, показанные на рис. 9 и 10. Где каждый из рассматриваемых факторов фиксируется на нулевом уровне, которому соответствуют $v=36,5$ и $p=0$.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие общие выводы.

Наиболее подходящими для производственного робота являются инфракрасные датчики, которые лучше ставить небольшими группами – по 2-3 датчика. Шум и свет влияют на них не в достаточной степени чтобы сбивать платформу с траектории. Для повышения точности следует производить несколько измерений расстояния. Также эти датчики можно комбинировать с другими датчиками, что позволит не только роботу ориентироваться в пространстве, но и оператору отслеживать положение робота. Инфракрасные датчики многофункциональны - в сочетании с гироскопом они могут применяться для отслеживания робота и составлении карты пространства.

Робот разворачивается практически на месте из-за особенности расположения его колес, что дает ему преимущество в маневренности. Но при этом робот теряет в устойчивости. Для исправления этой ситуации на промышленном роботе следует увеличить расстояние между передними и задними колесами - до 400-500 мм. Это снизит его маневренность, так как у робота нет полноценной подвески. Улучшить маневренность можно применением всенаправленных колес, что избавит от потребности в сложной подвеске.

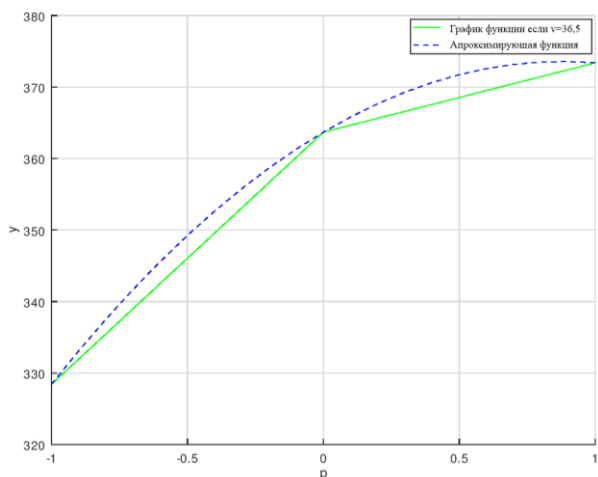


Рис. 9. График функции при $v=36,5$

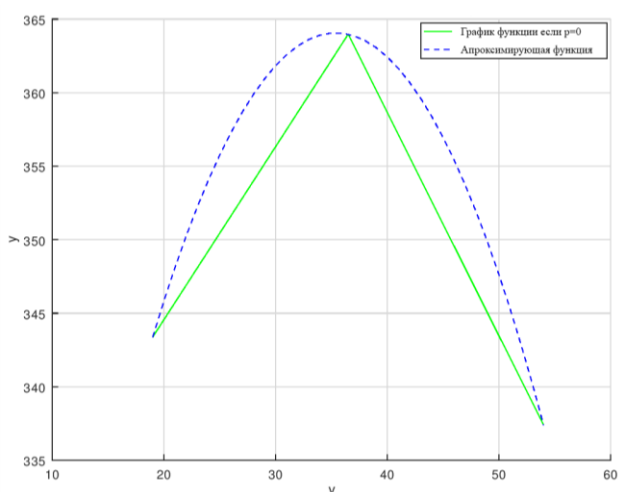


Рис. 10. График функции при $p=0$

По результатам проведения многофакторного эксперимента можно утверждать следующее:

1) Инфракрасные датчики подтверждают свою точность относительно других типов датчиков. Следом идут ультразвуковые датчики, а завершают последовательность – инфракрасные датчики препятствий. Это видно из графика при $v=36,5$.

2) Ультразвуковой датчик иногда дает сбой из-за угла отражения звука. При расположении датчика с некоторым уклоном или при препятствии, чья стенка имеет наклон датчик может не считать расстояние из-за того, что звуковая волна не попадет на приемник. Во избежание таких ситуаций можно ставить несколько датчиков на одно направление с разными углами наклона или делать несколько замеров расстояния.

3) Датчик препятствия может быть использован только в сочетании с другими типами датчиков, так как его точности недостаточно, а применение (он показывает только наличие препятствия, а не расстояние до него) весьма ограничено.

4) Оптимальной скоростью для робота является средняя скорость (36,5 см/с для модели). При высокой скорости может происходить занос платформы или ошибка считывания

датчика (он не успевает реагировать) и точность попадания ухудшается.

Малая скорость так же дает значительную поправку (в худшую сторону) точности системы. Так как скорость регулируется при помощи изменения напряжения питания, то при низкой скорости напряжение питания мало. Это значит, что на платформу начинают влиять факторы не имевшие значения при большой скорости. Так, например, при случайном зацеплении с поверхностью стены под определенным углом платформа не в состоянии сдвинуться с места. При низкой скорости платформа не обладает достаточным ресурсом мощности для преодоления препятствий. При учете что некоторые датчики могут давать ошибку такие ситуации могут происходить часто. Данные результаты видны из графика при $p=0$.

Однако лучшим решением будет усложнить программу управления так, чтобы скорость могла меняться динамически. Так при преодолении больших расстояний можно повышать скорость до максимально, а при вхождении в повороты или приближении к точке назначения постепенно снижать скорость, не опуская ее до минимальной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшая работа будет направлена на изучение способов распознавания окружающих объектов мобильными роботами для программирования более сложного взаимодействия с окружающей средой – распознавание ключевых объектов, незапланированных препятствий, как подвижных, так и неподвижных, распознавание человека. Комбинация этих данных позволит роботу отслеживать свое местоположение.

При правильном подборе компонентов и управляющих программ один мобильный робот будет в состоянии заменить несколько стационарных.

ЛИТЕРАТУРА

1. https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf (дата обращения 24.09.2018).
2. <https://utmagazine.ru/posts/7550-robototehnika-globalnye-perspektivy-samye-perspektivnye-kompanii-i-proekty> (дата обращения 20.09.2018).
3. <https://circuitdigest.com/article/what-are-industrial-manipulators> (дата обращения 11.03.2018).
4. Matsumoto K. Improvement of mobile robot navigation with surrounding environmental recognition / K. Matsumoto, S. Yotsuyaku, C. Kanamori // Conference of Kanto Branch: The Proceedings of Conference (Hokkaido University Sapporo Campus, 29-31 August 2018) – Kanto, 2018. – С. 129-138.
5. <https://www.kuka.com/ru-ru/продукция-услуги/промышленная-робототехника/промышленные-роботы/> (дата обращения 09.02.2018)
6. <https://www.kuka.com/ru-ru/продукция-услуги/мобильность/мобильные-роботы/kmr-iiwa> (дата обращения 09.02.2018)
7. https://robotics.ua/news/service_robots/4506-duet_warehouse_robots_fetch_and_freight_from_fetch_robotics (дата обращения 26.02.2018)
8. Филиппов Р.А. Робототехнические средства для сбора ягод земляники. // Мехатроника, автоматика и робототехника – 2017 – №1. – С.26-27.

9. Параскевов А.В. Современная робототехника в России: реалии и перспективы (обзор) / А.В. Параскевов, А.В. Левченко // Научный журнал КубГАУ – 2014 – №104 – С. 1680-1701.

10. Рубцов И.В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки – 2013 – №3(140). – С. 14-21.

11. <https://ntts.lt/news-boevoi-robot-mrk-27--bt-predstavlen-na-interpoliteh-2009> (дата обращения 18.03.2018)

12. Кольванов К.Ю. Перспективы мобильной робототехники // Интерэкспо Гео-Сибирь – 2017 – Т. 10 – С. 22-25.

13. <http://amperka.ru/product/arduino-uno> (дата обращения 01.05.2018)

14. <http://wiki.amperka.ru/продукты:hc-sr04-ultrasonic-sensor-distance-module> (дата обращения 03.05.2018)

15. <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-datchiki/infrakrasnyj-datchik-prepyatstvuj-yl-63/>(дата обращения 03.05.2018)

16. <http://amperka.ru/product/infrared-range-meter-80> (дата обращения 03.05.2018)

17. Михайлов Б.Б. Автономные мобильные роботы – навигация и управление / Б.Б. Михайлов, А.В. Назарова, А.С. Ющенко // Известия ЮФУ. Технические науки – 2016 – №2(175) – С. 48-67.

18. Слепокуров Ю.С. Алгоритм управления электроприводом промышленного транспортного робота / Ю.С. Слепокуров, К.А. Разинкин, Е.Н. Коровин // Вестник ВГТУ – 2011 – Т. 7, №12-3. – С. 32-35.

19. Александров В.А. Поиск целевых точек группой мобильных роботов в условиях минимальной априорной информации о рабочей среде / В.А. Александров, А.И. Кобрин // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т.3, №3. – С. 3-8.

20. Крупин А.Е. Отсеивание факторов при планировании эксперимента / А.Е. Крупин, Д.В. Зуйков // Вестник НГИЭИ – 2014 – №4 (35) – С.62-70.

21. <https://docplayer.ru/76754463-D-a-degtyarev-k-t-n-poshagovaya-metodika-provedeniya-mnogofak-tornogo-eksperimenta-vstuplenie.html> (дата обращения 10.10.2018)

22. Фокичева Е.А. Планирование эксперимента и обработка результатов исследований / Е.А. Фокичева, М.И. Алексеев – Вологда: Вологодский государственный университет, 2014. – 72 с.

23. Босов А.А. Математическое моделирование планирования экспериментов / А.А. Босов, В.В. Артемчук // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта – 2008. – №25. – С.118-121.

Exploring the Possibility of Using Mobile Robots in Engineering Production

Zinina I.N., Ilchenko E.N.

Moscow Polytechnic University

Moscow, Russia

i.n.zinina@mospolytech.ru, il4enkocat@yandex.ru

Abstract. This article discusses the possibility of using mobile robots to service machines in medium-serial and small-scale production as a replacement for stationary industrial robots. The experience of developing mobile robots for various applications is analyzed and the advantages of mobility in flexible production conditions are justified. To clarify the features of control of such robots, the selection of components for its optimal design and the selection of suitable sensors, the authors conducted a series of studies on an experimental sample. A prototype model is a mobile four-wheeled platform with elements of control and management, on

which preliminary experiments are conducted, screening and multifactorial experiments, a mathematical model is created. The results of these studies and recommendations for the creation of a mobile robot are given in the conclusions of this article.

Keywords: mobile robots, multifactorial experiment, production automation.

Математическое моделирование токов во вторичном элементе линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком для магнитнолевитационного транспорта

Соломин В.А., Соломин А.В., Замшина Л.Л.
Ростовский государственный университет путей сообщения
Ростов-на-Дону, Россия
ema@rgups.ru

Аннотация. Вопросы совершенствования современных и создания новых видов транспорта являются важными и актуальными для развития человеческого общества. Одним из наиболее перспективных и экологически чистых новых видов транспортных средств является высокоскоростной магнитнолевитационный транспорт (МЛТ), перемещающийся со скоростями порядка 500 км/час и выше. Магнитнолевитационные поезда приводятся в движение линейными двигателями, преобразующими электрическую энергию непосредственно в поступательное перемещение. Одним из основных типов тяговых машин для высокоскоростного МЛТ являются линейные асинхронные двигатели. Это подтверждает успешный пятнадцатилетний опыт коммерческой эксплуатации высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта в Китайской народной республике. В статье рассматриваются линейные асинхронные двигатели с поперечным магнитным потоком (ЛАДПП), у которых силовые линии бегущего в продольном направлении магнитного потока замыкаются в поперечном направлении. На наш взгляд, ЛАДПП наиболее перспективны для применения на высокоскоростном магнитнолевитационном транспорте. Большое влияние на величину тягового усилия ЛАДПП оказывает распределение тока во вторичном элементе (ВЭ), играющем роль якоря. В статье представлены результаты математического моделирования тока во вторичном элементе тягового линейного двигателя на основе уравнений Максвелла. Для анализа приняты допущения о равномерности распределения магнитной индукции в воздушном зазоре в поперечном направлении и синусоидальности ее в продольном направлении, позволившие разработать математическую модель распределения тока во вторичном элементе, в том числе и при различном взаимном расположении индуктора ЛАДПП относительно ВЭ.

Ключевые слова: линейный асинхронный двигатель, поперечный магнитный поток, токи во вторичном элементе, линии тока во вторичном элементе.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возродился на новой ступени интерес к магнитнолевитационным технологиям на транспорте. Магнитнолевитационные технологии для транспорта могут стать прорывными и повысить на порядок провозную и пропускную способности новых транспортных систем при повышении степени комфорта пассажиров и высокой скорости перемещения грузов. Интенсивные работы в области создания и исследования высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта выполняются в Российской Фе-

дерации в Санкт-Петербурге [1–7]. Новыми видами транспорта начали заниматься и Российские железные дороги [8].

В качестве тяговых машин высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта на современном этапе целесообразно использовать линейные асинхронные двигатели.

Распределение токов во вторичном элементе линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком оказывает значительное влияние на величину его тягового усилия и на работу высокоскоростного МЛТ. Поэтому исследование распределения токов во ВЭ ЛАДПП является достаточно актуальной научной задачей. Решение подобной задачи для линейного асинхронного двигателя с продольным магнитным потоком описано в [9]. Заметный вклад в изучение этой научно-технической проблемы был внесен Т.К. Калниным [10], который, исследуя причины ослабления тягового усилия ЛАДПП, получил выражение для расчета плотности тока в поперечном направлении. Распределение токов во вторичном элементе тягового ЛАДПП исследовано в [20], опираясь на результаты, полученные в [11–19], удалось получить соотношения, определяющие картину линий тока во вторичном элементе линейной машины.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Следующий шаг, предпринятый авторами, позволяющий более точно исследовать физические процессы во вторичном элементе ЛАДПП для более общего случая, при котором учитывается относительное расположение индуктора линейного двигателя относительно ВЭ. Рассматривается линейный асинхронный двигатель, токи трехфазной обмотки индуктора которого создают бегущее в продольном направлении магнитное поле, а силовые линии этого магнитного поля замыкаются в поперечном направлении. Вторичный элемент данного ЛАДПП состоит из электропроводящей части, расположенной на ферромагнитном сердечнике. Решение задачи для более общего случая позволит с большей степенью точности рассчитывать линейные асинхронные тяговые двигатели с поперечным магнитным потоком.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Линейный асинхронный двигатель с поперечным магнитным потоком схематично представлен на рис. 1.

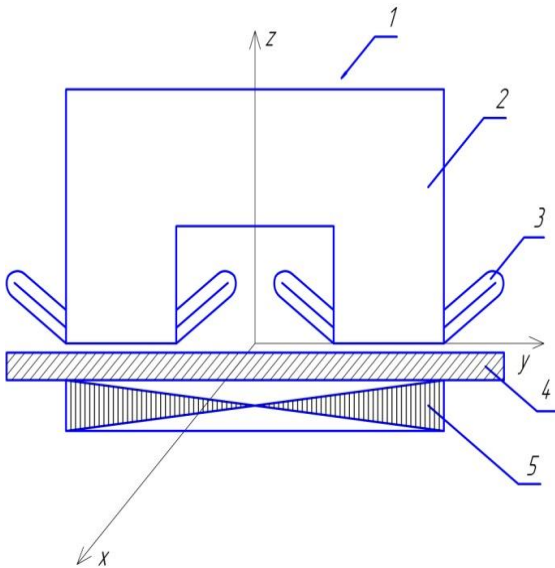


Рис. 1. Поперечное сечение ЛАДПП: 1 – индуктор; 2 – сердечник индуктора; 3 – обмотка индуктора; 4 – электропроводящая часть вторичного элемента; 5 – сердечник вторичного элемента; X, Y, Z – оси координат

На рис. 2 представлена (вид сверху) схема относительного расположения индуктора и электропроводящей части вторичного элемента ЛАДПП. Электропроводящая часть ВЭ разбита на шесть областей, причем области 1, 2 и 3 соответственно одинаковы по величине симметричным областям 4, 5 и 6 (эти цифры на рис. 2 не показаны). Размеры данных областей обозначены на рис. 2 символами b_1 , b_2 и b_3 , а половина ширины активной части индуктора обозначена $-2b$. Возможная не симметрия обусловлена тем, что для данного двигателя не всегда выполняется следующее равенство $b_1 = b_3 - b_2$. В связи с этим, необходимо рассмотреть три независимые области 1, 2 и 3 (рис. 2). Распределение токов в областях 4, 5 и 6 с учетом смысла происходящих в двигателе физических процессов является зеркальным отражением распределения токов в первых трех областях. Поэтому дальнейший анализ будет проводиться лишь для областей 1, 2 и 3.

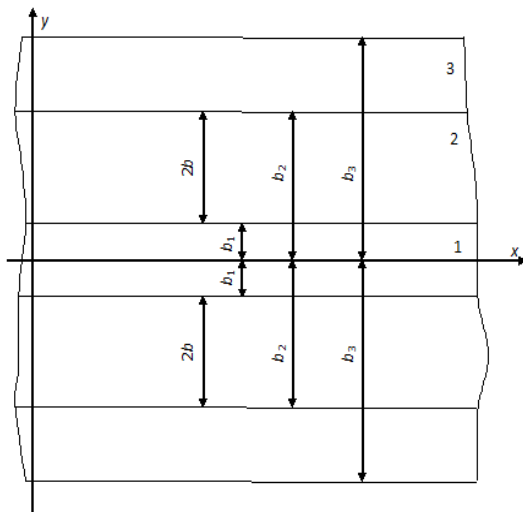


Рис. 2. Схема относительного расположения индуктора и вторичного элемента ЛАДПП

Для определения токов во вторичном элементе принимаем допущение о том, что магнитная индукция распределена равномерно в пределах области 2 в направлении оси «y» и синусоидально изменяется в направлении оси «x». Кроме того, полагаем, что в областях 1 и 3 величина магнитной индукции равна нулю. При анализе учитывается лишь составляющая магнитной индукции, перпендикулярная плоскости чертежа, т.е. $B = B_z$.

Таким образом, в области 2 вторичного элемента линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком имеет место следующее соотношение

$$B = B_z = -B_M \cos(\alpha x - \omega t), \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{\pi}{\tau}$; τ – полюсное деление ЛАДПП.

В областях 1 и 3 вторичного элемента двигателя величина магнитной индукции

$$B = B_z = 0. \quad (2)$$

Пренебрегая токами смещения, можно на основании уравнений Максвелла записать для данного случая

$$\text{rot} \bar{\delta} = -\gamma \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

где δ – плотность тока в электропроводящей части ВЭ; γ – ее электрическая проводимость.

Поскольку во вторичном элементе ЛАД с поперечным магнитным потоком нет источников энергии, то справедливо следующее соотношение

$$\text{div} \bar{\delta} = 0. \quad (4)$$

Полагая двумерным распределение токов во вторичном элементе, применим первое из вышеприведенных уравнений последовательно к каждой области вторичного элемента.

Область 1

$$\frac{\partial \delta_{y1}}{\partial x} - \frac{\partial \delta_{x1}}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Область 2

$$\frac{\partial \delta_{y2}}{\partial x} - \frac{\partial \delta_{x2}}{\partial y} = -\gamma \frac{\partial B_z}{\partial t}. \quad (6)$$

Область 3

$$\frac{\partial \delta_{y3}}{\partial x} - \frac{\partial \delta_{x3}}{\partial y} = 0. \quad (7)$$

Принцип непрерывности линий тока в каждой из областей вторичного элемента позволяет получить еще три уравнения.

Область 1

$$\frac{\partial \delta_{x2}}{\partial x} + \frac{\partial \delta_{y2}}{\partial y} = 0. \quad (8)$$

Область 2

$$\frac{\partial \delta_{x2}}{\partial x} + \frac{\partial \delta_{y2}}{\partial y} = 0. \quad (9)$$

Область 3

$$\frac{\partial \delta_{x3}}{\partial x} + \frac{\partial \delta_{y3}}{\partial y} = 0. \quad (10)$$

Общие решения для уравнений токов должны удовлетворять как дифференциальным уравнениям, так и граничным условиям, так как в данном случае рассматриваем краевую задачу. Сначала найдем решение, удовлетворяющее дифференциальным уравнениям в более общем виде, а затем определим неизвестные постоянные интегрирования из граничных условий.

Общие решения для токов во вторичном элементе, удовлетворяющие дифференциальным уравнениям, могут быть представлены следующим образом.

Область 1

$$\begin{aligned} \delta_{x1} &= A_1 \operatorname{ch} \alpha y \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\ \delta_{y1} &= A_2 \operatorname{sh} \alpha y \cdot \cos(\alpha x - \omega t). \end{aligned} \quad (11)$$

Область 2

$$\begin{aligned} \delta_{x2} &= A_3 \operatorname{sh} \alpha(\beta_1 - y) \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\ \delta_{y2} &= \left[A_4 \operatorname{ch} \alpha(\beta_1 - y) - \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \right] \cdot \cos(\alpha x - \omega t). \end{aligned} \quad (12)$$

Область 3

$$\begin{aligned} \delta_{x3} &= A_5 \operatorname{ch} \alpha(b_3 - y) \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\ \delta_{y3} &= A_6 \operatorname{sh} \alpha(b_3 - y) \cdot \cos(\alpha x - \omega t). \end{aligned} \quad (13)$$

Величина β_1 определяет значение ординаты «у», при которой плотность тока в направлении оси «х» равна нулю. Величина β_1 определяется из граничных условий также, как и постоянные интегрирования A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 и A_6 .

