

**Международная  
научно-техническая конференция**  
**Пром-Инжиниринг**

---

**International Conference on  
Industrial Engineering**

Челябинск, 2015



Министерство образования и науки Российской Федерации

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

**Пром-Инжиниринг**  
**труды международной научно-технической конференции**

22-23 октября 2015 года

Челябинск-Новочеркасск

*Проект реализован при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований*

Пром-Инжиниринг: труды международной научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 245 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. Приводятся результаты теоретических исследований и особенности практического применения новых функциональных материалов и технологий. Рассмотрены вопросы инноваций и ресурсосбережения в металлургии. Изложены особенности построения автоматизированных электромеханических систем, систем энергообеспечения, промышленных мехатронных и робототехнических систем. Приводятся результаты исследований электротехнологических комплексов и систем, систем и технологий управления. Также рассмотрены вопросы моделирования и компьютерных технологий промышленных установок, объектов, процессов.

Материалы опубликованы в авторской редакции.

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

ISBN 978-5-696-04732-4

© Авторы, 2015

© Издательский центр ЮУрГУ

## **ОРГКОМИТЕТ КОФЕРЕНЦИИ**

### *Председатель*

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

### *Программный сопредседатель*

**Кравченко О.А.**, доктор технических наук, доцент, Новочеркасск, Российская Федерация

### *Международный программный комитет*

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

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

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

**Булгаков А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, Дрезден, Германия

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

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

**Ганджа С.А.**, доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

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

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

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

**Дементьев Ю.Н.**, Ph. D., канд. техн. наук, доцент, Томск, 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

**Дьяконов А.А.**, доктор техн. наук, Челябинск, Российская Федерация

**Исаков В.С.**, доктор техн. наук, профессор, Новочеркасск, 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

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

**Михайлов Г.Г.**, доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

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

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

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

**Спиридонов Е.К.**, доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

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

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

**Erkki Lahderanta**, Ph.D., Full Professor, Lappeenranta, Finland

**Karali Patra**, Ph.D., Assistant Professor, Patna, India

**Rainer Niewa**, Dr., Full Professor, Stuttgart, Germany

### *Оргкомитет*

**Воронин С.С.**, Челябинск, Российская Федерация

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

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

**Маклаков А.С.**, Челябинск, Российская Федерация

**Маклакова Е.А.**, Челябинск, Российская Федерация

**Чернышев А.Д.**, Челябинск, Российская Федерация



**СОДЕРЖАНИЕ**

Вступительное слово председателя оргкомитета конференции.....	6
<b>Машиностроение</b>	