Неизвестные постоянные интегрирования в полученных уравнениях определяются из дополнительных условий.

Первым таким условием является непрерывность линий тока, которая выражается следующим соотношением

$$\operatorname{div} \bar{\delta} = 0. \quad (14)$$

В результате использования принципа непрерывности линий тока во вторичном элементе ЛАДПП для областей 1, 2 и 3 получены соотношения

$$A_1 = -A_2; A_3 = A_4; A_5 = A_6.$$

После ряда преобразований соотношения для определения постоянных интегрирования получены в виде

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \cdot \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha b_1 \cdot \operatorname{cth} \alpha(\beta_1 - b_1) + \operatorname{sh} \alpha b_1}; \\ A_3 &= \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \cdot \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha(\beta_1 - b_1) + \operatorname{th} \alpha b_1 \cdot \operatorname{sh} \alpha(\beta_1 - b_1)}; \\ A_5 &= \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \cdot \frac{1}{\operatorname{cth} \alpha(\beta_1 - b_2) \operatorname{ch} \alpha(b_3 - b_2) - \operatorname{sh} \alpha(\beta_3 - b_2)}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{где } \beta_1 = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arth} \left[\operatorname{cth} \alpha b_3 - \frac{\operatorname{ch} \alpha(b_3 - b_2)}{\operatorname{ch} \alpha b_1 \cdot \operatorname{sh} \alpha b_3} \right].$$

Таким образом, соответственно областям вторичного элемента (рис. 2) получены следующие соотношения для плотностей токов вторичного элемента ЛАД.

Область 1

$$\begin{aligned} \delta_{x1} &= \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \cdot \frac{\operatorname{ch} \alpha y}{\operatorname{ch} \alpha b_1 \cdot \operatorname{cth} \alpha(\beta_1 - b_1) + \operatorname{sh} \alpha b_1} \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\ \delta_{y1} &= -\frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \cdot \frac{\operatorname{sh} \alpha y}{\operatorname{ch} \alpha b_1 \cdot \operatorname{cth} \alpha(\beta_1 - b_1) + \operatorname{sh} \alpha b_1} \cdot \cos(\alpha x - \omega t). \end{aligned} \quad (16)$$

Область 2

$$\begin{aligned} \delta_{x2} &= \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \cdot \frac{\operatorname{sh} \alpha(\beta_1 - y)}{\operatorname{ch} \alpha(\beta_1 - b_1) + \operatorname{th} \alpha b_1 \cdot \operatorname{sh} \alpha(\beta_1 - b_1)} \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\ \delta_{y2} &= \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \left[\frac{\operatorname{ch} \alpha(\beta_1 - y)}{\operatorname{ch} \alpha(\beta_1 - b_1) + \operatorname{th} \alpha b_1 \cdot \operatorname{sh} \alpha(\beta_1 - b_1)} - 1 \right] \cdot \cos(\alpha x - \omega t). \end{aligned} \quad (17)$$

Область 3

$$\begin{aligned} \delta_{x3} &= \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \cdot \frac{\operatorname{ch} \alpha(\beta_3 - y)}{\operatorname{ch} \alpha(b_3 - b_2) \operatorname{cth} \alpha(\beta_1 - b_1) - \operatorname{sh} \alpha(b_3 - b_2)} \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\ \delta_{y3} &= \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \cdot \frac{\operatorname{sh} \alpha(b_3 - y)}{\operatorname{ch} \alpha(b_3 - b_2) \cdot \operatorname{cth} \alpha(\beta_1 - b_2) - \operatorname{sh} \alpha(\beta_3 - b_2)} \cdot \cos(\alpha x - \omega t). \end{aligned} \quad (18)$$

Используя полученные результаты, выполним ряд преобразований с целью построения линии тока во вторичном элементе ЛАДПП.

Первым этапом расчета линий токов является определение величины полного тока вторичного элемента в пределах полюсного деления ЛАДПП. Принципиально, его величина может быть найдена в любом сечении вторичного элемента. Однако, наиболее удобными сечениями электропроводящей части вторичного элемента являются такие, в которых одна из составляющих плотности тока равна нулю.

Имеется два таких сечения в пределах половины полюсного деления ЛАДПП.

Первое из них расположено на уровне $y = \beta_1$ в пределах от $x =$

0 до $x = \tau/2$, как это представлено на рис. 2. В этом сечении имеет место лишь y – составляющая плотности тока.

Второе сечение расположено на уровне $x = \tau/2$ в пределах от $y = \beta_1$ до $y = b_3$, и в нем имеет место только x – составляющая плотности тока.

Ток в первом сечении ВЭ определяется соотношением

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\tau/2} \delta_{y2} \Big|_{y=\beta_1} \cdot dx = \int_0^{\tau/2} \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \left(\frac{\operatorname{ch} \alpha b_1}{\operatorname{ch} \alpha \beta_1} - 1 \right) \cdot \cos \alpha x dx = \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha^2} \left(\frac{\operatorname{ch} \alpha b_1}{\operatorname{ch} \alpha \beta_1} - 1 \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Во втором сечении ВЭ выражение для тока представляется в виде двух слагаемых

$$\begin{aligned}
I &= \int_{\beta_1}^{b_2} \delta_{x_2} \Big|_{x=\frac{\tau}{2}} \cdot dy + \int_{b_2}^{b_3} \delta_{x_3} \Big|_{x=\frac{\tau}{2}} \cdot dy = \\
&= \int_{\beta_1}^{b_2} \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \cdot \frac{\text{ch} \alpha b_1}{\text{ch} \alpha \beta_1} - \text{sh} \alpha (\beta_1 - y) dy + \\
&+ \int_{b_2}^{b_3} \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha} \cdot \frac{\text{sh} \alpha (\beta_1 - b_2)}{\text{ch} \alpha (b_3 - \beta_1)} \cdot \text{ch} \alpha (b_3 - y) dy = \\
&= \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha^2} \left(\frac{\text{ch} \alpha b_1}{\text{ch} \alpha \beta_1} - 1 \right).
\end{aligned} \quad (20)$$

Равенство токов в первом и во втором сечениях служит подтверждением правильности выполненных преобразований.

Положим, что в пределах полюсного деления необходимо иметь n_1 трубок тока. Тогда уравнение линии, ограничивающей k_1 трубок тока, будет иметь следующий вид

$$\begin{aligned}
\int_0^x \delta_{y_2} dx &= \frac{k_1}{n_1} \cdot \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha^2} \left(\frac{\text{ch} \alpha b}{\text{ch} \alpha b_1} - 1 \right) = \\
&= \frac{\omega \gamma B_M}{\alpha^2} \left[\frac{\text{ch} \alpha b_1}{\text{ch} \alpha \beta_1} \cdot \text{ch} \alpha (b_1 - y) - 1 \right] \sin \alpha x.
\end{aligned} \quad (21)$$

На основании вычислений построены линии тока во вторичном элементе тягового линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком, показанные на рисунках (рис. 3 и 4).

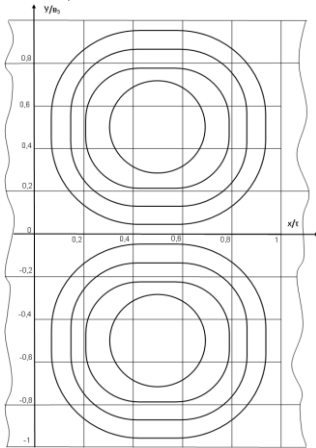


Рис. 3. Линии тока вторичного элемента ЛАДПП при полной симметрии расположения индуктора относительно вторичного элемента

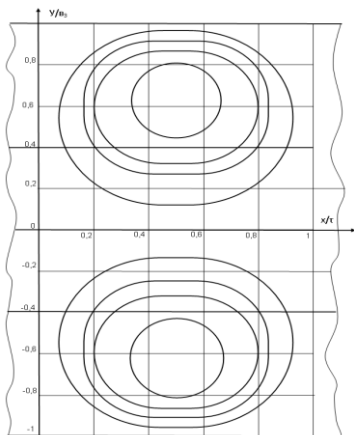


Рис. 4. Линии тока вторичного элемента ЛАДПП при несимметричном расположении индуктора относительно вторичного элемента

ВЫВОД

В результате решения полевой задачи и выполненного анализа полученных соотношений становится возможным более точное определение плотностей тока в различных областях вторичного элемента, расчет и построение линий токов во вторичном элементе линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком, в том числе при поперечном смещении индуктора относительно вторичного элемента. Полученные результаты позволяют повысить точность расчета тяговой линейной машины для высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта и выбирать рациональные геометрические соотношения ЛАДПП уже на стадии предварительного проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю.Ф. Магнитнолевитационная транспортная технология: монография / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев и др.; под ред. В.А. Гапановича – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2014. – 476 с.
2. Зайцев А.А. Транспорт на магнитном подвесе: монография / А.А. Зайцев, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова. – СПб.: ПГУПС. – 2010. – 160 с.
3. Антонов Ю.Ф. Магнитнолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / Ю.Ф. Антонов, А. А. Зайцев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с.
4. Зайцев А.А. Магнитнолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны: монография / А. А. Зайцев, Е. И. Морозова, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова. – СПб.: Изд-во ООО «Типография «НП-Принт», 2015. – 140 с.
5. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитнолевитационного транспорта // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 12. – С. 62 – 65.
6. Зайцев А.А. Магнитнолевитационные транспортные системы и технологии // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69–73.
7. Антонов Ю.Ф. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев, Е. И. Морозова // Известия ПГУПС. – 2014. – № 4 (41). – С. 5–15.
8. Лapidус Б.М. Железнодорожный транспорт: философия будущего / Б.М. Лapidус, Л.В. Лapidус. – М.: Прометей, 2015. – 232 с.
9. Соломин В.А. Математическое моделирование токов во вторичном элементе линейного асинхронного двигателя с продольным магнитным потоком для высокоскоростного транспорта / В.А. Соломин, А.В. Соломин, П.Г. Колпахчян, Н.А. Трубицина // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 40 – 44.
10. Калнинь Т.К. Линейные индукционные машины с поперечным магнитным потоком: монография. – Рига: Зинатне, 1980. – 170 с.
11. Соломин В.А. Линейные асинхронные двигатели для тяговых и тормозных устройств подвижного состава: монография / В.А. Соломин, А.В. Соломин. – Ростов н/Д: РГУПС, 2001. – 104 с.

12. Соломин А.В. Основы теории комбинированных тягово-тормозных устройств подвижного состава на базе линейных асинхронных двигателей: монография. – Ростов н/Д: РГУПС, 2002. – 104 с.

13. Соломин А.В. Математическое моделирование линейных асинхронных двигателей для тяговых и тормозных устройств высокоскоростного транспорта: монография. – Ростов н/Д: – 2008. – 204 с.

14. Соломин В.А. Тяговые и подъемные усилия линейного асинхронного двигателя для высокоскоростного транспорта / В.А. Соломин, А.В. Соломин, Л.Л. Замшина // Вестник РГУПС. – 2004. – № 3. – С. 117-119.

15. Соломин А.В. Линейный асинхронный двигатель для высокоскоростной транспортной системы на магнитной подвеске / А.В. Соломин // Вестник РГУПС. – 2004. – № 4. – С. 41-44.

16. Соломин А.В. Математическое моделирование плотности тока индуктора линейного асинхронного двигателя для высокоскоростного транспорта // Вестник РГУПС. – 2008. № 1. – С. 127-135.

17. Соломин А.В. Вихревые токи в рельсе, индуктированные бегущим магнитным полем индуктора линейного асинхронного двигателя // Вестник РГУПС. – 2000. – № 3. – С. 80-85.

18. Соломин А.В. Силовое взаимодействие индуктора электромагнитного модуля и рельса / А.В. Соломин, А.В. Костюков // Вестник РГУПС. – 2003. – № 1. – С. 31-33

19. Соломин А.В. Коэффициент дифференциального рассеяния линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком / А.В. Соломин, Д.Ф. Голубев // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2003. – № 11-12. – С. 89-95.

20. Соломин В.А. Линейные асинхронные тяговые двигатели для высокоскоростного подвижного состава и их математическое моделирование: монография / В.А. Соломин, Л.Л. Замшина, А.В. Соломин. – М.: «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 164 с.

Mathematical Modeling of Currents in the Secondary Element of a Linear Induction Motor with a Transverse Magnetic Flux for Magnetic-levitation Transport

Solomin V.A., Solomin A.V., Zamshina L.L.

Rostov State Transport University
Rostov - on - Don, Russia
ema@rgups.ru, vag@rgups.ru

Abstract. The issues of improving modern and creating new types of transport are important and relevant for the development of human society. One of the most promising and environmentally friendly new types of vehicles is high-speed magnetic-levitation transport (MLT), moving at speeds of the order of 500 km/h and above. Magnetic-levitation trains are driven by linear motors that convert electrical energy directly into translational motion. One of the main types of traction machines for high-speed MLT are linear induction motors. This confirms the successful fifteen years of experience in the commercial operation of high-speed magnetic-levitation transport in the People's Republic of China. The article discusses linear induction motors with transverse magnetic flux (LIMTF), in which the power lines of the magnetic flux running in the longitudinal direction are closed in the transverse motion direction. In our opinion, LIMTF are the most promising for use in high-speed magnetic-levitation transport. A large influence on the magnitude of tractive effort LIMTF has a current distribution in

the secondary element (SE), which plays the role of an anchor. The article presents the results of mathematical modeling of the current in the secondary element of a traction linear motor based on Maxwell's equations. For the analysis, assumptions were made about the uniform distribution of magnetic induction in the air gap in the transverse direction and its sinusoidal direction in the longitudinal direction, which allowed developing a mathematical model of the current distribution in the secondary element, including with different relative positions of the LIMTF inductor relative to SE.

Keywords: linear induction motor, transverse magnetic flux, currents in the secondary element, current lines in the secondary element.

Определение параметров трехфазных асинхронных двигателей

Бурков А.Ф.

ФГОУ ВО «Дальневосточный
федеральный университет»
Владивосток, Россия
burkov.22@mail.ru

Красковский М.В.

ФГБУН «Институт проблем
морских технологий»
Дальневосточного отделения
Российской академии наук
Владивосток, Россия
mikhail51289@yandex.ru

Юрин В.Н.

ФБГОУ ВО «Морской
государственный университет
имени Г.И. Невельского»
Владивосток, Россия
yurinvn@ya.ru

Аннотация. К необходимым условиям научно-технического прогресса относятся исследования поведения различных объектов, процессов и явлений методами теории подобия и моделирования. В области теории электрических машин, в частности электродвигателей (ЭД), представляются актуальными вопросы исследования и разработки методик расчета их констант и переменных, которые необходимы во многих случаях в качестве исходных данных при аналитических исследованиях ЭД и электроприводов (ЭП) в целом как электромеханических систем различной степени сложности. В настоящее время наиболее широкое распространение в различных отраслях хозяйственной деятельности получили ЭП с асинхронными двигателями (АД). Обзор и анализ вариантов моделей позволяет сделать вывод о том, что в пределах поставленных задач целесообразно использовать математическое моделирование, которое позволяет избежать комплекса затрат, необходимых при непосредственных натурных исследованиях. В работе на основании предложенных аналитических выражений разработан алгоритм расчета параметров схемы замещения широко используемых трехфазных АД, необходимых в качестве исходных данных при математическом моделировании процессов.

Ключевые слова: алгоритм расчетов, асинхронный двигатель, векторная диаграмма, параметры электрических машин, схема замещения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Теория подобия в общем случае дает возможность установить наличие геометрического, аффинного, физического или математического подобия или позволяющая разработать способы получения его, Веников [1]. Выявляемые теорией подобия соотношения между оригиналом и моделью могут быть различными (от масштабных при геометрическом подобии – до сложных функциональных зависимостей групп параметров сопоставляемых объектов при математическом моделировании).

Метод моделирования, соответственно, представляет собой метод опосредованного познания объективной реальности, которая проявляется в виде взаимосвязанной совокупности свойств объекта исследований, отражающей различные аспекты его взаимодействия с внешней средой, существования и развития.

Построение математических моделей и формализация связей между ее компонентами или элементами компонентов позволяет выявлять пробелы в функциональных характеристиках объектов, ставить задачи конкретных исследований и способствует их решению.

ЭП можно условно представить системами, включающими совокупность компонентов, которые рассматриваются, как единое целое и организованы для решения определенных функциональных задач так, что два любых их компонента связаны между собой некоторым отношением. В системе могут быть выделены подсистемы, которые являются относительно самостоятельными частями и принимаются в данной постановке задачи неделимыми на более мелкие составляющие.

Совокупность процессов, сопутствующих функционированию или поведению системы и проявляющихся в виде изменений состояний или режимов этой системы понимается как явление. Переходные и установившиеся режимы системы (ЭП) представляют состояния, определяющиеся множеством различных процессов и зависящие от собственных параметров системы и параметров возмущающих воздействий.

При переходных режимах происходят непрерывные последовательные изменения параметров, обусловленные изменением начальных условий или появлением возмущающих воздействий, и приводящие к отклонениям режимов от их установившихся значений.

К основным компонентам ЭП относятся ЭД, предназначенные для преобразования электрической энергии в механическую, необходимую для функционирования механизмов по назначению, Бурков [2].

Характерными особенностями переходных режимов ЭП (разгонов, изменений скорости, торможений и реверсов) являются электромагнитные и механические переходные процессы в ЭД и в других составных частях ЭП, которые сопровождаются различными изменениями составляющих токов, вращающих моментов и скоростей относительно значений, соответствующих статическим режимам. Наиболее тяжелыми переходными режимами ЭП, которые формируются системами управления, являются реверсы.

Включение трехфазных асинхронных ЭД сопровождается значительными увеличениями токов, потребляемых ими из сети. В частности, кратность пусковых токов трехскоростных АД широко используемой отечественной серии «МАП» для ЭП судовых якорно-швартовых механизмов, например, на высоких скоростях достигает значений, близких к десяти, а для ЭП грузоподъемных механизмов – более пяти. Пусковые моменты двигателей

серии «МАП» для ЭП указанных групп на низких скоростях достигают максимальных значений моментов ЭД, Богословский [3].

Изменения скорости ЭП сопровождаются меньшими, по сравнению с пусковыми переходными режимами, изменениями токов и моментов ЭД. Уменьшение скорости ЭП обусловлено отключениями от сети, переключениями на более низкие скорости или работой ЭД в режимах электрических торможений.

Таким образом, определяющее значение при исследованиях режимов работы ЭП имеют исследования основных процессов в ЭД, являющихся основными частями ЭП.

Обзор и анализ вариантов моделей позволяет сделать вывод о том, что при комплексной оценке ЭД в пределах поставленных задач целесообразно использовать математическое моделирование, а с целью проверки адекватности аналитических исследований – физическое моделирование.

К основным исходным данным при математическом моделировании относятся электромагнитные, механические и конструктивные параметры АД.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При аналитических исследованиях электромагнитных и электромеханических процессов ЭД, представляющих собой динамические системы, необходимо определение их начального состояния. Точность результатов математических моделей определяется корректностью аналитических выражений, количеством и качеством принятых допущений.

В качестве необходимых условий при исследованиях АД широко используются разнообразные схемы их замещения, Вольдек [4], Иванов-Смоленский [5] и др.

Выполненный ранее анализ ЭП, используемых в различных отраслях хозяйственной деятельности показал, что подавляющее большинство АД, входящих в состав ЭП, являются трехфазными с короткозамкнутой роторной обмоткой. Обмотка статора соединена в «звезду» без нулевого провода. Многоскоростные ЭД с отдельными или полюсопереключаемыми обмотками собираются в «звезду» как минимум на одной из ступеней скорости.

Эти замечания являются исходными при постановке задачи определения следующих параметров трехфазных АД: активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора ($R_s, X_{s\sigma}$); активного (R_m) и индуктивного (X_m) сопротивления контура намагничивания; активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния обмотки ротора ($R_r', X_{r\sigma}'$), приведенных к статорной цепи; взаимной индуктивности (L_m); индуктивностей рассеяния обмоток статора и ротора ($L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$).

Известны работы, в которых параметры для ограниченного перечня АД определяются аналитически, Усольцев [6], Гридин [7], или приводятся проектные для определенных серий двигателей, Кравчик [8].

Однако даже выпускаемые однотипные ЭД серии имеют целый ряд фактических параметров, которые от-

личаются по отношению к паспортным данным, определяемым техническими условиями. Кроме того, в ЭП используются различные ЭД как отечественного, так и зарубежного производства, необходимые паспортные данные которых не всегда отражены в технической документации.

Таким образом, представляется актуальной задача расширения возможностей определения исходных констант и переменных трехфазных АД.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

При использовании схем замещения для количественного определения параметров АД выполняется аналитическое приведение роторной цепи двигателя к цепи статора с учетом известных условий, Вольдек [4], Иванов-Смоленский [5].

Наиболее удобной для определения параметров в пределах поставленных задач является Г-образная схема замещения, в которой зажимы параллельной цепи Г-образной схемы вынесены на первичные выводы 1 и 2 (рис. 1), Вольдек [4].

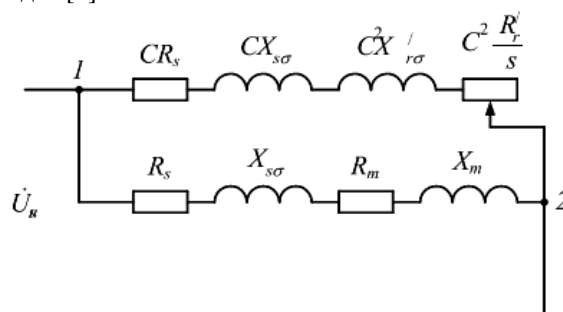


Рис. 1. Г-образная схема замещения фазы трехфазного АД

Необходимо отметить, что в общем случае параметры АД не являются постоянными, так как

$$X_{s\sigma} = f(i_s), R_r = f(\omega_r), X_{r\sigma} = f(i_s), X_m = f(\Phi), \quad (1)$$

где i_s – мгновенное значение тока статора; ω_r – угловая скорость ротора; Φ – основной магнитный поток.

Строго говоря, значения параметров схемы замещения АД будут соответствовать номинальному функциональному режиму работы, и рассчитываться с погрешностями, которые увеличиваются при возрастающих отклонениях режимов работы двигателя от номинального. Достоверность получаемых исходных данных зависит от качества напряжения питания обмотки статора (его частоты, гармонического состава, степени асимметрии и др.) и класса точности используемых измерительных приборов.

Исходными данными для определения параметров АД при известных допущениях являются данные опыта холостого хода (фазное напряжение обмотки статора U_{s0} , ток статора I_{s0} , потребляемая активная мощность P_0 и угловая скорость электромагнитного поля статора ω_0 , значение $\cos \varphi_0$) и номинального режима (фазное напряжение статора U_{sn} , ток статора I_{sn} , угловая скорость ротора ω_{rn} , мощность на валу P_{2n} и значение $\cos \varphi_n$).

Эти данные определяются по опыту холостого хода и при номинальном моменте сопротивления на валу ЭД.

Кроме того, к исходным константам относится число пар полюсов p и число фаз m_s обмотки статора АД.

В большинстве случаев существует взаимосвязь между напряжениями U_{s0} и U_{sh} ($U_{s0} \approx U_{sh}$). К исключениям относятся измеряемые фазные напряжения статора при экспериментальных определениях недостающих исходных данных холостого хода – I_{s0} и P_0 .

Потребляемая активная мощность P_H у трехфазных АД определяется как

$$P_H = m_s U_{sh} I_{sh} \cos \varphi_H. \quad (2)$$

Активное сопротивление R_s может быть рассчитано аналитически или определено экспериментально.

Расчетное значение активного фазного сопротивления статора R_s может быть получено из выражения мощности номинальных потерь

$$\chi_{pH} P_H - P_{2H} = I_{sh}^2 R_s, \quad (3)$$

где $\chi_{pH} < 1$ – коэффициент, учитывающий мощность магнитных потерь.

При экспериментальном определении сопротивления R_s необходимы измерения рабочей температуры обмоток ЭД ϑ_p и температуры ϑ_u , при которой производились эксперименты.

Измерение сопротивления R_{su} целесообразно производить на постоянном токе, в частности по методу амперметра и вольтметра, учитывая симметричность сопротивлений отдельных фаз, Бурков [9].

В этом случае,

$$R_s = \left(\frac{k_g + \vartheta_p}{k_g + \vartheta_u} \right) R_{su}, \quad (4)$$

где k_g – коэффициент пропорциональности, Вольдек [4].

На рис. 2 представлена векторная диаграмма широко используемого трехскоростного АД типа «МАП» (МАП 721-4/8/16) [10] при работе в двигательном режиме и изменении момента от холостого хода (M_0) до номинального значения (M_n), где Φ_m^* , B_m^* , I_0^* , I_{s0}^* , I_{r0}^* , U_{sh}^* , I_{sh}^* , E_{sh}^* , I_{rH}^* , E_{rH}^* – масштабированные амплитудные значения комплексов магнитного потока, индукции, тока идеального холостого хода, тока статора и ротора при моменте нагрузки M_c номинального напряжения, электродвижущей силы (ЭДС), тока статора и ротора, соответственно.

В Г-образной схеме замещения АД (рис. 1) вектор тока I_r связан с вектором тока ротора I_r' Т-образной схемы, приведенного к цепи статора, следующим соотношением:

$$I_r = \frac{I_r'}{C}. \quad (5)$$

Аргумент C в (5) в показательном виде может быть определен как, Вольдек [4]

где γ_0 – угол между векторами напряжения U_{sh} и ЭДС двигателя $-E_{s0}$ при холостом ходе.

ЭДС двигателя при холостом ходе E_{s0} в (6) с учетом рис. 2 можно выразить из уравнения

$$E_{s0} = \frac{U_{sh} \cos \varphi_0 - I_{s0} R_s}{\cos(\varphi_0 + \gamma_0)}, \quad (7)$$

где φ_0 – угол сдвига фаз между векторами напряжения U_{sh} и тока I_{s0} в режиме холостого хода (рис. 2).

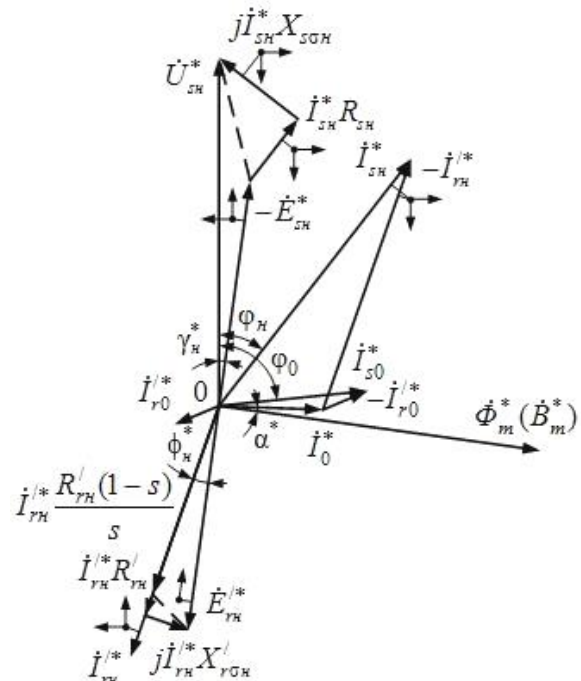


Рис. 2. Векторная диаграмма трехфазного АД при работе в двигательном режиме ($2p = 4$)

$$C = \frac{U_{sh}}{E_{s0}} e^{-j\gamma_0}. \quad (6)$$

Угол φ_0 для (7) определяется из тригонометрического выражения

$$\varphi_0 = \arccos \left(\frac{P_0}{m_s U_{sh} I_{s0}} \right). \quad (8)$$

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора R_r' рассчитывается из комплексного эквивалентного сопротивления вторичного контура Z_{rH} схемы замещения в номинальном режиме

$$Z_{rH} = C(R_s + jX_{s\sigma}) + C^2 \left(\frac{R_r'}{s} + jX_{r\sigma}' \right) \quad (9)$$

Из (8), с учетом (6), после некоторых преобразований выводится уравнение для определения R_r' Г-образной схемы замещения

$$R_r' = \frac{E_{s0} s_H (E_{s0} (R_{rH} \cos(2\gamma) - X_{r\sigma H} \sin(2\gamma)) - U_{sh} (R_s \cos \gamma - X_{s\sigma} \sin \gamma))}{U_{sh}^2}. \quad (10)$$

Сопротивление R_{rH} и индуктивное сопротивление рассеяния $X_{r\sigma H}$ в (10) могут быть определены из схемы замещения по известным зависимостям, Вольдек [4].

Из выражения для номинального электромагнитного момента M_n АД сопротивление R_r' определяется как

$$R_r' = \frac{P_n \omega_0 s_H}{C^2 m_s p I_{rH}^2 \omega_H} \quad (11)$$

Результатом преобразования уравнения (10), с учетом (11), является не приведенное полное квадратное уравнение

$$\begin{aligned} & \left((l + k \cos \varphi_0 - R_{rH})^2 + (k \sin \varphi_0 - X_{r\sigma H})^2 \right) \cos^2(2\gamma) + \\ & + 2(l + k \cos \varphi_0 - R_{rH})(l + h) \cos(2\gamma) + (l + h)^2 - \\ & - (k \sin \varphi_0 - X_{r\sigma H})^2 = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

В формуле (12)

$$l = \frac{U_{SH}^2}{2I_{s0}^2 R_m}; \quad k = \frac{U_{SH} R_s}{I_{s0} R_m}; \quad h = \frac{P_n \omega_0}{m_s p I_{rH}^2 \omega_H}. \quad (13)$$

Решением уравнения (12) относительно γ является выражение

$$\gamma = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{-(l + k \cos \varphi_0 - R_{rH})(l + h) \pm \sqrt{\left((k \sin \varphi_0 - X_{r\sigma H})^2 + (l + k \cos \varphi_0 - R_{rH})^2 - (l + h)^2 \right) - 2(l + k \cos \varphi_0 - R_{rH})^2 (l + h)^2}}{(l + k \cos \varphi_0 - R_{rH})^2 + (k \sin \varphi_0 - X_{r\sigma H})^2} \right) \quad (14)$$

Уравнение (12) не тождественно уравнению (10), так как при приведении (10) к (12) были введены лишние корни, которые определяются при выполнении проверки, после их подстановки в уравнение (10).

Аналогично (10) из (9) выводится уравнение для $X_{r\sigma}'$:

$$X_{r\sigma}' = \frac{E_{s0} (E_{s0} (R_{rH} \sin(2\gamma) + X_{r\sigma H} \cos(2\gamma)) - U_{SH} (R_s \sin \gamma + X_{s\sigma} \cos \gamma))}{U_{SH}^2} \quad (15)$$

Выражение для определения сопротивления рассеяния $X_{s\sigma}$ имеет вид

$$X_{s\sigma} = \frac{I_{s0} R_s \sin(\varphi_0 + \gamma) - U_{SH} \sin \gamma}{I_{s0} \cos(\varphi_0 - \gamma)} \quad (16)$$

Активное R_m и индуктивное X_m сопротивления контура намагничивания вычисляются из выражений

$$R_m = \frac{U_{SH} \cos \varphi_0}{I_{s0}} - R_s; \quad X_m = \frac{U_{SH} \sin \varphi_0}{I_{s0}} - X_{s\sigma}. \quad (17)$$

Параметры АД $L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$ и L_m , которые необходимы для аналитических исследований, определяются известными зависимостями $L_{s\sigma} = f(X_{s\sigma})$, $L_{r\sigma} = f(X_{r\sigma}')$ и $L_m = f(X_m)$, Копылов [11].

В случаях, когда результаты расчета угла γ при помощи (14) не детерминированы, определяется область его допустимых значений в пределах решения поставленной задачи. Граничными будут значения γ при $X_{r\sigma}'(\gamma) = 0$ и $X_{s\sigma}(\gamma) = 0$.

Тогда из (15)

$$U_{SH} E_{s0} (R_s \sin \gamma + X_{s\sigma} \cos \gamma) - E_{s0}^2 (R_{rH} \sin(2\gamma) + X_{r\sigma H} \cos(2\gamma)) = 0. \quad (18)$$

Решение этого уравнения относительно γ_1 имеет вид

$$\gamma_1 = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2I_{s0} (U_{SH} R_s \sin \varphi_0 - I_{s0} R_m X_{rH})}{U_{SH}^2 + 2I_{s0} (I_{s0} R_m R_{rH} - U_{SH} R_s \cos \varphi_0)} \right) \quad (19)$$

Из уравнения (16)

$$U_{SH} \sin \gamma_2 - I_{s0} R_s \sin(\varphi_0 + \gamma_2) = 0. \quad (20)$$

В этом случае угол γ_2 определяется по формуле

$$\gamma_2 = \arctg \left(\frac{I_{s0} R_s \sin \varphi_0}{U_{SH} - I_{s0} R_s \cos \varphi_0} \right), \quad (21)$$

а необходимые для расчетов значения угла γ – как среднее арифметическое его граничных значений γ_1 и γ_2 , рассчитываемых по выражениям (19) и (21).

На основании аналитических выражений (2...21) разработан алгоритм расчета параметров схемы замещения трехфазного АД – рис.3.

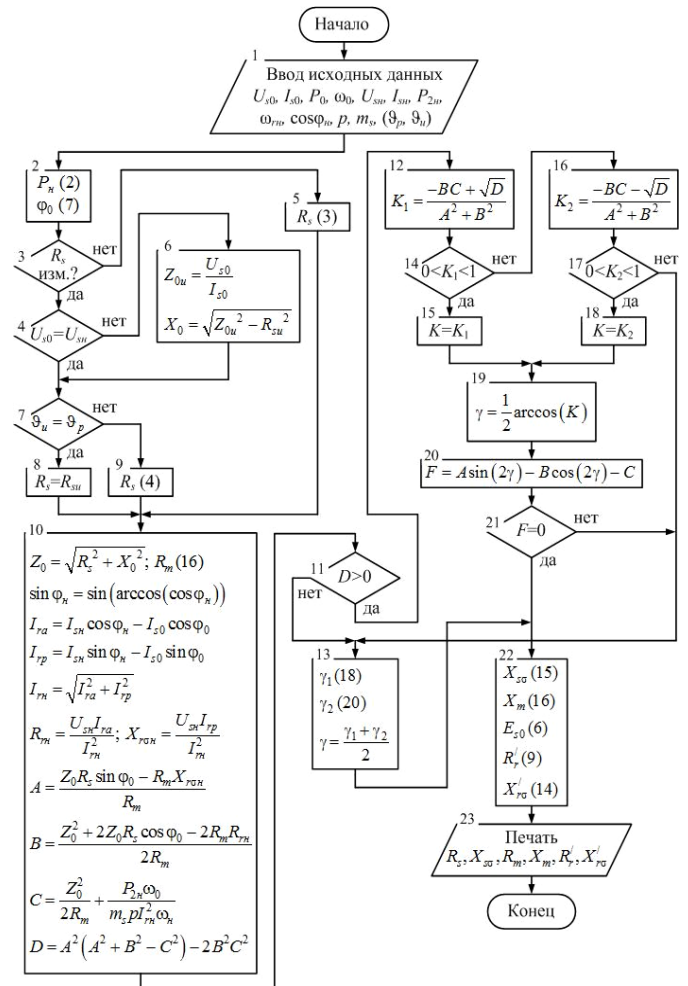


Рис. 3. Алгоритм расчета параметров трехфазных АД по справочным и экспериментальным данным

На основании разработанного алгоритма (рис. 3) составлена на языке программирования «Visual Basic 6.0» и

зарегистрирована программа для вычислительных машин, Бурков [12].

В качестве примера по разработанному алгоритму выполнены расчеты параметров R_s , $X_{s\sigma}$, R_m , X_m , R_r' , $X_{r\sigma}'$ Г-образной схемы замещения трехфазного асинхронного ЭД типа АО2-41-4 (схема соединения обмоток статора – «звезда»).

К исходным относятся полученные данные опыта холостого хода ($U_0 = 223$ В; $I_{s0} = 3,15$ А; $P_0 = 0,12$ кВт; $n_0 = 1500$ об/мин), номинального режима ($U_n = 220$ В; $I_{sn} = 8,30$ А; $P_n = 4,00$ кВт; $n_n = 1450$ об/мин; $\cos\phi_n = 0,85$).

Кроме того, к исходным данным относится измеренное активное сопротивление обмотки статора ($R_{su} = 0,81$ Ом), число пар полюсов ЭД ($p = 2$) и число фаз обмотки статора ($m_1 = 3$), а также, при необходимости, рабочая температура обмоток ЭД ϑ_p и температура ϑ_u , при которой производились измерения.

Результаты расчетов параметров АД типа АО2-41-4 для угла $\gamma = 0,688^\circ$ приведены в табл. 1, Бурков, [13].

Таблица 1

Расчетные и справочные данные параметров схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя типа АО2-41-4

| Параметры | R_s , Ом | $X_{s\sigma}$ Ом | R_m , Ом | X_m , Ом | R_r' , Ом | $X_{r\sigma}'$, Ом |
|----------------|------------|------------------|------------|------------|-------------|---------------------|
| Расчетные | 0,988 | 1,992 | 3,047 | 68,662 | 0,899 | 3,286 |
| Справочные | 1,050 | 2,076 | – | 68,799 | 0,785 | 2,388 |
| Расхождение, % | –6,3 | –4,2 | – | –0,2 | 12,7 | 27,3 |

Кроме того, в табл. 1 приведены справочные данные по параметрам ЭД типа АО2-41-4 [14].

Сравнительный анализ результатов расчетов параметров АД и соответствующих справочных данных для двигателя АО2-41-4 показал, что расхождение расчетных и справочных данных лежит в пределах $|4,2...6,3|$ % для статорной цепи, до 0,2 % – для контура намагничивания и $|12,7...27,3|$ % – для роторной цепи.

С целью количественной оценки степени изменения рассчитываемых параметров в функции угла γ , изменяющегося в пределах области допустимых значений, выполнены расчеты $R_s = f(\gamma)$, $X_{s\sigma} = f(\gamma)$, $R_m = f(\gamma)$, $X_m = f(\gamma)$, $R_r' = f(\gamma)$, $X_{r\sigma}' = f(\gamma)$, результаты которых приведены на рис. 4...6, [13].

Кроме того, выполнены расчеты параметров R_s , $X_{s\sigma}$, R_m , X_m , R_r' и $X_{r\sigma}'$ схем замещения широко используемых трехскоростных АД типов МАП511-4/8/16, МАП521-4/8/16, МАП612-4/8/16, МАП621-4/8/16, МАП621-4/8/24, МАП622-4/8/16, МАП622-4/8/24, МАП711-4/8/16 и МАП721-4/8/16. Схема соединения обмоток статора – «звезда».

Сравнительный анализ результатов расчетов параметров АД по предлагаемой методике и соответствующих справочных данных показал, что расхождение расчетных и справочных данных составляет: $X_{s\sigma} - |1,1...1,7|$ % у

обмотки второй скорости АД типа МАП621-4/8/24 и у обмотки третьей скорости двигателя МАП511-4/8/16; $R_m - |0,9...1,2|$ % у обмотки первой скорости АД типа МАП622-4/8/16 и у обмотки второй скорости двигателя МАП511-4/8/16; $X_m - |2,7...5,4|$ % у обмотки третьей скорости АД типа МАП711-4/8/16 и у обмотки второй скорости двигателя МАП612-4/8/16; $X_{r\sigma}' - |18,2...24,8|$ % у обмотки третьей скорости АД типа МАП711-4/8/16 и у обмотки второй скорости двигателя МАП622-4/8/16, соответственно.

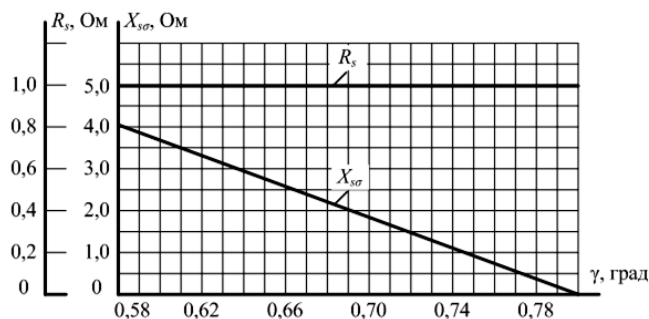


Рис. 4. Зависимости R_s и $X_{s\sigma}$ от угла γ АД типа АО2-41-4

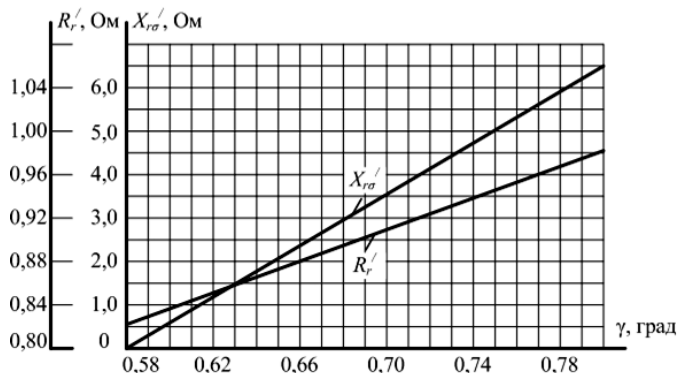


Рис. 5. Зависимости R_m и X_m от угла γ АД типа АО2-41-4

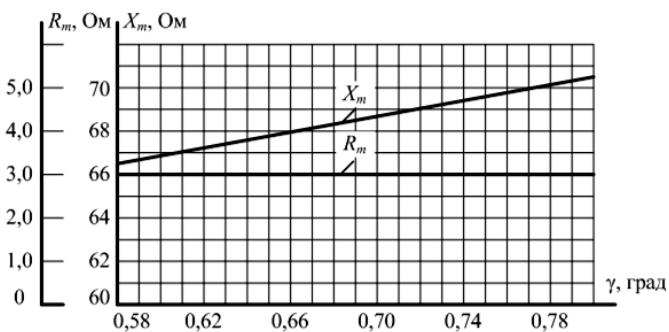


Рис. 6. Зависимости R_r' и $X_{r\sigma}'$ от γ АД типа АО2-41-4

Выводы

Применительно к постановке вопроса определена целесообразность условно представлять ЭП, как системы, включающие совокупности компонентов. Их режимами работы являются состояния, определяющиеся множеством различных процессов. Эти состояния зависят от собственных параметров системы и параметров возмущающих воздействий.