<i>Попов А.Е., Бакиев Д.Р.</i> Стенд для исследовательских испытаний макета двигателя с объемным самовоспламенением гомогенного заряда.....	7
<i>Попов А.Е., Дайбов В.И.</i> Экспериментальные исследования автомобильного двигателя 4Ч 8,2/7,56 с искровым зажиганием при работе на обедненных смесях.....	11
<i>Спиридонов Е.К.</i> Характеристики и расчет кавитационных смесителей.....	14
<i>Назаров Ф.М., Форенталь В.И., Форенталь М.В.</i> Исследование динамических характеристик гидропривода с пропорциональным управлением.....	17
<i>Редников С.Н.</i> Вязкостные характеристики углеводородов в области высоких давлений.....	22
<i>Плаксин А.М., Гриценко А.В., Глемба К.В.</i> Модернизация системы смазки турбокомпрессора двигателя внутреннего сгорания.....	25
<i>Добров И.В.</i> Развитие научных основ динамики машин как раздела прикладной механики.....	30
<i>Новиков В.В., Поздеев А.В., Дьяков А.С.</i> Научно-испытательный комплекс для исследования узлов подпрессоривания транспортных средств.....	36
<i>Ахмедьянова Е.Н., Пташкина-Гирина О.С.</i> Нестационарные режимы влагоудаления.....	40
<i>Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В.</i> Сравнительная оценка виброзащитных свойств подвески с различными маховичными динамическими гасителями колебаний кузова автомобиля.....	43
<i>Русаков Н.А., Карташев А.Л., Карташева М.А.</i> Проектирование ракет-носителей с кольцевыми соплами внешнего расширения.....	48
<i>Амбарцумянц Р.В., Дели И.И.</i> Расчет и проектирование центробежной фрикционной муфты с клиновым преобразователем усилий.....	51
<i>Глебов В.В.</i> Термовакuumное нанесение прозрачных проводящих слоев на полупроводниковые электрод-инструменты для электрохимической обработки изделий машиностроения.....	56
<i>Илимбетов Р.Ю., Возмилов А.Г., Попов В.В.</i> Сравнительный анализ моделирования процессов движения электромобиля «НГТУ – Электро» в программах MATLAB Simulink и AVL Cruise.....	62
<i>Шеркунов В.Г., Дубинский Ф.С., Загуменнов О.В.</i> Новые возможности производства металлопроката на современном металлургическом комбинате.....	67
<i>Романов В.А., Лазарев Е.А., Хозенюк Н.А.</i> Влияние условий охлаждения на напряженно-деформированное состояние головки цилиндра форсированного дизеля.....	70
<i>Коваль Г.И., Закарлюкин С.И.</i> Применение радиальнойковки и прокатки-ковки при производстве заготовок и профилей из специальных сплавов... ..	77
<i>Шароглазов Б.А., Гофман А.В.</i> Особенности нагружения элементов механизма преобразования движения бескривошипной поршневой машины-двигателя.....	80
<i>Глемба К.В., Аверьянов Ю.И.</i> Обоснование параметров и режимов работы устройства тепловой комфортности оператора мобильной машины.....	85
<i>Шепелев С.Д., Черкасов Ю.Б., Шепелев В.Д.</i> Взаимосвязь сезонной нагрузки и технической готовности зерноуборочного комбайна.....	90
<i>Максимов Ю.В., Исаков В.С.</i> Обоснование адаптивного рабочего органа канатного экскаватора.....	94
<b>Материаловедение и технологии промышленного производства</b>	
<i>Винник Д.А., Трофимов Е.А., Жеребцов Д.А.</i> Экспериментальное исследование и термодинамическое моделирование фазовых равновесий, реализующихся в системе BaO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	98
<i>Аникеев А.Н., Чуманов И.В.</i> Изучение угла смачивания карбида циркония.....	102
<i>Самойлов С.П., Чернявский А.О.</i> Прогнозирование длительной прочности молибденового сплава.....	105
<i>Михайлов Г.Г., Морозова А.Г., Лонзингер Т.М., Скотников В.А.</i> Формирование фотокаталитических наночастиц на поверхности сорбента-фотокатализатора.....	110
<i>Королькова Л.И., Мащрабов Н.М.</i> Поверхностная закалка деталей электрической дугой.....	117