Для комплексной оценки функционирования ЭП актуальными являются исследования режимов их работы методами теории подобия и моделирования. Выполнен обзор и анализ вариантов моделей, позволяющий сделать вывод о том, что для ЭП при их комплексной оценке в пределах поставленных задач целесообразно использование математического и физического моделирования.

Выявлено, что определяющее значение при исследованиях эксплуатационных режимов работы имеют исследования процессов в ЭД, являющихся основными компонентами ЭП, как систем.

Представлено математическое описание для расчета параметров схем замещения трехфазных АД R_s , $X_{\sigma s}$, R_m , X_m , R_r' , $X_{r\sigma}'$, относящихся к исходным данным, необходимым для исследования процессов ЭД.

По представленному математическому описанию разработан алгоритм расчета, составлена и зарегистрирована программа для вычислительных машин.

Выполнены проверочные расчеты для трехскоростных АД серий «АО» «МАП».

Сравнительный анализ результатов расчетов параметров АД по предлагаемой методике и соответствующих справочных данных для двигателя АО2-41-4 показал, что расхождение расчетных и справочных данных лежит в пределах $[0,2...27,3]$ % (для X_m и $X_{r\sigma}'$, соответственно). Для трехскоростных АД серии «МАП» расхождение расчетных и справочных данных лежит в пределах $[0,9...24,8]$ % (для R_m у обмотки первой скорости и $X_{r\sigma}'$ у обмотки второй скорости двигателя МАП622-4/8/16, соответственно).

Предлагаемая методика дополняет и расширяет возможности определения основных параметров схем замещения трехфазных АД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) / В.А. Веников и Г.В. Веников. – М.: Высшая школа, 1984.
2. Бурков А.Ф. Обзор основных систем электроприводов на судах. // Проблемы транспорта Дальнего Востока.

ФЕВРАТ-05. Шестая международная научно-практическая конференция. Российская академия транспорта: – Владивосток, 2005.

3. Богословский А.П. Судовые электроприводы: справочник, т.1. / А.П. Богословский, Е.М. Певзнер, И.Р. Фрейдзон и А.Г.Яуре. – Ленинград: Судостроение 1983.

4. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины переменного тока. / А.И. Вольдек, В.В. Попов Санкт-Петербург: Питер 2007.

5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины, т. 1. Москва: ИД МЭИ, 2006.

6. Усольцев А.А. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным. / А.А. Усольцев, Д.В. Лукичев // Известия вузов. – Санкт-Петербург: Приборостроение, 2008.

7. Гридин В.М. Расчет параметров и характеристик асинхронных двигателей. Москва: 2012.

8. Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская – Санкт-Петербург: Техническая книга, 2002.

9. Бурков А. Ф. Исследования и разработка методики расчета исходных констант и переменных электродвигателей переменного тока. // Третья международная научная конференция Полярная механика. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2016.

10. Электродвигатели асинхронные серии МАП120–МАП720. Технические условия ТУ.16-513.334-77.

11. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. – Москва: Энергия, 1973.

12. Бурков А.Ф. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2012617171 Российская Федерация. Алгоритм расчета параметров трехфазных асинхронных ЭД по данным опыта холостого хода и номинального режима, 2012.

13. Бурков А.Ф. Повышение эффективности технической эксплуатации судовых электроприводов. // Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского. – Владивосток, 2011.

14. Петров И.И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. / И.И. Петров, А.М. Мейстель – Москва: Энергия, 1968.

Determination of Parameters of Three-phase Asynchronous Motors

Burkov A.F.
Federal State Autonomous Educational
Institution of Higher Education
Far Eastern Federal University
Vladivostok, Russia
burkov.22@mail.ru

Kraskovskiy M.V.
Federal State Budgetary Institution of
Science The Institute of Marine
Technological Problems of the Far
Eastern branch of the Russian Academy
of Sciences
Vladivostok, Russia
mikhail51289@yandex.ru

Yurin V.N.
Federal Budget Educational Institution
of Higher Education
Admiral Nevelskoy Maritime State
University
Vladivostok, Russia
yurinvn@ya.ru

Abstract. The necessary conditions of scientific and technological progress include the study of the behavior of various objects, processes and phenomena by the methods of similarity theory and modeling. In the field of the theory of electric machines, in particular electric motors (ED), the relevant issues of research

and development of methods for calculating their constants and variables, which are necessary in many cases as input data in the analytical studies of ED and electric drives (EP) as a whole as Electromechanical systems of varying degrees of complexity. Currently, the most widespread in various sectors of economic

activity received EP with asynchronous motors (AD). Review and analysis variants of models allows us to conclude that within the set tasks it is advisable to use mathematical modeling which avoids complex cost required by direct researches. In this paper, on the basis of the proposed analytical expressions, an algorithm for calculating the parameters of the equivalent circuit of widely

used three-phase AD, required as input data for mathematical modeling of processes.

Keywords: algorithm of calculation, asynchronous motor, vector diagram, parameters of electric motor, equivalent circuit.

Работа цифровых органов релейной защиты при насыщении трансформаторов тока: моделирование и анализ

Вайтеленок Л.В.

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске

Смоленск, Россия

larisa.vaytelenok.786@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена моделированию и анализу работы цифровых органов (ЦО) релейной защиты при насыщении измерительных трансформаторов тока (ТТ). Рассматриваются алгоритмы ЦО на основе вычислений по мгновенным значениям сигнала и с использованием фильтров Фурье. Значения вторичного тока при насыщении получено путем моделирования в программе Matlab с использованием упрощенной математической модели ТТ. Исследовано влияние на точность работы ЦО таких факторов, как период дискретизации и декремент затухания апериодической составляющей входного сигнала. Сделаны обоснования полученных результатов моделирования. Получено, что характер изменения погрешностей различен для алгоритмов, использующих мгновенные значения сигналов, и алгоритмов на основе фильтров Фурье. При увеличении декремента затухания абсолютные погрешности снижаются. При переходе устройств на протокол передачи данных МЭК 61850-9-2 предпочтительнее использовать алгоритм двух выборок или ЦО на основе фильтров Фурье.

Ключевые слова: релейная защита, цифровые органы, фильтр Фурье, моделирование, трансформатор тока, насыщение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время завершается переход устройств релейной защиты (РЗ) на новую микропроцессорную (МП) базу [1–4]. При этом изменяется принцип обработки информации устройствами РЗ. Большинство МП устройств РЗ реагируют на действующее значение сигнала промышленной частоты, в отличие от электромеханических устройств, реагирующих на действующее значение полного входного сигнала [5–7]. Ввиду этого, появляются новые проблемы эксплуатации РЗ, не характерные для устройств на электромеханической базе [8, 9]. Одной из таких проблем является неправильная работа МП РЗ при насыщениях электромагнитных трансформаторов тока, поскольку в переходных режимах погрешности трансформации ТТ могут составлять от 10 до 80 процентов [10–11]. Результирующая погрешность вычислений информационных параметров устройствами РЗ будет зависеть как от параметров сигнала (степень насыщения, декремент затухания апериодической составляющей), так и от параметров обработки информации в самих устройствах.

Данная обработка может быть осуществлена различными способами [5, 12]. В данной работе рассматриваются алгоритмы нахождения модуля сигнала на основе операций с мгновенными значениями входного сигнала [12] и с использованием цифровой обработки посредством фильтров Фурье [12–14].

Целью данной работы является выявление наиболее эффективного из указанных способов обработки сигналов при насыщении ТТ, а также определение влияния на результаты обработки величины декремента затухания апериодической составляющей и периода дискретизации сигнала. Достижение поставленной цели получено путем математического моделирования процесса насыщения ТТ и работы ЦО.

СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

В рамках данной работы исследуются алгоритмы вычисления векторов \bar{I} информационных параметров, функционирующих на основе операций с мгновенными значениями i входного сигнала [12], а именно:

– алгоритм, использующий текущую и предыдущую выборки сигнала:

$$\bar{I}(nT) = \frac{N}{2\pi} [i(nT) - i((n-1)T)] + j \cdot i(nT), \quad (1)$$

где n – номер текущей выборки; T – период дискретизации; N – число выборок за период промышленной частоты;

– алгоритм, в котором используются текущая и две предыдущие выборки:

$$\bar{I}(nT) = \frac{N}{4\pi} [i(nT) - i((n-2)T)] + j \cdot i((n-2)T); \quad (2)$$

– алгоритм двух выборок, отстоящих друг от друга на m периодов дискретизации:

$$\bar{I}(nT) = \cot(\omega_0 m T) \cdot i(nT) - \frac{i((n-m)T)}{\sin(\omega_0 m T)} + j \cdot i(nT), \quad (3)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ – угловая частота промышленной частоты $f_0 = 50$ Гц.

В работах [12,15,16] показано, что алгоритм (1) имеет погрешность определения вектора $\bar{I}(nT)$ первой гармоники входного сигнала промышленной частоты, не превышающую 10 процентов. Для (2) эта погрешность не превосходит 2 процентов, а для (3) при условии применения параметра $m = N/4$ – вообще отсутствует.

Быстродействие указанных алгоритмов зависит от количества используемых выборок. Для (1) время переходного процесса в фильтре составляет всего $2T$, для (2) – $3T$, и для (3) соответственно mT . Таким образом, алгоритм (3) хотя и имеет лучшие показатели точности, однако является менее быстродействующим.

Значение модуля сигнала, необходимое для функционирования РЗ, определяется как:

$$I(nT) = \sqrt{[I_{Re}(nT)]^2 + [I_{Im}(nT)]^2}, \quad (4)$$

где $I_{Re}(nT)$, $I_{Im}(nT)$ – значения действительной и мнимой части вектора $\bar{I}(nT)$.

В данной работе также рассматривается обработка с использованием фильтров Фурье, которые наиболее распространены в современных устройствах РЗ за счет способности выделять ортогональные составляющие первой гармоники синусоидального сигнала 50 Гц без погрешности согласно следующим формулам:

$$\begin{aligned} I_{Re}(nT) &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(nT) \cdot \sin(\omega_0 nT); \\ I_{Im}(nT) &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT). \end{aligned} \quad (5)$$

Исследования [17,18] показывают, что данные фильтры позволяют удалять кратные гармонические составляющие из входного сигнала, снижают наличие аperiodической и некрatных гармонических составляющих. Переходный процесс в фильтрах согласно (5) длится $(N - 1)T$.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАСЫЩЕНИЯ

Для получения значений вторичного тока при насыщении была использована упрощенная математическая модель ТТ, описанная в [19, 20]. В качестве ТТ для примера был выбран ТПОЛ-10-600/5. Исходными данными для модели задавались следующие значения:

- число витков первичной ($w_1 = 1$) и вторичной ($w_2 = 120$) обмоток;
- активное сопротивление вторичной обмотки ($R_2 = 0,16$ Ом) и нагрузки ($R_{2load} = 0,32$ Ом);
- индуктивность вторичной обмотки ($L_2 = 0,3644$ мГн) и нагрузки ($L_{2load} = 0,7639$ мГн);
- сечение стали магнитопровода ($s = 0,00125$ м²);
- средняя длина магнитной силовой линии ($l = 0,267$ м).

В работах [21, 22] показано, что для аппроксимации реальной характеристики намагничивания предпочтительнее использовать функцию следующего вида:

$$H = 10^{-12} \sinh(19,04B) + 18,1B. \quad (6)$$

При реализации модели в программе Matlab, задавая в качестве первичного тока сигнал, содержащий периодическую и аperiodическую (декрементом затухания $\gamma = 10$ с⁻¹) составляющие:

$$i(t) = 6000 \cdot \sin(\omega_0 t) + 6000 \cdot e^{-\gamma t}, \quad (7)$$

получены мгновенные значения приведенного первичного i'_1 и вторичного i_2 токов (рис. 1).

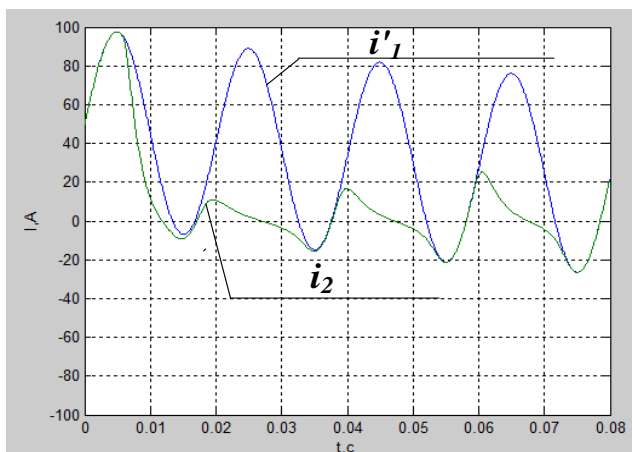


Рис. 1. Результаты моделирования насыщения

Для точности расчета значения $i(t)$ задавались с возможно меньшим шагом (в работе $\Delta t = 0,01$ мс). ЦО, как правило, работают с периодом дискретизации $T > \Delta t$. Среди российских производителей МП РЗ наиболее распространены значения T равные 0,001 с ($N = 20$) и 0,0005 с ($N = 40$). Помимо этого, появляются новейшие устройства, поддерживающие протокол передачи данных МЭК 61850-9-2, согласно которому необходимо применять значение $T = 0,25$ мс ($N = 80$) [23]. Поэтому из полученных значений i_2 выбирались значения при времени $t = nT$, что эквивалентно процессу дискретизации сигнала, происходящему в настоящих устройствах РЗ.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ЦО ПРИ НАСЫЩЕНИИ

Программное моделирование работы указанных ЦО было произведено согласно уравнениям (1)–(5). На вход ЦО подавались полученные выборки вторичного тока $i_2(nT)$ с периодом дискретизации $T = 0,001$ с.

Результаты моделирования представлены на рис. 2. По основной оси абсцисс отложены значения модуля вторичного тока, получаемые соответственно по алгоритмам (1), (2), (3) и (5). Истинное значение модуля I_2 для первичного тока (7) будет равно

$$I_2 = \frac{I_1(f_0)}{w_2/w_1} = \frac{6000}{120/1} = 50 \text{ А}. \quad (8)$$

По дополнительной оси абсцисс отложены значения относительной погрешности вычислений ЦО.

Анализируя полученные зависимости, можно отметить практически одинаковый характер изменения I_2 и δ для первых двух алгоритмов, причем максимальная погрешность для них возникает в начальные моменты времени ($\delta_{(1)max} = 234\%$, $\delta_{(2)max} = 130\%$) и обуславливается переходным процессом в самих ЦО. В момент времени $nT = 9T$ для (1) и $nT = 10T$ для (2) погрешность вычислений переходит через ноль и становится отрицательной, хотя существенное отличие i_2 от i'_1 наступает несколько раньше (время достаточно точной трансформации (ДТТ) составляет $8T$). Данное запаздывание можно объяснить тем, что алгоритмы (1) и (2) используют одну и две предыдущие выборки соответственно, поэтому и запаздывание происходит на один и два такта. В дальнейших вычислениях различия погрешностей для двух данных алгоритмов не превосходит 15 %.

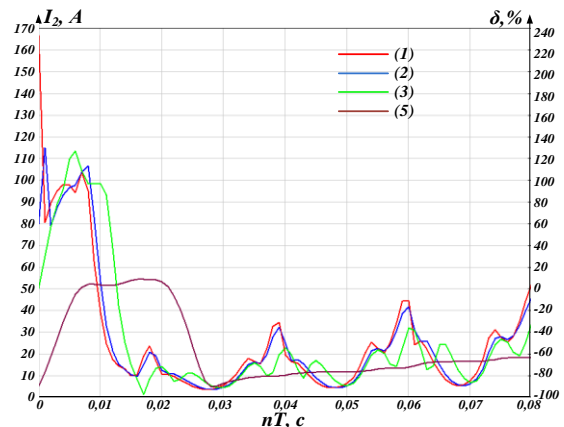


Рис. 2. Результаты работы модели ЦО при насыщении

Зависимости погрешности имеют по три минимума и максимума за период, а среднее значение δ постепенно со временем стремится к нулю.

Для (3) алгоритма, в отличие от вышерассмотренных, максимальное значение погрешности наступает через $nT = 5T$, так как в данном алгоритме используются выборки, отстающие друг от друга на $m = 20/4 = 5$ тактов. Переход через ноль погрешности также возникает с запаздыванием на 5 тактов по сравнению со временем ДТТ. После этого времени, среднее (за время $T_0/2$) значение погрешности δ_{avg} меньше по абсолютному значению δ_{avg} первых двух алгоритмов для нечётных полупериодов. Для чётных полупериодов, наоборот, наибольшее абсолютное значение δ_{avg} характерно для алгоритма (3).

Для фильтров Фурье зависимость погрешности имеет отличный от первых трех алгоритмов вид. Значения I_2 и δ постепенно нарастают с их минимального значения в начальный момент времени ($I_{2min} = 5$; $\delta_{min} = -90\%$), что связано с последовательным накоплением информации в самих фильтрах. При $nT = 7T$ значение I_2 становится больше истинного и до $nT = 23T$ погрешность не превышает 9%. После этого времени значение I_2 начинает монотонно снижаться, достигая минимума при $nT = 28T$ ($\delta = -90,8\%$), а затем начинает постепенно увеличиваться. Хотя в дальнейшем зависимости I_2 и δ для данного алгоритма и не имеют ярко выраженных минимумов, однако абсолютное значение δ_{avg} больше, чем для предыдущих алгоритмов.

Возникновение минимума δ именно в момент $nT = 28T$ можно объяснить тем, что при постепенном сдвиге окна данных из запомненных фильтрами выборок удаляются значения i_2 , соответствующие времени ДТТ. При сдвиге начала окна длительностью $T_0 = 0,02$ с дальше времени ДТТ в выборках фильтров присутствуют выборки, существенно отличающиеся от приведенного первичного тока. Данное время, определяемое как сумма времени ДТТ и периода T_0 , как раз и соответствует 0,028 с.

Таким образом, существенная положительная погрешность, возникающая в начальные моменты времени для алгоритмов (1)–(3), может негативно сказаться на работе быстродействующих защит. Возможно ложное срабатывание защит с временем срабатывания менее 0,01 с. Возникающая в дальнейшем отрицательная погрешность, характерная для всех алгоритмов, наоборот, может замедлить работу токовых защит.

Также необходимо отметить, что хотя фильтры Фурье и работают без погрешности при чисто синусоидальном входном сигнале, при наличии насыщения их средняя за полпериода погрешность (после переходного процесса) превосходит по абсолютному значению погрешности других алгоритмов.

Однако в случае применения данного алгоритма, практически исключается возможность возникновения чередующихся режимов пуска и сброса защиты, которые не исключены для первых трех алгоритмов, так как для данных алгоритмов характерны существенные разрывы между соседними минимумами и максимумами значений вторичного тока.

Далее в работе было исследовано влияние на погрешности величины декремента затухания аperiodической составляющей γ . Задавая значения первичного тока согласно выражению (7) для значений $\gamma = 2; 10; 20 \dots 200 \text{ с}^{-1}$ было получено, что, начиная с $\gamma = 150 \text{ с}^{-1}$, отличие первичного и вторичного токов становится несущественным, и погрешность вычислений будет определяться только наличием аperiodической составляющей. Поэтому для дальнейшего анализа работы алгоритмов использовались значения γ до 140 с^{-1} .

Полученные зависимости погрешностей построены отдельно для каждого из рассматриваемых алгоритмов (рис.3).

Получено, что с ростом значения γ абсолютное значение погрешности для всех алгоритмов снижается, так уменьшается степень насыщения ТТ.

Однако при изменении γ от 2 до 50 с^{-1} увеличивается разрыв между соседними минимумом и максимумом погрешности. После $\gamma = 60 \text{ с}^{-1}$ этот разрыв начинает снижаться.

Необходимо также отметить, что для фильтров Фурье величина данных разрывов меньше при любых значениях γ , но среднее за полпериода значение δ_{avg} все равно по абсолютной величине больше, чем для других алгоритмов.

Также для всех алгоритмов с увеличением γ наблюдается сдвиг минимумов и максимумов погрешностей по времени, что можно объяснить возрастанием при этом времени ДТТ.