<i>Криони Н.К., Мингажева А.А., Кононова А.Ю.</i> Азотирование деталей из легированных сталей при высокоэнергетической обработке поверхности.....	122
<i>Винник Д.А., Гудкова С.А., Нива Р.</i> Выращивание монокристаллов частично замещенного алюминием гексаферрита бария из раствора на основе оксида свинца.....	127
<i>Трофимов Е.А., Самойлова О.В.</i> Изучение условий образования кристаллов карбида кремния в металлическом расплаве сложного состава.....	131
<i>Яценко Н.Д., Голованова С.П.</i> Белизна минералов керамики и клинкера белого порتلандцемента в зависимости от содержания хромофоров.....	136
<i>Рябова А.В., Хорошавина В.В., Давитян М.В.</i> Функциональные композиционные стекломалевые покрытия для защиты стальных изделий.....	141
<i>Трофимов Б.Я., Шульдяков К.В.</i> Молотый доменный гранулированный шлак и способы его активации.....	146
<i>Знаменский Л.Г., Ивочкина О.В., Варламов А.С.</i> Экономичные керамические формы в литье по выплавляемым моделям.....	153
<i>Кулаков Б.А., Дубровин В.К., Карпинский А.В.</i> Компьютерное моделирование литья титан-алюминиевого интерметаллидного сплава.....	157
<b>Системы управления и автоматизации технологических процессов и объектов</b>	
<i>Пятибратов Г.Я., Бекин А.Б., Богданов Д.Ю.</i> Совершенствование тренажеров осуществляющих имитацию на Земле перемещений в условиях невесомости и пониженной гравитации.....	160
<i>Пятибратов Г.Я., Богданов Д.Ю., Бекин А.Б.</i> Синтез системы управления движением объекта на гибком подвесе при действии внешних сил.....	166
<i>Бочкарев И.В.</i> Исследование электропривода насосных установок, выполненного на базе асинхронного двигателя двухстороннего питания.....	172
<i>Бочкарев И.В.</i> Вопросы прогнозирования надежности силовых электромагнитных устройств для мехатронных систем.....	177
<i>Андреев А.А., Возмилов А.Г., Калмаков В.А.</i> Моделирование работы литий-ионного аккумулятора в суровых климатических условиях.....	181
<i>Соломин Е.В., Топольский Д.В., Топольский Н.Д.</i> Организация обмена данными между адаптивным цифровым трансформатором тока и напряжения и SCADA-системой в стандарте МЭК 61850.....	185
<i>Соломин Е.В., Топольский Д.В., Топольская И.Г.</i> Алгоритмы автоматической зарядки LiFePO <sub>4</sub> аккумуляторов.....	191
<i>Смолин В.И., Топольская И.Г.</i> Алгоритмы управления асинхронным генератором ветроэнергетической установки.....	195
<i>Шохин В.В., Пермякова О.В.</i> Исследование систем регулирования межклетевых натяжений при стабилизации моментов прокатных двигателей... <i>Садов В.Б., Плотникова Н.В.</i>	200
<i>Бурцева О.А., Ткачев А.Н., Чипко С.А.</i> Использование технико-экономического критерия управления установкой с штанговым глубинным насосом.....	207
<i>Григорюк Е.Н.</i> Катковая система компенсации колебаний высотного сооружения в сейсмоактивной зоне.....	210
<i>Келлер А.В., Чернявский А.О., Вдовин Д.С.</i> Система управления технологическим процессом изготовления изделий типа «BOXER».....	214
<i>Горелов В.А., Комиссаров А.И., Мирошниченко А.В.</i> Прочность кулачковой муфты блокировки дифференциала грузовых автомобилей.....	217
<i>Бурцев Ю.А.</i> Моделирование колесного транспортного средства 8×8 в программном комплексе автома-тизированного анализа динамики систем тел.....	221
<i>Терехин А.А., Золотых И.К.</i> Расчеты электрических цепей с помощью метода сопряженных градиентов.....	226
<i>Гречихин В.В., Ланкин М.В., Ланкин А.М.</i> Испарительная установка обессоливания воды основанная на вихревом эффекте Ранка-Хилша.....	231
<i>Ткаченко Г.И., Бакланов А.Н.</i> Диагностика электромагнитов по вебер-амперной характеристике рабочего цикла.....	235
<i>Горбатенко Н.И., Ланкин М.В., Ланкин А.М.</i> Метод резонансной последовательно-параллельной идентификации.....	239
<i>Горбатенко Н.И., Ланкин М.В., Ланкин А.М.</i> Решение обратной задачи гармонического баланса методом натурно-модельных испытаний электротехнических устройств.....	242

## **ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ОРГКОМИТЕТА КОНФЕРЕНЦИИ**

Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» прошла 22-23 октября 2015 года. Конференция была организована ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). Работа конференции проходила на двух площадках – это основная площадка непосредственно в Южно-Уральском государственном университете, г. Челябинск и дополнительная площадка в ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск, Ростовской области. На протяжении всего времени работы конференции обе площадки были соединены телемостом. Кроме того, на протяжении обоих дней была организована в on-line режиме web-трансляция заседания секций.

Это новшество дало участникам конференции возможность общения друг с другом без длительных переездов. В процессе работы совместно организуемых секций докладчики поочередно выступали с одной и с другой площадки. Присутствующие при этом коллеги имели возможность задавать вопросы друг другу, где бы они ни находились.

Конференция была поистине масштабной и международной. Из более чем 260 поступивших заявок программным комитетом было отобрано 210 докладов. Участники конференции представляли такие страны, как Великобритания, Германия, Индия, Казахстан, Кыргызстан, Украина и такие города России, как Барнаул, Волгоград, Екатеринбург, Магнитогорск, Москва, Муром, Новосибирск, Новочеркасск, Омск, Пермь, Ростов, Санкт-Петербург, Уфа, Челябинск.

Участники конференции представили свои доклады, отражающие последние достижения в области промышленного инжиниринга, на русском и английском языках. Работа конференции была организована в 11 секциях, включая:

Раздел 1. Машиностроение:

- 1.1. Динамика машин и рабочих процессов;
- 1.2. Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств;
- 1.3. Наземные транспортно-технологические машины.

Раздел 2. Материаловедение и технологии промышленного производства:

- 2.1. Новые функциональные материалы и технологии;
- 2.2. Инновации и ресурсосбережение в металлургии.

Раздел 3. Системы управления и автоматизации технологических процессов и объектов:

- 3.1. Автоматизированные электромеханические системы;
- 3.2. Системы энергообеспечения;
- 3.3. Электротехнологические комплексы и системы;
- 3.4. Промышленные мехатронные системы и робототехника;
- 3.5. Системы и технологии управления;
- 3.6. Моделирование и компьютерные технологии.

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.*

# Стенд для исследовательских испытаний макета двигателя с объемным самовоспламенением гомогенного заряда

Попов А.Е., Бакиев Д.Р.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[popovae84@mail.ru](mailto:popovae84@mail.ru), [bakiev1993@yandex.ru](mailto:bakiev1993@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье приведено описание экспериментального стенда на базе бензинового двигателя ВАЗ-21124 с применением современного оборудования фирмы AVL GMBH (Австрия). Стенд предназначен для проведения исследовательских испытаний макета двигателя с объемным самовоспламенением гомогенного заряда. Для проведения исследований стенд был дополнительно оборудован системами питания природным газом, подогрева впускного воздуха, рециркуляцией отработавших газов и системой принудительного зажигания электроразрядом повышенной мощности. Такой стенд позволяет исследовать влияние различных факторов на особенности протекания перспективного рабочего НСЦИ-процесса смесеобразования и сгорания обедненных топливно-воздушных смесей в двигателе, работающем на природном газе.

**Ключевые слова:** двигатель, природный газ, подогрев воздуха, рециркуляция, система зажигания.

## ВВЕДЕНИЕ

Одними из приоритетных направлений развития современного двигателестроения являются повышение КПД двигателей внутреннего сгорания и улучшение экологических и технико-экономических показателей. Решить эти задачи можно реализацией в двигателе процессов смесеобразования и сгорания по НСЦИ-принципу, иными словами, созданием двигателя с объемным самовоспламенением гомогенного заряда. Это позволяет работать на обедненных топливно-воздушных смесях.

## НАЗВАНИЕ ПАРАГРАФА

Сотрудниками кафедры двигателей внутреннего сгорания Южно-Уральского государственного университета (НИУ) в рамках выполнения работ по гранту Министерства образования и науки Российской Федерации создан макет подобного двигателя на базе бензинового двигателя ВАЗ-21124, в качестве основного вида топлива для которого выбран сжатый природный газ метан.

Вопросами перевода бензиновых двигателей и дизелей на газовое топливо занимаются как отечественные, так и зарубежные фирмы и организации, которые в то же время разрабатывают и экспериментальные стенды для испытаний газовых двигателей и отладки их рабочего процесса.

Например, в работах [1-3] приведено описание экспериментальных стендов для исследовательских испытаний газовых двигателей, конвертированных из дизелей.

Но в данном случае рассматриваются двигатели «большой» размерности, применимость которых в легко-

вой автомобильной промышленности невозможна ввиду избыточных массогабаритных показателей.

Целью данной работы является создание экспериментального стенда для испытаний макета малолитражного двигателя с объемным самовоспламенением гомогенного заряда, работающего на природном газе с дополнительно установленными системами:

- подогрева впускного воздуха;
- рециркуляции отработавших газов (ОГ) с их последующим охлаждением;
- принудительного зажигания электроразрядом повышенной энергии.

Использование перечисленных технических решений требует проведения предварительных исследовательских испытаний для оценки эффективности их применения. Также выбор сжатого природного газа в качестве основного вида топлива потребовал повышения степени сжатия двигателя до 12,0.

Стенд для испытаний макета двигателя с объемным самовоспламенением гомогенного заряда получен путем модернизации существующего стенда двигателя ВАЗ-21124 на базе оборудования фирмы AVL GMBH, рис. 1.

Макет двигателя с объемным самовоспламенением гомогенного заряда создан на базе двигателя ВАЗ-21124, основные характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики двигателя ВАЗ-21124

Тип двигателя	бензиновый, 4-тактный, 4-цилиндровый, рядный с искровым зажиганием
Диаметр цилиндра / ход поршня, мм	82 / 75,6
Максимальная мощность, кВт/мин <sup>-1</sup>	65,5 / 5000
Максимальный крутящий момент, Н*м/мин <sup>-1</sup>	131 / 3700
Степень сжатия	12,0

В качестве нагрузочного устройства выбран асинхронный электрический тормоз DYNOROAD 102/12 со следующими характеристиками:

- номинальный крутящий момент, Н\*м: 255;
- номинальная мощность, кВт: 120;
- максимальная частота вращения, мин<sup>-1</sup>: 12000.