Заключительным этапом исследования явилось моделирование работы ЦО, функционирующие с разными периодами дискретизации входного сигнала. Данное исследование является особенно актуальным в связи с переходом устройств РЗ на протокол передачи данных МЭК 61850-9-2. В качестве исследуемых были приняты вышеуказанные значения T , соответствующие числу выборок за период промышленной частоты $N = 20, 40$ и 80 . Значение γ при этом принималось постоянным и равным 10 с^{-1} . Значения первичного тока задавалось согласно выражению (7).

Полученные зависимости погрешностей показаны на рис. 4 (поскольку в начальный момент времени погрешности для алгоритмов (1) и (2) имеют очень высокое значение, для наглядности показаны характеристики после переходного процесса в данных ЦО).

Можно отметить, что при увеличении N для первых двух алгоритмов наблюдается существенное увеличение погрешности, особенно в первый полупериод промышленной частоты. Для алгоритма (1) максимум со $107,5\%$ при $N = 20$ увеличивается на $24,2\%$ при применении $N = 40$ и на $29,2\%$ при $N = 80$. Для остального времени разница погрешностей не превосходит 5% . Практически аналогичные значения разницы погрешностей при увеличении значения N наблюдаются и для второго алгоритма.

Для алгоритмов (3) и (5) изменение погрешности при увеличении N незначительно на всем рассматриваемом интервале времени.

Таким образом, при переходе устройств на протокол передачи данных МЭК 61850-9-2 предпочтительнее использовать алгоритмы (3) или (5). При применении первых двух алгоритмов следует учитывать возможное увеличение погрешностей.

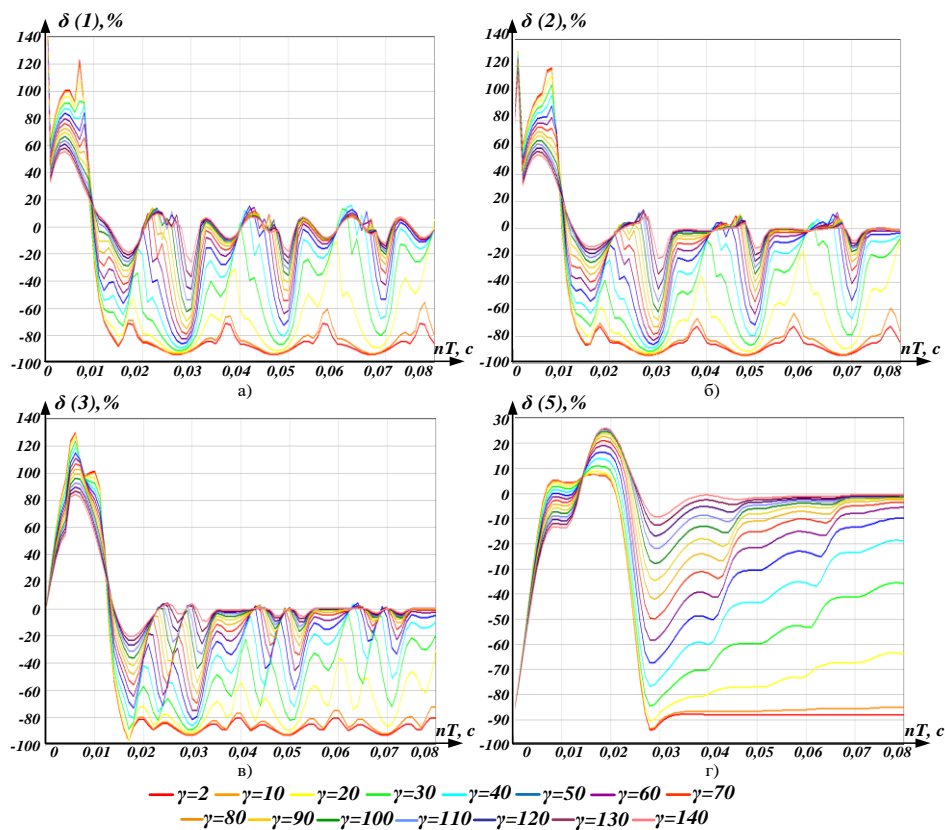


Рис. 3. Погрешности алгоритмов (1) (а), (2) (б), (3) (в) и (5) (г) для различных значений декремента затухания

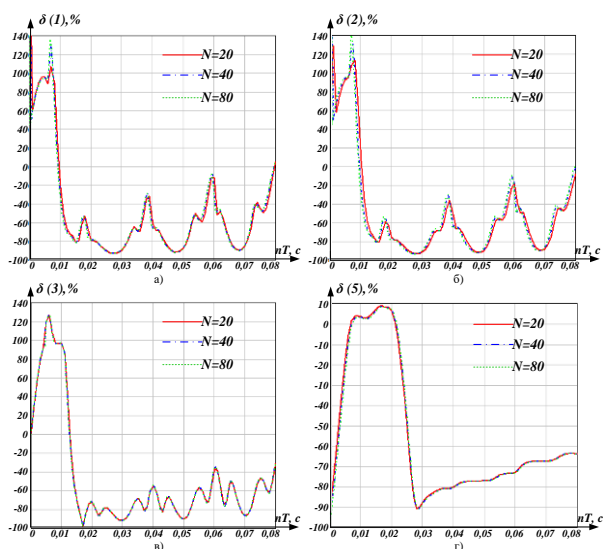


Рис. 4. Погрешности при насыщении для алгоритмов (1) (а), (2) (б), (3) (в) и 5 (г) при разном числе выборок

ВЫВОДЫ

В работе было произведено математическое моделирование процесса насыщения ТТ типа ТПОЛ-10 и проанализирована работа алгоритмов ЦО при различных условиях.

Получено, что в начальный период времени насыщения алгоритмы на основе операций с мгновенными сигналами имеют положительную погрешность, наибольшую для первого из рассматриваемых алгоритмов. В отличие от них, фильтры Фурье сначала имеют отрицательную погрешность. После прохождения времени ДТТ погрешность для всех алгоритмов становится отрицательной. Таким образом, для быстродействующих защит (с временем срабатывания менее 0,01 с) возможно ложное срабатывание, а для токовых защит с большим временем срабатывания возможно замедленное срабатывание или несрабатывание вообще. Из полученных результатов исследования следует, что наименьшей погрешностью при насыщении обладает алгоритм с использованием двух выборок, отстоящих на m циклов. Однако для данного алгоритма, как и для двух других алгоритмов, использующих мгновенные значения сигнала, возможен продолжительный процесс пуска-сброса защиты, что также влияет на качество работы устройств РЗ. Для исключения данного режима для защит, реагирующих не на усредненное значение сигнала, предпочтительнее использовать алгоритмы на основе фильтров Фурье.

С увеличением декремента затухания погрешности для всех алгоритмов снижаются. При этом увеличиваются разрывы между минимумами и максимумами, тем самым повышается возможность возникновения пуска и последующего сброса защиты. Причем данные разрывы появляются и для алгоритма Фурье.

Исследование влияния на результаты обработки величины периода дискретизации показало, что при увеличении числа выборок погрешность не изменяется для алгоритма двух выборок и фильтров Фурье. Данное обстоятельство определяет предпочтительность использования данных алгоритмов при переходе на протокол МЭК 61850-9-2.

Полученные результаты исследования необходимо учитывать при проектировании новых устройств РЗ и совершенствовании существующих алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич В.И. Новая концепция построения микропроцессорных устройств релейной защиты / Компоненты и технологии. – 2010. – № 6. – С. 93-96.

2. Абдюкаева А.Ф. Релейная защита – проблемы и перспективы / А.Ф. Абдюкаева, М.Б. Фомин, Е.М. Асманкин, Ю.А. Ушаков, Д.С. Федотов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 2 (70). – С. 142-144.

3. Булычев А.В. Инженерно-экономическое обоснование инвестиций в научно-исследовательские работы по релейной защите и автоматике электроэнергетических систем // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 61-75.

4. Лизунов И.Н. Технологии передачи данных в современных системах релейной защиты и автоматики и их показатели качества / И.Н. Лизунов, А.Н. Васев, Р.Ш. Мисбахов, В.В. Федотов, Э.А. Хафизова // Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19. – № 1-2. – С. 52-63.

5. Романюк Ф.А. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах линий распределительных сетей / Ф.А. Романюк, М.А. Шевалдин // Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ. – 2014. – № 1. – С. 5-11.

6. Муссонов Г.П. Определение параметров переходных процессов по цифровым данным. Ч.1 // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 2. – С. 73-81.

7. Sharma K.K. New Algorithms for Removal of DC Offset and Subsynchronous Resonance terms in the Current and Voltage Signals under Fault Conditions // WSEAS Transactions on Power Systems. – 2014. – vol. 9 – P. 103-110.

8. Гуревич В.И. Микропроцессорные реле защиты: новые перспективы или новые проблемы? // Новости электротехники. – 2005. – № 6 (36). – С. 57-60.

9. Зацаринная Ю.Н. Особенности эксплуатации релейной защиты воздушных линий, выполненной на разной элементной базе / Ю.Н. Зацаринная, Р.Р. Рахматуллин, М.Н. Хабибуллин, А.Г. Логачева // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – № 9. – С. 139-145.

10. Новаш И.В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И.В. Новаш, Ю.В. Румянцев // Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 5. – С. 23-38.

11. Кужеков С.Л. О способах уменьшения влияния погрешностей трансформаторов тока в переходных режимах на работу релейной защиты электроэнергетических систем

// Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докл. Международной науч.-тех. конф. (Москва, 7-10 сентября 2009 г.). – Москва, 2009. – С. 99-104.

12. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

13. Румянцев Ю.В. Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора // Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ. – 2016. – № 3. – С. 203-224.

14. Румянцев Ю.В. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю.В. Румянцев, Ф.А. Романюк, В.Ю. Румянцев // Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ. – 2016. – № 5. – С. 397-417.

15. Никитин А.А. Цифровая релейная защита. Основы синтеза измерительной части микропроцессорных реле: текст лекций. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – 240 с.

16. Вайтеленок Л.В. Анализ частотных свойств алгоритма двух выборок // Энергетика, информатика, инновации – 2017: сб. тр. VII Международной науч.-тех. конф. (Смоленск, 23-24 ноября 2017 г.). – Смоленск, 2017. – С. 16-19.

17. Вайтеленок Л.В. Исследование влияния апериодической составляющей на точность определения параметров входных сигналов устройств релейной защиты и автоматики // Энергетика, информатика, инновации – 2016: сб. тр. VI Международной науч.-тех. конф. (Смоленск, 24-25 ноября 2016 г.). – Смоленск, 2016. – С. 12-16.

18. Солопов Р.В. Оценка погрешностей при работе фильтров Фурье в устройствах релейной защиты // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 10. – С. 117-128.

19. Петелин С.А. Модель однофазного трансформатора тока // Цифровая подстанция – URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/29/model-odnofaznogo-transformatora-toka-s-nasyshheniem/> (дата обращения 27.11.2018).

20. Вайтеленок Л.В. Моделирование работы цифровых фильтров Фурье при насыщении трансформаторов тока // Энергетика, информатика, инновации – 2018: сб. тр. VIII Международной науч.-тех. конф. (Смоленск, 18-19 октября 2018 г.). – Смоленск, 2018. – С. 11-15.

21. Король Е.Г. Анализ методов моделирования магнитных характеристик электромагнитов для компенсации магнитного поля электрооборудования // Электротехника и электромеханика. – 2007. – № 2. – С. 31-34.

22. Пентегов И.В. Универсальная аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей / И.В. Пентегов, А.В. Красножон // Электротехника и электромеханика. – 2006. – № 1. – С. 66-70.

23. Баранов П.Ф. Программное обеспечение для эмуляции передачи мгновенных значений измерений в соответствии со стандартом МЭК 61850 / П.Ф. Баранов, С.В. Муравьев, А.О. Сулайманов // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 5. – С. 131-139.

Operation of the relay protection digital elements at saturation of current transformers: modeling and analysis

Vaytelenok L.

Department of Electrical Power Systems

Smolensk branch of National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

Smolensk, Russia

larisa.vaytelenok.786@mail.ru

Abstract. The paper is devoted to modeling and analyzing the operation of digital elements (DE) of relay protection at saturation of instrument current transformers (ICT). It reviews algorithms for DE based on calculations from instantaneous signal values and using Fourier filters. The secondary current values at saturation were obtained by modeling in the Matlab program using a simplified mathematical CT model. We studied the influence of such factors as the sample time and the damping decrement of the aperiodic component of the input signal on the accuracy of the DE operation. The obtained results from modeling were justified. It was

found that the nature of the change in errors is different for algorithms based on instantaneous values of signals, and for those based on Fourier filters. By increasing the damping decrement, the absolute errors decrease. When switching devices to the IEC 61850-9-2 data communication protocol, it is preferable to use an algorithm of two samples or DE based on Fourier filters.

Keywords: relay protection, digital elements, Fourier filter, modeling, current transformer, saturation.

Разработка функции приспособленности эволюционной модели электрической сети для расчета установившегося режима методом генетического алгоритма

Солопов Р.В., Самульченков А.С.
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске
Смоленск, Россия
solopov.rv@mail.ru, samulchenkov@yandex.ru

Аннотация. Тенденция активного внедрения методов искусственного интеллекта в абсолютное большинство сфер человеческой деятельности обусловлена перманентным развитием общества, и, как следствие, усложнением широкого круга задач, имеющих первостепенное значение, в частности, в отрасли электроэнергетики. Одной из таких задач является расчет установившихся режимов электрической сети (УРЭС), от корректного решения которой зависит должный уровень функционирования всего электроэнергетического комплекса. Ввиду сложности структур действующих электрических сетей возникает потребность в более современных с точки зрения подхода и реализации методов расчета, принцип работы которых в большей степени использует ресурс ЭВМ, нежели традиционные (итерационные) методы расчета. Именно поэтому такие направления в искусственном интеллекте, как эволюционное моделирование, и один из методов данного моделирования – генетические алгоритмы, являются наиболее актуальными областями исследования применительно к задачам электроэнергетики, в частности, к задаче расчета режимов электрической сети, так как данный метод, являясь априори оптимизационным ввиду специфики реализации, позволяет получать в конечном итоге оптимальный результат, что посредством традиционных итерационных методов осуществить затруднительно, так как нужно дополнительно формулировать и впоследствии решать преследующую именно цель оптимизации задачи. Особый интерес в реализации решений электроэнергетических задач методом генетического алгоритма представляет такой элемент, как функция приспособленности, так как именно посредством нее реализуется представление модели электрической сети в аналитическом виде и именно от правильности ее формирования зависит степень корректности полученных результатов. В данной работе представлены результаты разработки функции приспособленности генетического алгоритма для расчета установившегося режима электрической сети.

Ключевые слова: эволюционное моделирование, генетический алгоритм, функция приспособленности, электрические сети, расчет режима.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время методы искусственного интеллекта обширно и довольно успешно внедряются в различные области электроэнергетики, в частности, широко ведутся исследования в области расчета и оптимизации различных режимов электрических сетей, прогнозирования потерь мощности, прогнозирования электрической нагрузки энергосистем и так далее [1-11].

Наибольшее внимание на данный момент уделяется таким направлениям в искусственном интеллекте, как эволюционное моделирование, одним из методов которого является генетический алгоритм (ГА) [1-5], и искусственные нейронные сети (ИНС) [6-8].

ИНС являются перспективным направлением в исследованиях, цель которых – решение широкого круга задач прогнозирования [8]. Так как в основе ИНС лежит сложный механизм аппроксимации входных данных, позволяющий получать результаты с требующейся на практике точностью и скоростью и не накладывающий каких либо ограничений на ресурсы использующихся для реализации данного метода ЭВМ, основным препятствием, не позволяющим полноценно применять ИНС в практике расчетов режимов электрических сетей являются определенные трудности, связанные с обучением рассматриваемой ИНС [6-8], так как требуемый объем статистических данных зачастую доступен лишь в задачах, направленных на прогнозирование [8].

Применение ГА, напротив, обусловлено возможностью оптимизации и расчетов различных режимов электрических сетей, в частности, установившегося режима, более качественно и корректно в сравнении с традиционными математическими методами, а именно – итерационными (метод Ньютона-Рафсона и др.) [1,2]. Основной особенностью ГА, выгодно отличающей его от традиционных методов расчета, является принцип реализации, основанный на поиске оптимального решения путем использования механизмов теорий естественного отбора и эволюции в аналитической интерпретации с сохранением биологической терминологии в упрощенном виде [1,2,5]. Возможность построения алгоритма расчета с позиции его естественности, относительно протекания в природе, позволяет рассмотреть задачу расчета режимов с принципиально новой точки зрения.

Основным элементом, напрямую связывающим ГА и рассматриваемую электрическую сеть является функция приспособленности или целевая функция. Данная функция должна обеспечивать корректное аналитическое представление рассматриваемого физического объекта, учитывая все характерные особенности ему присущие. Для рассматриваемого объекта (электрической сети) – это соответствие разрабатываемой функции приспособленности всем электротехническим законам, посредством которых произво-

дится математическое описание физической модели электрической сети, т.е. соответствие эволюционной модели и модели физической.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПОСТРОЕНИЯ ГА

ГА основывается на принципе поэтапного видоизменения изначально сформированной популяции индивидов с целью определения через заданное количество поколений наиболее приспособленных особей, т.е. оптимальных решений.

Условно ГА можно разделить на следующие этапы [12,13]:

- Выбор вида представления исходных данных – большое количество задач, при решении которых целесообразно применение ГА, не позволяют, ввиду особенностей специфики рассматриваемой тематики, представлять исходные данные в явном виде, по причине определенных сложностей, связанных с последующей реализацией алгоритма. Поэтому широкое распространение получила практика кодировки исходных данных посредством бинарного кода, кода Грея и др. Данную проблему можно нивелировать разработкой структуры ГА, которая направлена на реализацию узкоспециализированных задач.

- Формирование начальной популяции решений. Под популяцией подразумевается определенное количество индивидов, которые представляются в виде хромосом – набора случайным образом сгенерированных решений, так называемых генов, каждый из которых находится на определенной позиции в хромосоме. По сути, совокупность хромосом характеризует множество решений рассматриваемой математической модели – n -размерной системы уравнений, где n – количество генов в каждой из хромосом. В зависимости от тематики рассматриваемой задачи нужно учитывать ограничения, изначально предъявляемые к исходным данным (диапазон изменения и т.д.), и возможность изменения количества изначально генерируемых хромосом, которое напрямую зависит от сложности рассматриваемой задачи и требуемого уровня точности решения.

- Выбор конфигурации каждого из основных операторов случайных изменений ГА. Основными операторами, применяемыми при построении ГА являются: оператор селекции, кроссинговер, оператор мутации. Оператор селекции позволяет наиболее рациональным образом выявлять и впоследствии избавляться от наиболее неприспособленных особей в популяции с целью дальнейшего видоизменения лишь лучших представителей. Кроссинговер (оператор, отвечающий за воспроизведение нового потомства) реализуется посредством определенной модели скрещивания – обмена генами, расположенными на определенных позициях в хромосомах, основной функцией которого является видоизменение хромосом предшествующей популяции. Оператор мутации предназначен для предотвращения вырождения поколений и реализуется посредством видоизменения генов с заданной вероятностью. Совокупность вышеперечисленных операторов с различными видами конфигураций дает возможность построения ГА, отвечающего всем требованиям поставленной задачи.

- Формирование функции приспособленности – аналитической модели рассматриваемого физического объекта, отвечающей основным требованиям, предъявляемым спецификой реализации ГА. ГА, по своей сути являясь адаптивным методом поиска лучших представителей популяции, предполагает решения задачи оптимизации. Из этого следует, что функция приспособленности, вне зависимости от целей, которые преследует решение задачи (далеко не всегда оптимизационные), должна формироваться в виде функции, дающей возможность реализации поиска решений в виде решения задачи оптимизации, но не обязательно ее преследующей. Также существенное значение, как было отмечено ранее, оказывает вид рассматриваемого физического объекта и совокупность всех ограничений, накладываемых на его математическое описание ввиду особенностей, характерных для отдельно рассматриваемой отрасли исследований.

- Выбор критериев остановки расчета – обусловлен, в первую очередь, целями, которые преследуют решения различных задач, т.к. именно они накладывают непосредственное ограничение на требуемую точность полученных результатов.

Данная структура, представляя из себя только лишь базовые ступени ГА [2,12,13], позволяет разработать основу алгоритма, которую впоследствии неизбежно нужно будет дополнять специально разработанными или адаптированными под цели решаемой задачи этапами. Также особого внимания заслуживает архитектура ГА, которая, зачастую, принимает довольно сложные формы, ввиду реализации алгоритма с помощью различных совокупностей отдельных блоков для обеспечения требуемого уровня точности и предотвращения преждевременной сходимости [13].

ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ ПРИСПОСОБЛЕННОСТИ НА БАЗЕ УРАВНЕНИЙ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА УРЭС

Рассмотрим нелинейные уравнения узловых напряжений, которые описывают УРЭС при задании нелинейных источников тока, т.е. генераторы и нагрузки задаются постоянными мощностями, которые соответствуют нелинейным источникам тока в схеме замещения электрической сети [14-16].