Двигатель, закрепленный на стационарных опорах, соединен с нагрузочным устройством посредством вала с гибкой муфтой, предназначенной для снижения уровня вибраций, возникающих при работе двигателя.



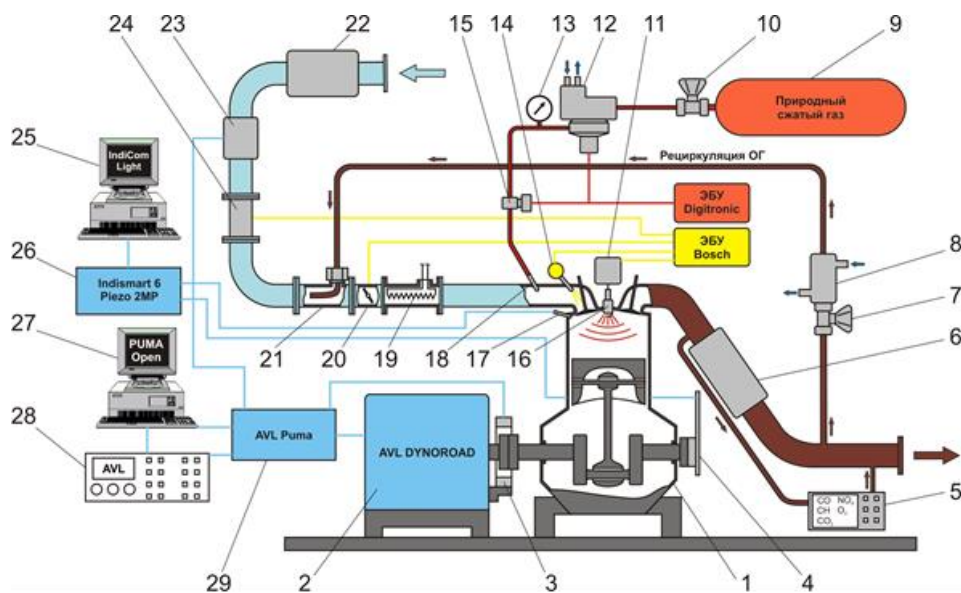


Рис. 1. Испытательный стенд двигателя VA3-21124:

1 – бензиновый двигатель VA3-21124; 2 – асинхронный электрический тормоз; 3 – измеритель крутящего момента; 4 – датчик углового положения ко-ленчатого вала; 5 – газоанализатор; 6 – каталитический нейтрализатор ОГ; 7, 10 – краны; 8 – охладитель рециркулирующих ОГ; 9 – газовый баллон; 11 – модуль (катушка) зажигания; 12 – газовый смеситель; 13 – манометр; 14 – бензиновый инжектор; 15 – газовый инжектор; 16 – свеча зажигания; 17 – датчик давления газов в цилиндре двигателя; 18 – газовое сопло; 19 – подогреватель впускного воздуха; 20 – дроссельная заслонка; 21 – смеситель рециркулирующих ОГ с впускным воздухом; 22 – воздушный фильтр; 23 – расходомер воздуха AVL; 24 – датчик массового расхода воздуха Bosch; 25 – монитор (компьютер) системы индицирования IndiCom Light; 26 – блок системы индицирования; 27 – монитор (компьютер) системы управления PUMA; 28 – блок (панель) управления испытательным стендом; 29 – внешний модуль FEMS системы управления PUMA

На стенде также установлены системы управления и контроля PUMA Open и индицирования INDISMART. Система PUMA Open позволяет с высокой точностью контролировать в режиме реального времени следующие текущие параметры двигателя:

- частота вращения коленчатого вала двигателя,  $\text{мин}^{-1}$ ;
- крутящий момент двигателя (нагрузка на двигатель), Н·м;
- эффективная мощность двигателя, кВт;
- массовые часовые расходы топлива и воздуха, кг/ч;
- степень открытия дроссельной заслонки, %;
- давления окружающей среды, воздуха во впускном коллекторе, топлива в топливной рампе, масла в главной масляной системе двигателя, бар;
- температуры воздуха во впускном коллекторе, охлаждающей жидкости, топлива, масла, выпускных газов,  $^{\circ}\text{C}$ .

Система индицирования INDISMART с установленной программой IndiCom Light позволяет фиксировать в зависимости от угла поворота коленчатого вала индикаторные диаграммы давления газов в цилиндре двигателя, воздуха во впускном коллекторе, отработавших газов в выпускном коллекторе, а также дифференциальную и интегральную характеристики выделения теплоты в цилиндре двигателя.

Каждая из систем оборудована своим блоком сбора данных, усилителем-преобразователем сигналов с датчиков и компьютером для вывода информации на экран монитора и сохранения ее в памяти на жестком диске.

Для индицирования двигателя выбран четвертый цилиндр. Измерение давлений производится датчиком CAN-open. Преимуществом такого типа датчика является широкий диапазон измеряемых давлений (от 0 до 15 МПа) с

высокой точностью. При этом разработан оригинальный способ установки датчика в специально изготавливаемый корпус-ввёртыш (вставка в головку) на месте отверстия для шпильки отводящего патрубка системы охлаждения двигателя, расположенного на задней торцевой поверхности головки блока цилиндров, рис. 2.



Рис. 2. Установка датчика давления

Двигатель оснащен современным газобаллонным оборудованием фирмы DIGITRONIC, принципиальная схема которого представлена на рис. 3. Это оборудование относится к системам питания распределительного типа и позволяет достаточно точно дозировать подачу сжатого природного газа, отслеживая при этом влияние величины цикловой подачи газа на показатели двигателя.

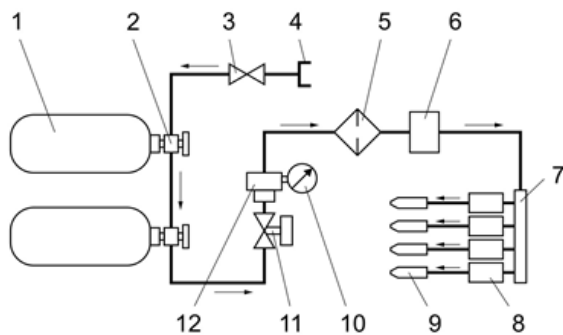


Рис. 3. Принципиальная схема системы подачи природного газа:

1 – баллон сжатого природного газа; 2 – вентиль; 3 – кран; 4 – выносное заправочное устройство; 5 – фильтр; 6 – датчик давления; 7 – газовая рампа; 8 – газовые форсунки; 9 – сопла подачи газа; 10 – манометр; 11 – электромагнитный газовый клапан; 12 – двухступенчатый редуктор-испаритель

Достоинством такой системы является возможность впрыскивания природного газа во впускной коллектор в область впускных клапанов, что позволяет снизить потери рабочего тела и улучшить экономичность двигателя.

Система подогрева впускного воздуха, рис. 4, установлена с целью решения проблемы охлаждения метана при расширении от 220 бар до уровня давления, близкого к вакууму. Сильное снижение температуры приводит к возникновению в камере сгорания условий, неоптимальных для возгорания метана. Воздушный заряд во впускном коллекторе, проходя через электроподогреватель, установленный за дроссельной заслонкой, нагревается и впоследствии в процессе смесеобразования отдает свою температуру метану.

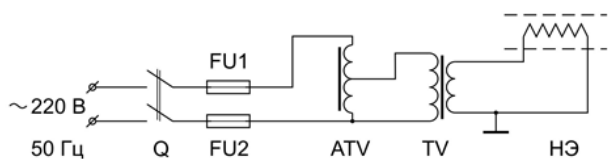


Рис. 4. Принципиальная схема системы подогрева впускного воздуха: Q – выключатель; FU1, FU2 – предохранители; ATV – автотрансформатор; TV – трансформатор; НЭ – нагревательный элемент

Улучшению экологических показателей двигателя, в частности, снижению концентрации окислов азота в ОГ, способствует использование системы рециркуляции ОГ во впускной коллектор, рис. 5. При этом рециркулирующие ОГ подвергаются предварительному охлаждению.

Образование окислов азота в цилиндре двигателя связано с возникновением очагов с очень высокими локальными температурами сгорания. Рециркулирующие ОГ, в свою очередь, «засоряя» свежий заряд делают характер протекания рабочего процесса плавным, что способствует снижению уровня локальных температур и, как следствие, количеству образующихся окислов азота.

В систему рециркуляции ОГ встроен кран для регулировки количества рециркулирующих газов, так как их избыточное количество во впускном заряде может привести

к резкому ухудшению условий смесеобразования и сгорания топливно-воздушной смеси в цилиндре и, соответственно, экологических и технико-экономических показателей двигателя.