Отличительной особенностью рассматриваемой системы нелинейных уравнений, применяемой для расчета УРЭС методом ГА, в сравнении с теорией классических расчетов [14-17], является отсутствие базисного узла и наличие балансирующего лишь в неявном виде. Это обусловлено тем, что при расчете УРЭС методом ГА хромосомы изначально формируются из напряжений и углов, случайно сгенерированных в определенном диапазоне, который напрямую зависит от номинального значения напряжения того или иного узла, а баланс мощности соблюдается путем изначального задания суммарной мощности генераторов, равной суммарной мощности всех нагрузок. После получения окончательного результата суммарная требуемая генерируемая мощность корректируется с учетом рассчитанных потерь в электрической сети.

Система нелинейных уравнений (1), описывающая электрическую сеть с количеством узлов равным n , будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_1 \cdot \dot{Y}_{11} + \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_{12} + \dots + \dot{U}_{(n-1)} \cdot \dot{Y}_{1(n-1)} + \\ + \dot{U}_n \cdot \dot{Y}_{1n} = \frac{\bar{S}_1}{\bar{U}_1}; \\ \dot{U}_1 \cdot \dot{Y}_{21} + \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_{22} + \dots + \dot{U}_{(n-1)} \cdot \dot{Y}_{2(n-1)} + \\ + \dot{U}_n \cdot \dot{Y}_{2n} = \frac{\bar{S}_2}{\bar{U}_2}; \\ \vdots \\ \dot{U}_1 \cdot \dot{Y}_{(n-1)1} + \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_{(n-1)2} + \dots + \dot{U}_{(n-1)} \cdot \dot{Y}_{(n-1)(n-1)} + \\ + \dot{U}_n \cdot \dot{Y}_{(n-1)n} = \frac{\bar{S}_{(n-1)}}{\bar{U}_{(n-1)}}; \\ \dot{U}_1 \cdot \dot{Y}_{n1} + \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_{n2} + \dots + \dot{U}_{(n-1)} \cdot \dot{Y}_{n(n-1)} + \\ + \dot{U}_n \cdot \dot{Y}_{nm} = \frac{\bar{S}_n}{\bar{U}_n}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где \bar{S}_k - комплексно-сопряженная постоянная трехфазная мощность узла k ($k=1, 2, \dots, n$); \dot{U}_k - линейное напряжение узла k ; \dot{Y}_{kk} - собственная проводимость узла k ; \dot{Y}_{kj} - взаимная проводимость узла k ($j=1, 2, \dots, n; k \neq j$).

Далее задача расчета УР ЭС сводится к определению неизвестных напряжений в узлах рассматриваемой электрической сети.

Модуль и угол напряжения в каждом из узлов, как было отмечено ранее, задается случайно сгенерированным значением, каждое из которых соответствует определенному гену в хромосоме. После, посредством поэтапного видоизменения, производится формирование новых популяций хромосом (совокупности решений), соответствие которых требуемому результату оценивается исходя из значения функции их приспособленности. Так как данная функция должна иметь оптимизационный характер, т.е. преследовать цель минимизации или максимизации результата, произведем ряд преобразований с уравнениями системы (1) для возможности дальнейшего формирования окончательного вида этой функции.

В общем случае каждый из n узлов может являться нагрузочным (2), генераторным (3) или одновременно нагрузочным и генераторным (4):

$$\dot{U}_k \cdot \dot{Y}_{kk} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \dot{Y}_{kj} \cdot \dot{U}_j + \frac{\bar{S}_{k(N)}}{\bar{U}_k} = 0; \quad (2)$$

$$\dot{U}_k \cdot \dot{Y}_{kk} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \dot{Y}_{kj} \cdot \dot{U}_j - \frac{\bar{S}_{k(G)}}{\bar{U}_k} = 0; \quad (3)$$

$$\dot{U}_k \cdot \dot{Y}_{kk} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \dot{Y}_{kj} \cdot \dot{U}_j + \frac{\bar{S}_{k(N)}}{\bar{U}_k} - \frac{\bar{S}_{k(G)}}{\bar{U}_k} = 0. \quad (4)$$

Формулы (2) – (4) представляют собой уравнения небаланса токов, и их равенство нулю справедливо только для идеального случая – когда потери мощности в сети отсутствуют. В общем случае, для описания каждого из n узлов электрической сети, целесообразно применять формулу (4), так как при отсутствии генератора или нагрузки в рассматриваемом узле переменные, соответствующие их мощностям, просто принимают нулевое значение.

После выполнения алгебраических преобразований и, учитывая наличие потерь мощности в реальных электрических сетях, получаем уравнение (5):

$$\bar{U}_k \cdot \dot{U}_k \cdot \dot{Y}_{kk} + \bar{U}_k \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \dot{Y}_{kj} \cdot \dot{U}_j + \dot{S}_{k(N)} - \dot{S}_{k(G)} = \Delta \dot{S}_k, \quad (5)$$

где $\Delta \dot{S}_k$ - небаланс мощности в k -ом узле рассматриваемой сети ($k=1, 2, \dots, n$).

Учитывая все преобразования, осуществленные с уравнениями, входящими в систему (1), можно переписать ее в матричном виде (6):

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{U}_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \bar{U}_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \dots & \bar{Y}_{1n} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \dots & \bar{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{n1} & \bar{Y}_{n2} & \dots & \bar{Y}_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{S}_{1(N)} \\ \dot{S}_{2(N)} \\ \dots \\ \dot{S}_{n(N)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{S}_{1(G)} \\ \dot{S}_{2(G)} \\ \dots \\ \dot{S}_{n(G)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{S}_1 \\ \Delta \dot{S}_2 \\ \dots \\ \Delta \dot{S}_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

С точки зрения формирования и реализации эволюционной модели электрической сети, важнейшим критерием правильности которого является корректность и соответствие всем накладываемым ограничениям разрабатываемой функции приспособленности ГА, матричное уравнение (6) представляет наибольший интерес.

Оно в полной мере отражает сущность всех физических процессов, протекающих в электроэнергетической системе, и является корректной математической моделью, учитывающей специфику применяемого метода расчета, т.к. целью решения данного матричного уравнения является минимизация небалансов мощности в электрической сети.

Итоговая форма записи функции приспособленности имеет следующий вид (7):

$$F = \sum_{j=1}^n |\Delta S_j| \rightarrow \min \quad (7)$$

Особого внимания заслуживает тот факт, что при рас-

чете функции (7) вычисляется модуль суммарной мощности небаланса, а не комплексное значение. Это обусловлено тем, что при задании рассматриваемой функции в подобном виде производится расчет УР ЭС путем оптимизации по абсолютному значению потерь мощности.

Таким образом, сущность расчета УР ЭС методом ГА заключается в минимизации модулей небалансов мощности в электрической сети.

ПРИМЕР РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ПРостейшей замкнутой электрической сети методом ГА

Рассмотрим, в качестве расчетной схемы, схему электрической сети, представленной на рис. 1 [15].

Рассматриваемая электрическая сеть (рис.1) имеет один генераторный узел и три нагрузочных. Наличие нагрузки в 1-ом узле обусловлено учетом зарядных мощностей воздушных линий электропередач, реактивная генерируемая мощность которых представляется для каждого из узлов не в виде проводимостей, а в виде отрицательной нагрузочной мощности.

Как было отмечено ранее, с целью расчета УР ЭС составляется система нелинейных уравнений, на базе которой формируется функция приспособленности (7) и ведется расчет до получения значений потерь мощности в электрической сети, удовлетворяющих условиям задачи.

Расчет установившегося режима трехузловой замкнутой электрической сети (рис.1) производился посредством специально разработанной (на базе адаптированного под решение задач расчета режимов ГА) компьютерной программы [1]. Необходимость реализации ГА посредством программного обеспечения (ПО) обусловлена сложностью, в настоящее время функционирующих и непрерывно развивающихся, электрических сетей.

С целью верификации полученных результатов был произведен расчет установившегося режима рассматриваемой электрической сети посредством ПО RastrWin3.

RastrWin3 представляет собой программный комплекс, предназначенный для решения широкого круга электроэнергетических задач - расчета, анализа и оптимизации различных режимов электрических сетей и систем. В настоящее время основными пользователями данного ПО являются: Системный Оператор Единой Энергетической Системы (СО ЦДУ ЕЭС) и его филиалы; Федеральная Сетевая Компания (ФСК) и ее подразделения; проектные и научно-исследовательские институты (ВНИИЭ, НИИПТ).

В основе расчета ПО RastrWin3 лежат традиционные (итерационные) методы расчета. Этот факт обуславливает необходимость изначального искусственного ограничение аналитической модели рассматриваемой электрической сети, а именно: задание базисного и балансирующего узлов.

В табл. 1 представлены результаты расчета независимых переменных (узловых напряжений) установившегося режима рассматриваемой трехузловой электрической сети. В качестве базисного и балансирующего узла, для расчета УР ЭС с помощью ПО RastrWin3, был принят узел 1, т.е. напряжение в нем задавалось изначальное (номинальное значение), а напряжения двух оставшихся узлов рассчитывались в ходе решения задачи.

Таблица 1

Результаты расчета параметров установившегося режима рассматриваемой электрической сети

| Номер узла | Генетический алгоритм | | RastrWin3 | |
|------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | Модуль напряжения, кВ | Фаза, градусы | Модуль напряжения, кВ | Фаза, градусы |
| 1 | 113,67 | 0,19 | 110 | 0 |
| 2 | 108,59 | -1,66 | 104,18 | -2,09 |
| 3 | 107,47 | -1,75 | 102,55 | -2,16 |

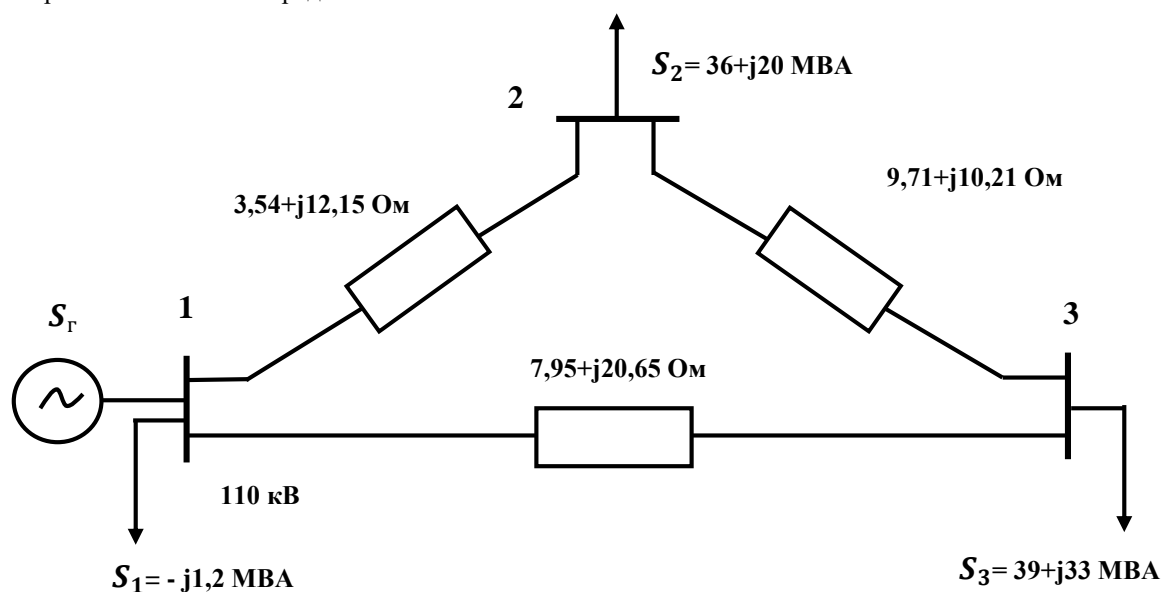


Рис. 1. Схема рассматриваемой электрической сети

После, полученные результаты узловых напряжений рассчитанные методом ГА, были приняты в RastrWin3 в качестве базисных с целью сравнения конечного значения потерь мощности в рассматриваемой сети со значениями потерь, получившимися при исходном значении напряжений. Результаты расчета потерь мощности в электрической сети, полученные при исходных значениях напряжений в RastrWin3 и значениях напряжений, рассчитанных методом ГА и принятых за базисные в RastrWin3 представлены в табл.2.

Таблица 2

Результаты расчета потерь потребляемой мощности установившегося режима рассматриваемой электрической сети

| | RastrWin3 (Исходные значения напряжений) | | RastrWin3 (Значения напряжений, полученные ГА) | |
|------------------------|---|---------------------------|---|---------------------------|
| | Активная мощность, МВт | Реактивная мощность, МВАр | Активная мощность, МВт | Реактивная мощность, МВАр |
| Потери мощности | 2,38 | 6,88 | 1,77 | 5,21 |

Суммарные потери мощности в электрической сети, получившиеся при расчете УР ЭС методом ГА, оказались количественно меньше потерь мощности, полученных при расчете УР ЭС программой RastrWin3 (табл.2).

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что применение методов эволюционного моделирования, в частности, ГА, является перспективным направлением в исследованиях расчета режимов электрических сетей, т.к. они позволяют в большей степени, нежели традиционные методы расчета, нивелировать искусственные ограничения, накладываемые на физическую модель электрической сети аналитическим аппаратом.

Важнейшим критерием возможности реализации расчета УР ЭС методом ГА является условие корректности разработанного на всех этапах алгоритма и правильно составленной функции приспособленности, учитывающей все характерные для рассматриваемой задачи особенности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов эволюционного моделирования является перспективным и бурно развивающимся направлением в электроэнергетической отрасли. Это обусловлено тем, что посредством таких методов расчета, как ГА, возможна реализация более гибких алгоритмов, направленных на решение широкого круга задач электроэнергетики, в частности, задачи расчета УР ЭС. Моделирование посредством ГА различных процессов, протекающих в реальных электрических сетях, позволяет избежать значительных аналитических ограничений, накладываемых традиционными методами расчета, таких, как: здание базисного и балансирующего узлов; оверхестствие системы нелинейных уравнений узловых напряжений с целью их дальнейшей дифференциации и др.

Разработанная функция приспособленности, посредством которой стало возможно осуществить расчет УР ЭС методом ГА [1], полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым законами электротехники к физической модели электрической сети. Являясь относительно

простым аналитическим выражением, она позволяет производить расчеты, по степени точности не уступающие традиционным методам, для реализации которых используется более громоздкий аналитический аппарат [1,2].

Основным достоинством разработанной функции приспособленности является возможность расчета УР ЭС искусственно его не ограничивая, что позволяет получать результаты принципиально нового качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самульченков А.С. Применение генетического алгоритма для расчета установившегося режима электрической сети / А.С. Самульченков, Р.В. Солопов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т.22. – №2. – С. 131–141.
2. Самульченков А.С. Опыт применения генетических алгоритмов для расчета установившегося режима электрической сети / студ. А.С. Самульченков, рук. Р.С. Солопов // Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве): сборник научных трудов XV-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов в 3 т. (г. Смоленск, 26 – 27 апреля 2018г.). – Смоленск, 2018. – Т 1. – с. 64-67.
3. Yuancheng Li. A hybrid artificial bee colony assisted differential evolution algorithm for optimal reactive power flow / Yuancheng Li, Yiliang Wang and Bin Li. // Electrical Power and Energy Systems. – 2013. – No. 52. – pp. 25 – 33.
4. Gajendra Sahu and Kuldeep Swarnkar. Review of Reactive Power Optimization Using Evolutionary Computation Techniques / Gajendra Sahu and Kuldeep Swarnkar // Advance in Electronic and Electric Engineering. – 2014. – No. 4. – pp. 73 – 82.
5. Манусов В.З. Оптимизация режимов электроэнергетических систем на основе эволюционных вычислений / В.З. Манусов, Д. А. Павлюченко // Проблемы энергетики. – 2002. – №1-2. – С. 12 – 19.
6. Саенко Ю.Л. Применение нейронных сетей при оптимизации режима реактивной мощности в разветвленных электрических сетях / Ю.Л. Саенко, В.В. Любарцев // Электрификация транспорта. – 2016. – №1. – С. 53 – 57.
7. Баламетов А.Б. О применении нейронных сетей при расчетах установившихся режимов электрических сетей / А.Б. Баламетов, Э.Д. Халилов // Проблемы энергетики. – 2009. – №1. – С. 21 – 31.
8. Хохлов М.В. Новые информационные технологии в задачах оперативного управления электроэнергетическими системами / М.В. Хохлов, Н.А.Манов, Ю.Я.Чукреев, М.И.Успенский и др. – Екатеринбург: УрО РАН,2002. – С.102 – 126.
9. Солопов Р.В. Алгоритм комплексной оптимизации режимов электроэнергетической системы с использованием обобщенных критериев подобия / Р.В. Солопов, В.П. Кавченков, Солопов Р.В. // Программные продукты и системы. – 2013. – № 1. С. 101 – 103.
10. Solopov R. Effective solution of large-scale optimization problems using the similarity criteria / R. Solopov, V. Kavchenkov, L. Doletskaya, V. Kiselev // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – No 12. – pp. 3539-3541.

11. Solopov R.V. Criterion complex optimization in electric-power systems/ R.V. Solopov // Russian Electrical Engineering.2017. – No. 5. – pp. 280–284.

12. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы / Т.В. Панченко. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87с.

13. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М: ФИЗМАТЛИТ,2006. – 320 с.

14. Аюев Б.И. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах: монография / Б.И.

Аюев, В.В. Давыдов, П.М. Ерохин, В.Г. Неуймин. – М: Изд-во Флинта; Наука,2008. – 256с.

15. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2017. – 592 с.

16. Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.

17. Ортега Д. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными / Д. Ортега, В. Рейнболдт. – М.: Изд-во Мир, 1975. – 560с.

Development of the Fitness Function of the Electrical Network Evolutionary Model for Computing of the Settling Behaviour Using the Method of Genetic Algorithm

Solopov R.V., Samulchenkov A.S.

Smolensk branch of Moscow Power Engineering Institute
(national research university)

Smolensk, Russia

solopov.rv@mail.ru, samulchenkov@yandex.ru

Abstract: The tendency of active introducing of the artificial intelligence methods into the absolute majority of spheres of human activity is due to the permanent development of society and, as a result, to the complication of a wide range of tasks of prime importance, in particular, in the electric power industry. One of these tasks is computing of the electrical network settled behavior, on the correct solution of which depends the proper level of functioning of the entire electric power complex. Due to the complexity of the structures of existing electrical networks, there is a need for new methods which are more modern in terms of approach and implementation of computing, the principle of which uses computer resources more than traditional (iterative) calculation methods. That is why such directions in artificial intelligence as evolutionary modeling, and one of the methods of such modeling which consists in genetic algorithms, are the most relevant areas of research in relation to the problems of electric power industry, in particular, to the task of computing the electrical network modes,

since this method, being a priori optimizing in view of the implementation specifics, makes it possible to obtain in the end an optimal result, which is difficult to accomplish using traditional iterative methods, as it is necessary to further formulate and subsequently solve precisely the task of optimization. Such an element as the fitness function is of particular interest in reaching power goals using the method of genetic algorithm, since it is precisely through the fitness function that the electrical network model representation is realized and implemented in an analytical form. Also, the degree of correctness of the results depends on the completeness of formation of the fitness function. This paper presents the results of the development of the genetic algorithm fitness function for computing the electrical network settling behavior.

Keywords: evolutionary modeling, genetic algorithm, fitness function, electrical networks, mode computing.

Цифровой двойник как инструмент развития информационных технологий предприятия

Пономарев К.С., Феофанов А.Н., Гришина Т.Г.

ФГБОУ ВО МГТУ «Станкин»

Москва, Россия

sergej.ponomarev@bk.ru

Аннотация. В статье отмечено, что информация на данный момент развития цифровых систем в аспекте управления деятельностью предприятия является одним из наиболее ценных ресурсов. Авторами указывается, что использование методов "виртуальной реальности" приводит к развитию виртуальных копий предприятий - цифровых двойников предприятия. Отмечено, что цифровой двойник - это набор математических моделей, которые описывают тот или иной объект реального мира, а так же дает возможность моделировать изменение его состояния в реальном времени. Описаны потенциальные преимущества и недостатки технологии цифрового двойника производства, а так же приведены примеры внедрения указанной технологии. Сформулировано, что цифровые двойники являются важным шагом на пути к переходу к технологиям дополненной реальности, и как следствие, к развитию концепций безлюдного производства.

Ключевые слова: цифровой двойник, автоматизация, производство, Индустрия 4.0

ВВЕДЕНИЕ

Информация в современных условиях Индустрии 4.0 приобретает главенствующую роль в аспекте эффективного управления предприятием. Получение адекватной и оперативной информационной сводки обо всех процессах функционирования предприятия – ключ к принятию эффективных управленческих решений, нацеленных на повышение производительности и конкурентоспособности бизнеса. В наступившую эру цифровых технологий виртуальная реальность находит свое применение в самых различных областях – и, в том числе, в сфере управления предприятием, результатом чего стало появление виртуальных копий существующих производств - «цифровых двойников» производства.