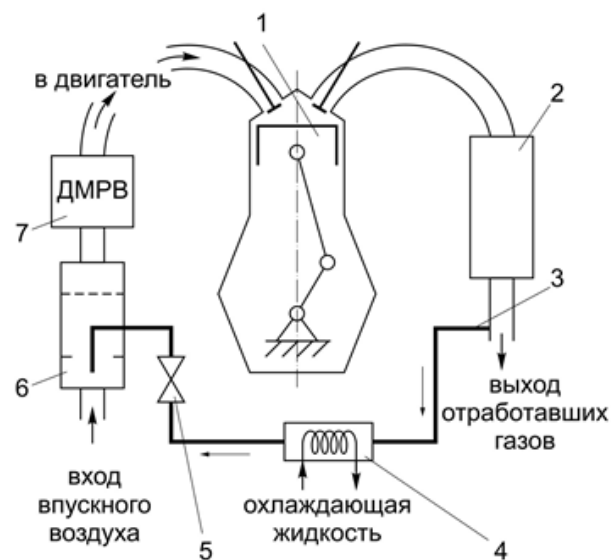


Рис. 5. Принципиальная схема системы рециркуляции ОГ: 1 – макет НСЦИ двигателя; 2 – нейтрализатор ОГ; 3 – отбор рециркулирующих газов; 4 – охладитель рециркулирующих газов; 5 – кран; 6 – смеситель; 7 – датчик массового расхода воздуха.

Для определения концентрации токсичных компонентов на стенде предусмотрен канал для отбора ОГ в газоанализатор с последующим их отведением в вытяжную вентиляцию. Пятикомпонентный газоанализатор фирмы «Автотест» позволяет определять содержание таких составляющих ОГ, как CO, CH, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>.

Двигатель с объемным самовоспламенением гомогенного заряда не может работать в режиме самовоспламенения до тех пор, пока не выйдет на оптимальный температурный режим, поэтому на стадии прогрева он работает с системой принудительного зажигания. Чтобы обеспечить устойчивое искрообразование при работе на обедненных топливно-воздушных смесях, серийная система зажигания заменена на экспериментальную с электроразрядом повышенной энергии. Экспериментальный модуль зажигания устанавливается вместо штатной системы зажигания двигателя ВАЗ-21124. Регулирование энергии зажигания осуществляется включением/отключением дополнительных модулей (катушек) зажигания. Так, возможны варианты работы системы зажигания с одним, двумя и четырьмя модулями зажигания одновременно. В то же время, сохраняется возможность с помощью штатного диагностического оборудования регулировать угол опережения зажигания для достижения лучших показателей токсичности и экономичности двигателя.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

В итоге можно отметить, что результатом проведенной модернизации стало создание экспериментального стенда, позволяющего исследовать влияние различных факторов на особенности протекания перспективного рабочего

НССИ-процесса смесеобразования и сгорания обедненных топливно-воздушных смесей в двигателе, работающем на природном газе, для достижения экологических и технико-экономических параметров, соответствующих современным мировым требованиям к двигателям внутреннего сгорания.

Представленная схема экспериментальной установки может быть дополнительно модернизирована в соответствии с требованиями программы испытаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамчук Ф.И. Экспериментальная установка для исследования газового двигателя БГЧН 13/14 с наддувом

и принудительным воспламенением / Ф.И. Абрамчук, В.М. Манойло, А.А. Дзюбенко, М.С. Липинский, Д.В. Швыдкий // Автомобильный транспорт. – 2011. – Вып. 29. – С. 139-143.

2. Захарчук В.И. Переоборудование дизелей в газовые двигатели с искровым зажиганием / В.И. Захарчук, И.С. Козачук, О.В. Захарчук // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 4(4). – С. 50-53.

3. Гайворонский А.И. Перевод дизеля КамАЗ 740.13-260 на газовое топливо / А.И. Гайворонский, Г.С. Савельев // Грузовик &. – 2006. – С. 16-20.

## Test Stand for Research Engine Layout with Volume Autoignition Homogeneity Charge

Popov A.E., Bakiev D.R.

South Ural State University (national research university)  
[popovae84@mail.ru](mailto:popovae84@mail.ru), [bakiev1993@yandex.ru](mailto:bakiev1993@yandex.ru)

*Abstract.* The article describes the experimental stand on the basis of the gasoline engine VAZ-21124 with the use of modern equipment of the company AVL GMBH (Austria). The stand is intended for carrying out research testing the layout engine with a volumetric ignition of homogeneous charge. For research, the stand was additionally equipped with systems of supply of natural gas, preheating of the intake air, exhaust gas recirculation and a system of forced ignition by electric shock of

higher power. This stand allows to investigate the influence of various factors on the percolation characteristics of the promising HCCI working process of mixture formation and combustion of lean fuel-air mixture in the engine running on natural gas.