По сути, «цифровой двойник» - это виртуальная копия физического мира, реального объекта или ситуации, в которой с помощью набора математических моделей, описывающих состояние объекта и всех его элементов, фиксируются все данные о материалах, особенностях конструкции, произведенных операциях и испытаниях. Цифровой двойник позволяет в виртуальном пространстве смоделировать изменение состояния и характеристик всего изделия при изменении характеристик любого из его элементов благодаря тому, что созданная виртуальная трехмерная модель изделия связана с информационной базой данных, в которой каждому элементу можно присвоить дополнительные атрибуты. [1] Изменение одного из параметров проекта влечет за собой автоматическое изменение остальных связанных с ним параметров и объектов. Цифровые модели помогают уполномоченным сотрудникам предприятия принимать правильные решения - например, в каком режиме должна работать та или иная система. Мониторинг ее работы позволяет увидеть, в каком она состоянии, сколько еще может проработать и в каком именно режиме, когда

может понадобиться внеплановое обслуживание.[2] Кроме того, цифровизация создает возможности для быстрой переналадки оборудования и техпроцессов, что повышает гибкость производственной системы

Применительно к производству ценность «цифрового двойника» заключается в уникальной возможности виртуально имитировать всю производственную систему, что позволяет проверять и оптимизировать её. «Цифровой двойник» также позволяет проконтролировать процесс изготовления изделия, его деталей и узлов, при помощи разработанных технологических процессов, имеющих производственных линий и систем автоматизации. Более того, «цифровой двойник» дает возможность включить и задачи логистики для разработки эффективной схемы поставок материалов на производственную линию. Таким образом, задачи снабжения решаются и в рамках «цифрового двойника», и в рамках реальной логистической системы. [3] По данным Siemens, повышение эффективности существующих логистических систем в этом случае варьируется в пределах 15–20 % . Кроме того, одной из неоспоримых ценностей цифрового двойника производства является то, что с помощью различных методов имитационного моделирования можно производить виртуальный эксперимент с большой долей адекватности реально существующей модели функционирования предприятия, изменяя, например, параметры технологического процесса, компоновку рабочего пространства цеха, изменяя свойства и составы используемого сырья. При этом обеспечивается экономия временных и финансовых ресурсов, а, главное – снижаются риски, связанные с необходимостью внедрения тех или иных изменений в реально функционирующей технологический процесс производства. Другими словами, с помощью цифрового двойника можно смоделировать различные варианты организации производственных, логистических, технологических процессов, и, на основе полученных виртуальных результатов, принять решение о внедрении наиболее эффективного решения (например, с учетом сочетания необходимых целевых значений), либо же наоборот, отказаться от неоправданных изменений. Интеграция с реальными производственными операциями создает каналы ценной обратной связи. [3] Благодаря этому, «цифровой двойник» действительно точно описывает производственные процессы в их динамике и учитывает изменения, неизбежно происходящие в реальной жизни, а также позволяет, по данным Siemens, сократить время производственного цикла примерно на 20 %.

Далее, применение цифровых двойников производства служит целям повышения предиктивности управления предприятием за счет получения и накопления оперативной информации о функционировании систем предприятия при помощи промышленного интернета и систем диагностики. [4] В дальнейшем, на основе полученных данных,

система цифрового двойника позволяет моделировать возможные отклонения от нормального течения производственных процессов при изменениях, связанных с недостатком сырья, износом оборудования, выходом из строя элементов технологического процесса. Используя методы «цифрового двойника», можно на порядок сократить количество натуральных испытаний, число попыток отработки техпроцессов, всех тех действий, которые связаны с изготовлением реальной материальной части и её испытаниями, стоимость которых значительно выше, чем стоимость математического моделирования. [5] Появляется возможность выявить потенциальные проблемы на самом раннем уровне, а не при непосредственном исполнении производственного процесса. Также, собираемая информация о состоянии материальных средств производства позволяет повысить их ремонтпригодность. Такая информация (получаемая с датчиков) обеспечивает надлежащее техобслуживание по техническому состоянию, что сокращает простой оборудования и повышает его производительность. [3]

Применение цифрового двойника производства открывает возможности более продуктивной и оперативной кооперации между предприятиями, например, входящими в один холдинг. Появляется возможность координации деятельности предприятий из единого информационного центра управления, в который передаются все данные по «цифровым двойникам» предприятий. На основе полученной информации специалисты вышеуказанного центра анализируют складывающуюся ситуацию, и могут повлиять на работу всего холдинга или концерна путем принятия того или иного управленческого решения. Например, если два предприятия выпускают схожую номенклатуру изделий, есть возможность смоделировать ситуацию перераспределения количества выпуска продукции между ними в целях высвобождения мощностей одного из них для производства другой продукции или же для более рационального и эффективного использования имеющихся материальных и трудовых ресурсов. Также иногда может возникнуть ситуация, когда на одном из предприятий необходимое для производства продукции оборудование вышло из строя. Тогда, с помощью интеграции данных от MES-систем предприятий в едином цифровом информационном пространстве «цифрового двойника» можно получить необходимый вариант оптимального перераспределения загрузки оборудования на том предприятии, где данное оборудование имеется в работоспособном состоянии. Вообще, интеграция систем CALS-технологий (CAD, CAM, CAE, PLM, PDM, SCADA, ERP, MES) в единой цифровой среде цифрового двойника создает предпосылки для применения безлюдных и автоматических технологий на производстве. На основе цифрового двойника появляется возможность анализировать информацию, контролировать и управлять такими процессами на производстве, как:

- календарное планирование производства (на основе информации от MES / ERP - систем);
- контроль расхода материалов и энергии;
- управление запасами материальных ресурсов;
- обеспечение качества выпускаемой продукции;
- исследования, разработки и проектирование (в том числе, на основе информации от CAD/CAM/CAE)
- обработка заказов;
- управление производством;

- управление техническим обслуживанием;
- управление запасами готовой продукции;
- составление и распределение ведомостей о дефектах продукции по службам предприятия;
- сбор технологических данных о процессах;
- анализ эффективности и затрат на производство продукции;
- учет и работа со стандартами предприятия;
- документирование и учет требований заказчика;
- организация отгрузки продукции.

Так, к числу функций обработки заказов обычно относят: прием и подтверждение заказов потребителей (например, заказ, поступивший от одного цеха к другому на производство какой-либо продукции), обработка дефектных ведомостей и резервирование материалов, размещение производственных заказов. Функции календарного планирования производства связаны с функциями систем управления технологическими процессами через график производства, информацию о ходе производства и информацию о производственных мощностях. Обмен информацией с помощью цифрового двойника позволяет достичь повышения оперативности принятия решения и предотвратить потери информации, связанные с человеческим фактором. Что касается контроля расхода материалов и энергии, цифровой двойник позволяет получить адекватную и достоверную информацию, о том, какая партия сырья на данный момент используется в производстве, каковы запасы сырья на данный момент, дает возможность координировать и отслеживать заявки на материалы и энергоресурсы, поступающие от различных подразделений предприятия.

Применительно к функциям обеспечения качества на предприятии, цифровой двойник позволяет отслеживать количество брака, обеспечивает доступ к базе данных стандартов и других нормативных документов, предоставляет возможность фиксировать отклонения характеристик материалов и изделий от стандартов и передачу этой информации технологам для оценки и последующего совершенствования технологических процессов. Например, часть продукции по результатам испытаний была забракована сотрудниками отдела технического контроля. В этом случае в цифровой двойник поступает информация о том, сколько изделий было забраковано, копии отчетов/протоколов о браке, дата и время составления отчета/ протокола о браке, сотрудник, ответственный за принятое решение, оборудование, на котором проводилось испытание и т.д. Также с помощью цифрового двойника можно передать информацию в MES-систему, которая произведет пересчет производственного расписания с целью оптимальной загрузки оборудования, в случае, если требуется срочно изготовить некоторое количество продукции взамен забракованной. Кроме того, существует возможность проверять полученные результаты производства на предмет удовлетворения требованиям стандартов заказчика.

Количество готовой продукции на складе, готовой к отгрузке, сведения об отгрузке, сопроводительная документация (акт об отгрузке, транспортная накладная) и отчеты о задержках или неотгруженной продукции также передаются в цифровой двойник. При возникновении спорных случаев, связанных с повреждением продукции по прибытию ее к заказчику, появляется возможность отследить весь

ее жизненный цикл с момента прибытия сырья, до отгрузки, и таким образом установить возможные причины возникших несоответствий. Информационный поток, поступающий непосредственно от производства содержит сведения о результатах текущих и завершенных производственных операций, поступающие в процессе реализации плана. Обычно эти данные говорят о том, что было произведено, в каких объемах и когда. Управление производством при помощи стратегии цифрового двойника позволяет в полном объеме отслеживать практически все операции, связанные как с непосредственным превращением исходных материалов в готовую продукцию, так и получать данные и управлять конструкторско-технологической подготовкой производства, производить оперативное управление и оперативное планирование.

Как уже было отмечено, информация о сбоях в работе технологического оборудования с помощью специальных датчиков также передается в систему цифрового двойника. Таким образом, обеспечивается процедуры самоконтроля и технической диагностики оборудования, обеспечивается обратная связь со службой технологической подготовки производства по текущему состоянию обслуживаемого оборудования в части характеристик производительности и надежности. По накопленным статистическим данным можно получить примерный срок профилактического ремонта оборудования, в целях определения сроков такого ремонта так, чтобы максимально учесть текущую и прогнозируемую загрузку оборудования. Также существует возможность получения информации о методах и процедурах технического обслуживания согласно принятым государственным или внутренним стандартам на техническое обслуживание того или иного средства производства. По результатам проведенного технического обслуживания составленный отчет также можно передать в информационную среду цифрового двойника предприятия.

Вся теория, положенная в основу создания стратегии цифрового двойника, разрабатывалась довольно давно, однако еще 10–15 лет назад вычислительных мощностей и возможностей сетей передачи данных не хватало для массовой реализации подобного рода задач. Теперь же вычислительные платформы позволяют реализовать эти принципы, в том числе, благодаря облачным технологиям. [6] Для решения задачи непосредственной связи оборудования с аналитическим программным обеспечением «цифрового двойника» используется промышленный интернет вещей (IIoT – Industrial Internet of Things), который обеспечивает связь сенсоров, датчиков и другой аппаратуры сбора данных с системами управления производством и цифровым двойником производства с помощью непосредственно проводной связи или технологиями ZigBee, LTE или Wi-Fi (рис. 1). К тому же, после накопления определенного массива информации и определении наиболее критических мест функционирования системы, появляется возможность четкой идентификации критических зон, в которых имеет смысл размещать те или иные датчики. Это позволяет существенно снизить количество таких датчиков и получаемый объем данных, отбирая из них самые необходимые, а так же повысить скорость обработки и внесения информации в «цифровой двойник».

Конечно, применение «цифрового двойника» должно быть осмысленным решением. Как отмечает Андрей Коряжкин, начальник экспериментально-технологического цеха службы главного инженера ПАО «ОДК – Сатурн», основная сложность – «большой объем работы по цифровизации всех объектов и технологических процессов существующего или создаваемого производства, нехватка высококвалифицированных специалистов в этой области». [5] Если владелец бизнеса не имеет четко выбранной стратегии развития своего дела, то переход к «цифре» может не только оказаться бессмысленным, а даже и навредить, в связи с пока что высокой стоимостью проектов цифровизации производства. Андрей Кутин, директор института машиностроения и инжиниринга ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» считает, что основная сложность при разработке «цифрового двойника» производства заключается в разработке математических моделей поведения производственной системы и определении точных мест для получения такой информации. [2] Так же, при передаче информации между элементами цифровых систем всегда существует риск непреднамеренного искажения информации, ее потери или хищения вследствие преступных действий злоумышленников. В этом аспекте важным моментом является необходимость оперативного и надежного осуществления процесса передачи цифровой информации между такими системами. [7] В связи с этим, вопросам кибернетической безопасности при создании цифровых моделей производств или изделий должно уделяться пристальное внимание.



Рис. 1. Принципы реализации обработки и использования информации в концепции технологии цифрового двойника

Таким образом, концепция «цифрового двойника» подразумевает соединение физического и цифрового мира через взаимодействие оборудования и аналитического программного обеспечения, полностью выполняя главный принцип «Индустрии 4.0»: переход к использованию киберфизических систем. Как уже было отмечено, в рамках

технологии «цифрового двойника» для физического объекта, единицы оборудования, целого процесса или предприятия, создается математическая модель, которая в дальнейшем используется для анализа поведения объекта. Более того, цифровая модель постоянно обновляется, чтобы максимально полно соответствовать текущему рабочему режиму реальной обстановки. Это дает возможность выявить непредусмотренные изменения в процессах, оптимизировать режимы работы оборудования, предотвращать поломки и аварии, что в итоге позволяет существенно повысить надежность и эффективность эксплуатации. Как уже было отмечено, применение технологий «цифрового двойника» является еще одним шагом к переходу к безлюдному производству. Так, сообщается, что в г. Шымкенте (Казахстан) в рамках проекта BitumPlant компанией «Газпром-Нефть» создается полностью оцифрованный завод-робот с возможностью удаленного управления. Согласно плану разработчика, там будет развернута цифровая система метрологического онлайн-контроля с каналами передачи больших потоков информации из автоматизированной системы управления техпроцессами в информационное поле «цифрового двойника», а так же планируется, что указанные «цифровые двойники» будут иметь возможность самообучения. [8]

Выводы

Резюмируя вышесказанное, отметим, что внедрение «цифрового двойника» на производства способствует удовлетворению потребности максимально возможного сокращения длительности циклов проектирования и производства, обеспечивает гибкость и прозрачность производственных процессов, снижает вероятность возникновения ошибок, связанных с невозможностью проведения должного числа экспериментов. «Цифровые двойники» являются важным шагом на пути к переходу к технологиям дополненной реальности, и как следствие, к развитию концепций безлюдного производства. В этой связи необходимо поддерживать инновационные идеи, направленные на автоматизацию и цифровизацию всех сфер социальной активности. [7]

Конечно, на современном этапе существуют различные проблемы определенного свойства, связанные с относи-

тельной молодостью данной концепции, такие как, например, отсутствие нормативной базы, недостаток высококвалифицированных специалистов в этой области, дороговизна разработки и внедрения «цифрового двойника» предприятия. Однако, потенциальный эффект от их внедрения, развитие технологий Индустрии 4.0, необходимость повышения конкурентоспособности предприятий и следования общемировым трендам развития общества и экономики делает концепцию цифровизации одной из самых перспективных на сегодняшний день.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.rbcpplus.ru> (дата обращения 29.11.2018)
Экономика двойников: как роботы приходят в менеджмент — URL: <http://www.rbcpplus.ru/news/5b5e4f2f7a8aa92e8c50df14>
2. Колерова В. Цифровое раздвоение заводов еще впереди // Эксперт. – 2018. – № 44. С. 26 - 32
3. Фюер Ц. Преимущества “цифрового двойника” / Ц. Фюер, Ц. Вейсманн // CAD/CAM/CAE Observer. 2017. – №5 (113). – С. 50-53.
4. Боровков А.И. "Умные" цифровые двойники - основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения / А.И. Боровков, Рябов Ю.А., Марусева В.М. // Корпоративный журнал дивизиона «Двигатели для гражданской авиации» АО «ОДК». – 2018. – № 13. – С. 12-22.
5. <https://cheremuha.com> (дата обращения 29.11.2018)
Цифровой двойник: зачем создавать в виртуальной среде симуляторы деталей, двигателей и целых цехов – URL: <https://cheremuha.com/2018/04/13/digital-twin.html>
6. <https://tass.ru> (дата обращения 20.12.2018)
Siemens представит новую версию системы создания "цифровых двойников" – URL: <https://tass.ru/ekonomika/5045355>
7. Феофанов А.Н. Системы электронного документооборота, как инструмент цифровой экономики / А.Н. Феофанов, К.С. Пономарев, М.А. Шутиков // Технология машиностроения. – 2018. – №9. – С. 69–74.
8. Орлов С. Управление эффективностью // Сибирская нефть. – 2017. – № 146. – С. 22–27

Digital Twin as an Implement for the Development of Enterprise Information Technologies

Ponomarev K.S., Feofanov A.N., Grishena T.G.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education «Moscow State University of Technology «STANKIN»

Moscow, Russia

sergej.ponomarev@bk.ru

Abstract. The article notes that the information at current moment of development of digital systems in the aspect of management of the enterprise is one of the most valuable resources. Authors indicate that the use of the methods of "virtual reality" leads to the development of virtual copies of enterprises - digital twins of the enterprise. It is noted that the digital twin is a set of mathematical models that describe a particular object in the real world, and also provides an opportunity to simulate a change in its state in real time. The potential advantages and disadvantages of the

digital twin production technology are described, as well as examples of the implementation of this technology are given. It is formulated that digital twins are an important step towards the transition to augmented reality technologies, and as a consequence, to the development of concepts of unmanned manufacturing.

Keywords: digital twin, automating, manufacturing, Industry 4.0.

Конечные автоматы как модель управления производственной системой дискретного типа

Алехин А.Г.
Волгоградский государственный
технический университет
Волгоград, Россия
alekhinag@gmail.com

Силаев А.А.
Волжский политехнический институт
Волжский, Россия
aa_silaev@mail.ru

Аннотация. Разработана автоматная модель дискретно-логической системы управления конвейерным производством на базе автоматной модели Мура. В качестве примера выбрана конвейерная лента с двумя кнопками управления, с двумя датчиками положения и с двумя направлениями движения. Для формализации данных об объекте управления составлена математическая модель системы управления в виде графа переходов. Решена задача синтеза управляющего логического устройства, который состоит из блока памяти, блока логических условий и блока выходов, в виде системы логических уравнений. Программная реализация системы управления выполнена на языке релейных схем LD. Показано, что применение моделей конечных автоматов при разработке программ систем управления для промышленных контроллеров позволяет снизить количество логических ошибок в коде.

Ключевые слова: автоматная модель, конвейерная система, программирование промышленных контроллеров, дискретно-логическая система управления, граф переходов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основой машиностроения является роботизированное конвейерное производство. Данное производство стоит из набора стадий и операций, которыми можно управлять с помощью дискретно-логических систем управления. Особенностью подобных систем является наличие большого множества сигналов от дискретных датчиков и исполнительных механизмов, которые непрерывно взаимодействуют друг с другом.

Для программирования подобного рода систем разработаны специализированные языки стандарта МЭК 61131-3 [1, 2, 3, 4, 5], но они не решают проблемы создания единого подхода к алгоритмизации.

В настоящее время многие, особенно начинающие разработчики промышленных систем управления используют интуитивные навыки алгоритмизации, не пользуясь известными шаблонами (pattern) программирования. При этом программы показывают успешное выполнение задания, но при этом часто не проходят на корректность кода. Это обусловлено тем, что при интуитивном подходе невозможно учесть множество факторов, хотя количество условий в задачах было незначительное [6, 7, 8], а при усложнении условия задачи, в подобных «программах» требуется существенно исправить код и логику алгоритмов, а то и полностью их переписать.

Теоретики программирования еще в 70 годах прошлого века открыто признали кризис программного обеспечения [9], который, по мнению многих ученых, продолжает-

ся и по сей день. Главным симптом этого кризиса – неспособность разработчиков обеспечить основное свойство программного обеспечения: его корректность. Поэтому все разговоры по быстрдействию выполнения кода программы, хорошего пользовательского интерфейса не так актуально, как корректность кода.

В связи с этим, целью, данной статьи, является познакомить читателя с применением автоматного подхода к программированию дискретно-логических систем управления, что позволит расширить кругозор по алгоритмизации задач управления конвейерным производством.

Большое количество научных исследований в области автоматного программирования проведено за последние 20 лет [6, 7, 9, 10, 11, 12, 13]. Результаты показали эффективность автоматного метода разработки программ. Но вместе с тем реализация автоматной модели управления для дискретных систем управления на языках программирования промышленных контроллеров в научной литературе представлено недостаточно. Можно отметить работы следующих авторов [14, 15, 16, 17, 18], где показана эффективность использования pattern программирования.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим каждый из этапов проектирования системы управления движением конвейерной ленты с применением автоматной модели программирования по следующему алгоритму:

1. На конвейере находится предмет. По нажатию кнопки S1 конвейер движется вправо до датчика положения B2;
2. По касанию датчика B2 конвейер движется влево до касания датчика положения B1;
3. По касанию датчика B1 конвейер движется вправо до касания датчика B2;
4. Цикл повторяется до тех пор, пока оператор не нажмет кнопку S2.

В общем случае, автоматная модель системы управления состоит из трех блоков [7, 8, 10] (см. “рис. 1”): устройства логического управления (УЛУ), блока таймеров (БТ) и блока управления (БУ). Обмен информацией в модели происходит между множеством сигналов:

- X – множества сигналов от датчиков;
- U – множество управляющих сигналов, идущих от УЛУ к исполнительным механизмам;
- Y – множество сигналов от кнопок и ключей ручного управления;
- I – множество сигналов, поступающих на блок управ-

ления от УЛУ;

D – множество сигналов, управляющих таймерами в блоке БТ;

Z – множество сигналов из блока таймеров, свидетельствующих об окончании требуемых выдержек времени.

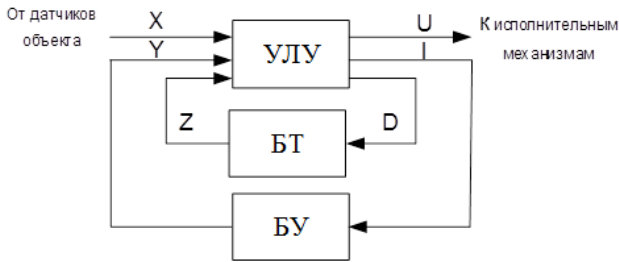


Рис. 1. Структура автоматной модели программы управления

При разработке программ основываясь на автоматной модели необходимо выполнить три этапа:

- 1 – формализовать данные об объекте управления в виде графа переходов;
- 2 – произвести синтез управляющей системы;
- 3 – реализовать программу на языке программирования.

Этап первый. Формализация данных об объекте.

Граф переходов составляется на основании словесной формулировки алгоритмов управления, а также введения обозначения сигналов в следующей последовательности [6, 7, 19, 20]:

1 Определяется начальное состояние объекта, из которого начинается процесс управления, и для него вводится начальное состояние на графе переходов. Для этого состояния определяются значения всех выходных сигналов УЛУ, а также соответствующие им состояния исполнительных механизмов объекта и элементов на блоке управления. Все начальные состояния выходных сигналов прописываются в начальном состоянии графа переходов.

2 Определяется очередность состояний объекта и необходимо для этого изменение состояний исполнительных механизмов. Каждый переход из начального состояния в последующие изображается направленной линией, связывающей изображение этих состояний. Над стрелкой указывается логическое условие, при выполнении которого осуществляется данный переход (см. “рис. 2”). Если из данного состояния возможны несколько переходов, то все они изображаются направленными переходами с соответствующими условиями переходов, при этом все условия должны быть взаимоисключающими, иначе это будет противоречить требованию однозначности алгоритма.

3 Чтобы избежать избыточного числа состояний на графе переходов, каждое новое состояние вводится только тогда, когда аналогичного состояния на графе не ввводилось. Аналогичными или идентичными состояниями графа переходов называют состояния, в которых формируются одинаковые выходные сигналы для исполнительных механизмов и БУ.

4 Построение графа переходов продолжается до тех пор, пока все последовательности состояний не образуют замкнутые циклы или подграфы. Наличие или появление тупиковых состояний, из которых нет переходов в другие состояния, свидетельствует, как правило, либо об ошибках построения графа переходов, либо о неполноте или ошибочности исходных данных, приведенных в словесной формулировке алгоритма. В этом случае необходимо доопределить и замкнуть граф соответствующим переходом “рис. 2”.

Для начала определим состояния системы управления:

St_0 – начальное состояние ожидания действия оператора;

St_1 – состояние движения конвейерной ленты вправо;

St_2 – состояние движения конвейерной ленты влево.

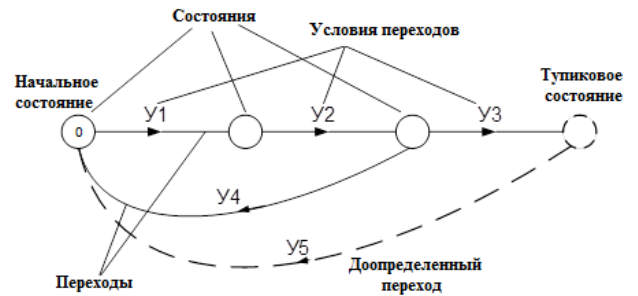


Рис. 2. Основные компоненты графа переходов

Определим входные сигналы от блока управления и датчиков:

- $S1$ – кнопка пуск;
- $S2$ – кнопка стоп;
- $B1$ – датчик правого положения;
- $B2$ – датчик левого положения.

Определим выходные сигналы для исполнительных механизмов:

- M_R – сигнал управления движением конвейерной ленты вправо;
- M_L – сигнал управления движением конвейерной ленты влево.

Согласно приведенному описанию составим граф переходов, показанный на “рис. 3”.

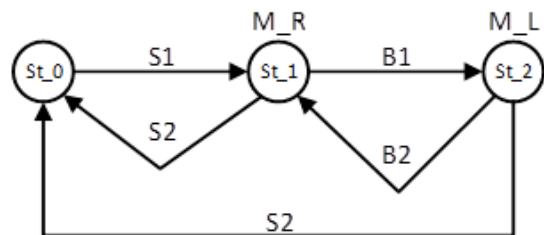


Рис. 3. Схема графа переходов

Как видно из рисунка 3 представление алгоритма управления движения конвейерной лентой является более наглядным по сравнению если бы мы алгоритм описали при помощи блок-схемы.

На втором этапе производим логический синтез управляющего логического устройства, структура которого состоит из следующих элементов (см. "рис. 4"):

– БЛУ – блок логических условий переключения элементов памяти в БП, формирующий включающие S и выключающие R сигналы;

– БП – блок памяти, содержащий RS-триггеры, формирующие на своих прямых выходах сигналы "а";

– БВ – блок выходов, формирующий выходные сигналы управляющего логического устройства и поступающие на объект U, блок таймеров D и пульта управления I.

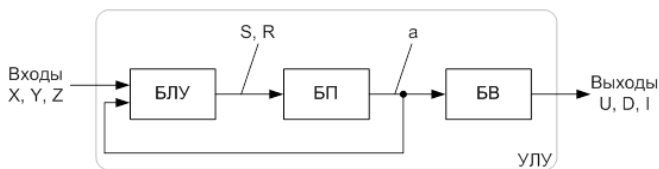


Рис. 4. Структурная схема УЛУ с позиционной структурой

Этап второй. Синтез управляющей программы.

Синтез выполняется на основе составленного графа переходов в следующей последовательности:

1. Синтез блока БП. Количество элементов памяти БП выбирается равным числу состояний на графе переходов. Для разрабатываемой системы управления число элементов памяти равно трем.

2. Синтез блока БЛУ. Под синтезом данного блока понимается составление структурных формул для включающих S_i и выключающих R_i сигналов каждого элемента памяти в БП. При этом под включающим сигналом понимается дискретный сигнал, приводящий триггеры в единичное состояние, а под выключающим сигналом понимается дискретный сигнал, приводящий триггеры в нулевое состояние. Каждый включающий сигнал S_i формируется при одновременном выполнении следующих условий:

БП находится в правильном предшествующем состоянии, чему соответствует включённое состояние только одного из триггеров БП;

выключены все триггеры возможных предшествующих состояний данного состояния;

выполнены условия перехода в последующие состояния.

Все три условия объединяются логической операцией «И»:

$$S_i = \text{условие1} \ \& \ \text{условие2} \ \& \ \text{условие3}. \quad (1)$$

Если включающих сигналов несколько, то все они объединяются логической операцией «ИЛИ».

Выключающий сигнал R_i формируется при следующем условии: при переходе БП в каждое последующее состояние все триггеры предшествующих состояний выключаются. Если выключающих сигналов несколько, то все они объединяются логической операцией «ИЛИ».

Описываем состояние St_0 :

$$S_0 = (St_2 \ \& \ \overline{St_1} \ \cup \ \overline{St_1} \ \& \ \overline{St_0}) \ \& \ S2, \quad (2)$$

$$R_0 = St_2 \ \cup \ St_1. \quad (3)$$

Описываем состояние St_1 :

$$S_1 = St_0 \ \& \ \overline{St_2} \ \& \ S1 \ \cup \ \overline{St_2} \ \& \ \overline{St_1} \ \& \ B1, \quad (4)$$

$$R_1 = St_0 \ \cup \ St_2. \quad (5)$$

Описываем состояние St_2 :

$$S_2 = St_1 \ \& \ (\overline{St_0} \ \cup \ \overline{St_2}) \ \& \ B2, \quad (6)$$

$$R_2 = St_1. \quad (7)$$

3. Синтез блока выходов.

БВ построен на базе RS-триггеров. Для этого на графе переходов находят состояния, в которых данный выходной сигнал совершает переход из 0 в 1. Выходами элементов памяти этих состояний формируют включающий сигнал S_i . Аналогично записывают выключающий сигнал R_i при переходе 1 в 0. Если таких состояний несколько, то все они объединяются логической операцией «ИЛИ».

Конвейерная лента, согласно условию задачи, может двигаться вправо или влево: движение конвейерной ленты вправо:

$$S_1 = M_R, \quad (8)$$

движение конвейерной ленты влево:

$$S_2 = M_L. \quad (9)$$

4. Составление функциональной схемы УЛУ или программы в виде совокупности всех трёх блоков.

Этап третий. Реализация программы на языке программирования.

На третьем этапе на основе полученных логических уравнений составляется программа на языке программирования промышленного контроллера.

Проведены большое количество исследований [6, 7, 8, 10, 13] по реализации автоматных моделей программирования на различных архитектурах вычислительных машин от ПЛИС до промышленных контроллеров. Исследования показывают, что реализация автоматной модели программирования позволяет получить работающую систему при минимальных временных затратах на тестирования программы. Методика программирования использующую автоматную модель объекта управления приведена ниже.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В качестве языка программирования будем использовать язык релейных схем LD [4, 21], который интегрирован в среду программирования контроллеров ПЛА PORTAL.

Язык программирования LD относится к графическим языкам программирования. Синтаксис языка удобен для разработки логических схем, выполненных на релейной технике. Язык LD разрабатывали в первую очередь для инженеров по автоматизации. LD обеспечивает наглядный интерфейс логики работы контроллера, облегчающий не только задачи собственно программирования и ввода в эксплуатацию, но и быстрый поиск неполадок в подключаемом к контроллеру оборудовании.

Программа на языке LD выглядит интуитивно понятно, так что любой инженер по автоматизации и электрики сможет легко ее прочитать и понять, ведь логические операции здесь представляются в виде электрической цепи с разомкнутыми и замкнутыми контактами.

Для поставленной задачи на языке LD нам необходимо реализовать два блока БЛУ, БВ.

Блок БП на языке LD в нашем случае можно не созда-

вать, т.к. выделенные состояния реализуются в блоке БЛУ.

Реализуя БЛУ на языке LD по составленным выше логическим уравнениям для каждого состояния, выделяем две строки кода. Первая строка кода определяет условие перехода в требуемое состояние, вторая строка состояния, которые необходимо сбросить.

Для реализации БВ выделяем одну строку кода для каждого управляющего воздействия на технологический процесс. В нашем случае это две строки кода для подачи управляющего воздействия на исполнительные механизмы: движение конвейерной ленты влево и вправо.

Листинг программы для состояния St_0.

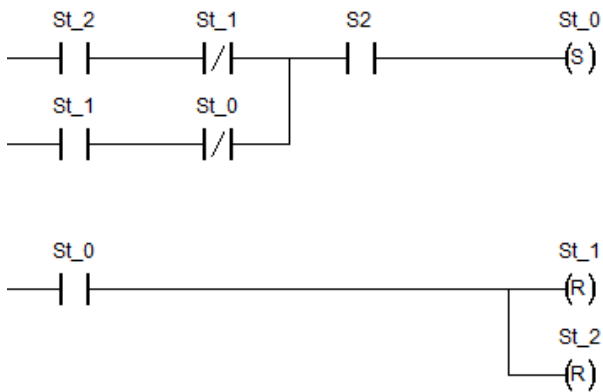


Рис. 5. Листинг программы для состояния St_0

Листинг программы для состояния St_1.

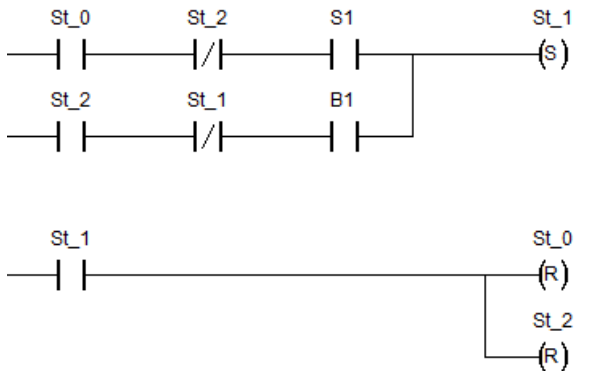


Рис. 6. Листинг программы для состояния St_1

Листинг программы для состояния St_2.

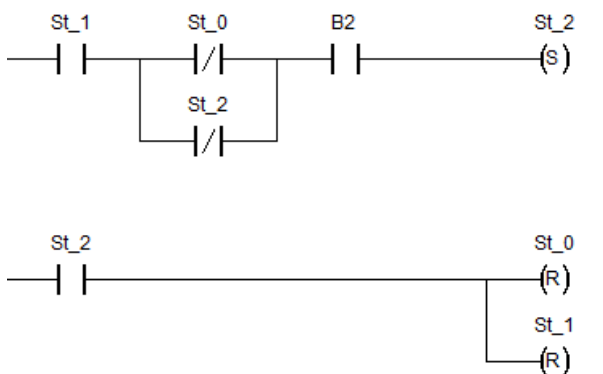


Рис. 7. Листинг программы для состояния St_2

Листинг программы движения конвейерной ленты влево и вправо.

На этом проектирование программы дискретной системы управления конвейерной ленты закончено.

После разработки программы проводится тестирование. Тестирование показало корректность написанного кода. Конвейерная лента отработала все условия задачи:

1. На конвейере находится металлический предмет. По нажатию кнопки S1 конвейер движется вправо до датчика положения B2;

2. По касанию предметом датчика B2 конвейер движется влево до касания датчика положения B1;

3. По касанию предметом датчика B1 конвейер движется вправо до касания датчика B2;

4. Цикл повторяется до тех пор, пока оператор не нажмет кнопку S2.

Ошибки, которые могли появиться при разработке, связаны с неверно составленным графом состояний и переходов, а также опечатками при наборе кода. Однако полученные ошибки можно выявить на этапе тестирования. При этом скрытых ошибок нами не выявлено.

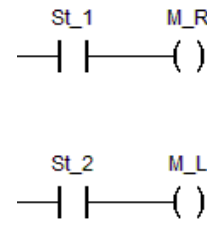


Рис. 8. Листинг программы движения конвейерной ленты влево и вправо

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно отметить, что данный способ проектирования дискретно-логической системы управления с помощью автоматного программирования прост в разработке, легко приспособляется под различные задачи автоматизации машиностроения и позволяет исключить многие скрытые логические ошибки написания программ.

С помощью наглядного примера показана эффективность и простота использования автоматной модели при проектировании автоматизированных систем управления дискретного типа конвейерным производством.

К достоинствам данного способа проектирования систем управления дискретного типа можно ещё отнести надежность и стабильность системы управления. Так как все состояния объектов управления прописаны и логически связаны условиями переходов, что не допускает наличия незапланированных действий и состояний.

Масштабирование подобных систем заключается в дополнении в граф переходов новых состояний и переходов. При этом предыдущий программный код может претерпеть минимум изменений, которые легко прослеживаются по новой автоматной модели.

К недостаткам данного подхода написания программного кода можно отнести то, что нельзя комбинировать подход конечных автоматов с другими моделями. Т.е. вся

дискретная система управления должна быть спроектирована в рамках концепции конечных автоматов и графов переходов. Но если систему управления детализировать и разбить на логические блоки и подсистемы, то в рамках отдельных блоков можно применять теорию конечных автоматов, а для других блоков использовать другие подходы программирования. Это позволяет обойти существующий недостаток.

Таким образом, применение автоматной модели позволяет повышать эффективность программирования дискретно-логических систем управления конвейерным производством, а, следовательно, снизить затраты на проектирование автоматизированной системы в целом и уменьшить время на пуско-наладочные работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. International Electrotechnical Commission. IEC 61131-3. Programmable Controllers – Part 3: Programming Languages (2nd Edition). Final Draft International Standard (FDIS), 2002.
2. International Electrotechnical Commission SC 65B: Device and Process Analysis. IEC 61131-3. Programmable Controllers – Part 3: Programming Languages (3rd Edition). Committee Draft, 2010.
3. Peng S.S. Ladder diagram and petri net based discrete event control design methods / S.S. Peng, M.C. Zhou // IEEE trans. on Systems, Man and Cybernetics. – 2004. – vol. C is. 34(4). – P. 523–531.
4. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.
5. Шишов О.В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации: учеб. для вузов. – Москва : ИНФРА-М, 2016. – 365 с.
6. Малинин С.Н. Тестирование объектно-ориентированных программ моделированием конечными автоматами // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – №2. – С. 63-70.
7. Шальто А.А. Автоматное проектирование программ. Алгоритмизация и программирование задач логического управления // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2000. – № 6. – С. 63-81.
8. Дубинин В.Н. Проектирование и реализация систем управления дискретными событийными системами на основе иерархических модульных недетерминированных автоматов (Ч. 1. Формальная модель) / В. Н. Дубинин, Д. Н. Дроздов, Д. В. Артамонов // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – №1 (37). – С. 28-39.
9. Поликарпова Н.И. Автоматное программирование. / Н.И. Поликарпова, А.А. Шальто. Санкт-Петербург: ИТМО, – 2008. – 167 с.
10. Шульга Т.Э. Исследование адаптивности программного обеспечения на основе применения математических моделей функционально избыточных дискретных систем / Т.Э. Шульга, М.Д. Сластихина // Вестник СГТУ. – 2015. – №1 (80). – С. 158-166
11. Manesis S. Automated synthesis of ladder automation circuits based on state diagrams / S. Manesis, K. Akantziotis // Advances in Engineering Software. – 2005. – vol. 1. is. 36(4). P. 225–233.
12. Гуров В.С. Инструментальное средство для поддержки автоматного программирования / В.С. Гуров, М.А. Мазин, А.С. Нарвский, А.А. Шальто // Программирование. – 2007. – № 6. – С. 65-80.
13. Шальто А.А. SWITCH-технология - автоматный подход к созданию программного обеспечения «реактивных» систем / А.А. Шальто, Н.И. Туккель // Программирование. – 2001. – №5. – С. 45-62.
14. Wu Z. Design and validation of fault diagnoser based on finite state automaton and sequential function chart for plc based manufacturing system / Z. Wu, S-J. Hsieh // ISCIE 2012 International Symposium on Flexible Automation (St. Louis, Missouri, USA, June 18–20, 2012y.). – St. Louis, 2012. – P. 213-222.
15. Frey G. A re-engineering approach for PLC programs using finite automata and UML / G. Frey, M.B. Younis // Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration. – 2004. – IRI 2004. – P. 24-29.
16. Янкин Ю.Ю. Автоматное программирование ПЛИС в задачах управления электроприводом / Ю.Ю. Янкин, А.А. Шальто // Информационно-управляющие системы. – 2011. – №1. – С. 50-56.
17. Лоскутов А. И. Автоматизация контроля состояния сложных технических систем на основе использования конечно-автоматной модели и нейросетевых структур / А. И. Лоскутов, В.Б. Вечеркин, О.Л. Шестопалова // Информационно-управляющие системы. – 2012. – №2 (57). – С. 74-81.
18. Корсунов Н.И. Метод построения контролируемых цифровых автоматов / Н.И. Корсунов, Е.В. Чуев, А.И. Чуева // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2014. – №15-1 (186). – С. 90-95.
19. Баркалов А.А. Синтез автомата Мура с преобразованием расширенных кодов состояний / А.А. Баркалов, Л.А. Титаренко, Е.П. Хебда, К.А. Солдатов // АСУ и приборы автоматизации. – 2010. – №153. – С. 12-18.
20. Ганов В.А. Конечные автоматы и нормальное исчисление Поста / В.А. Ганов // Известия АлтГУ. – 2012. – №1 (73). – С. 31-35.
21. Минаев И.Г. Программируемые логические контроллеры. Практическое руководство для начинающего инженера. / И.Г. Минаев, В.В. Самойленко. Ставрополь: АГРУС, 2009. – 100 с.

Finite Automata as Control Model for Manufacturing Discrete Type System

Alyoukhin A.G.
Volgograd State Technical University
Volgograd, Russia
alekhinag@gmail.com

Silaev A.A.
Volzhskij Polytechnic Institute
Volzhskij, Russia
aa_silaev@mail.ru

Abstract. The authors developed an automaton model of a discrete-logical system for controlling the conveyor based on the Moore model of automata. As an example, a conveyor belt with two control buttons, with two position sensors and with two directions of movement is selected. For the formalization of information about the control object the authors made the control system of the mathematics model in a form of transition graph. The problem of control logical system's synthesis is solved. It consists of a memory block, logical conditions block and the exits block in a form of logical equitation's system. The problem of synthesis of the control logic device, which

consists of a memory block, a logic conditions block and an output block, is solved in the form of a system of logical equations. The software implementation of the control system is made in the language of relay circuits LD. It is shown that the use of models of finite automata in the development of control systems for industrial controllers reduces the number of logical errors in the code.

Keywords: automata model, conveyer system, programming of industrial controllers, discrete-logical control system, transition graph.

Пром-Инжиниринг
труды V Всероссийской научно-технической конференции

25-29 марта 2019 года

Москва-Челябинск-Новочеркасск-Волгоград-Сочи

Текстовое электронное издание

50,0 Мб

Ответственный редактор: профессор, доктор техн. наук А.А. Радионов

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано к использованию 20.06.2019
Заказ 353

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76