*Keywords:* engine, natural gas, heated air, recirculation, ignition system.



# Экспериментальные исследования автомобильного двигателя 4Ч 8,2/7,56 с искровым зажиганием при работе на обедненных смесях

Попов А.Е., Дайбов В.И.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

г. Челябинск, Российская Федерация

[popovae84@mail.ru](mailto:popovae84@mail.ru), [daibovvladimir@mail.ru](mailto:daibovvladimir@mail.ru)

**Аннотация.** В статье приведены результаты экспериментального исследования рабочего процесса двигателя, работающего на обедненных смесях при двукратном повышении энергии зажигания, с определением его технико-экономических показателей. Для проведения такого исследования был создан макет двигателя на базе бензинового двигателя ВАЗ-21124. Стенд для испытаний макета двигателя получен путем модернизации существующего стенда двигателя ВАЗ-21124 с применением оборудования фирмы AVL GMBH. Для проведения испытаний был разработан модуль зажигания, который устанавливается вместо штатной системы двигателя ВАЗ-21124.

**Ключевые слова:** рабочий цикл, бензиновый двигатель, увеличенная энергия зажигания, бедная см.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные технические усовершенствования двигателей внутреннего сгорания направлены на соответствие жестким нормам экологической безопасности транспортных средств. Другими словами, на снижение уровня вредных выбросов с отработавшими газами. Особенно остро эта проблема стоит в крупных городах, перегруженных автомобильным транспортом.

Одним из направлений решения названной проблемы является организация работы двигателя внутреннего сгорания (в частности, бензинового двигателя) на обедненных топливно-воздушных смесях. Но такой способ таит в себе и ряд недостатков. Таких, как ухудшение мощностных показателей двигателя. Этого, в свою очередь, можно избежать установкой на двигатель системы зажигания с увеличенной энергией электроразряда.

Интенсификация электрического зажигания заключается в повышении энергии электрической искры. Это достигается применением полупроводниковых систем зажигания. При этом расширяются пределы возможного обеднения смеси, повышается надежность работы системы зажигания. Для повышения энергии искры применяются также многоэлектродные свечи, в которых осуществляется ступенчатый разряд. Это позволяет исключить перебой с воспламенением при малых нагрузках и на холостом ходу, а также улучшить экономичность двигателя. Применяются и плазменные воспламенители, в которых при разряде конденсатора, заряженного до 900...1200 В, обра-

зуется сверхзвуковой поток плазмы в виде турбулентной струи, способной сжигать бедные смеси [1].

## РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Сотрудниками кафедры двигателей внутреннего сгорания Южно-Уральского государственного университета (НИУ) в рамках выполнения работ по гранту Министерства образования и науки Российской Федерации создан макет подобного двигателя на базе бензинового двигателя ВАЗ-21124.

Стенд для испытаний макета двигателя получен путем модернизации существующего стенда двигателя ВАЗ-21124 на базе оборудования фирмы AVL GMBH, рис. 1.

Макет двигателя создан на базе двигателя ВАЗ-21124, основные характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики двигателя ВАЗ – 21124

Тип двигателя	бензиновый, 4-тактный, 4-цилиндровый, рядный с искровым зажиганием
Диаметр цилиндра / ход поршня, мм	82 / 75,6
Максимальная мощность, кВт/мин <sup>-1</sup>	65,5 / 5000
Максимальный крутящий момент, Н*м/мин <sup>-1</sup>	131 / 3700
Степень сжатия	12,0

В качестве нагрузочного устройства выбран асинхронный электрический тормоз DYNOROAD 102/12 со следующими характеристиками:

- номинальный крутящий момент: 255 Н\*м;
- номинальная мощность: 120 кВт;
- максимальная частота вращения: 12000 мин<sup>-1</sup>.

Двигатель, закрепленный на стационарных опорах, соединен с нагрузочным устройством посредством вала с гибкой муфтой, предназначенной для снижения уровня вибраций, возникающих при работе двигателя.

На стенде также установлены системы управления и контроля PUMA Open и индицирования INDISMART. Система PUMA Open позволяет с высокой точностью контролировать в режиме реального времени следующие текущие параметры двигателя:

- частота вращения коленчатого вала двигателя, мин<sup>-1</sup>;
- крутящий момент двигателя (нагрузка на двигатель), Н\*м;

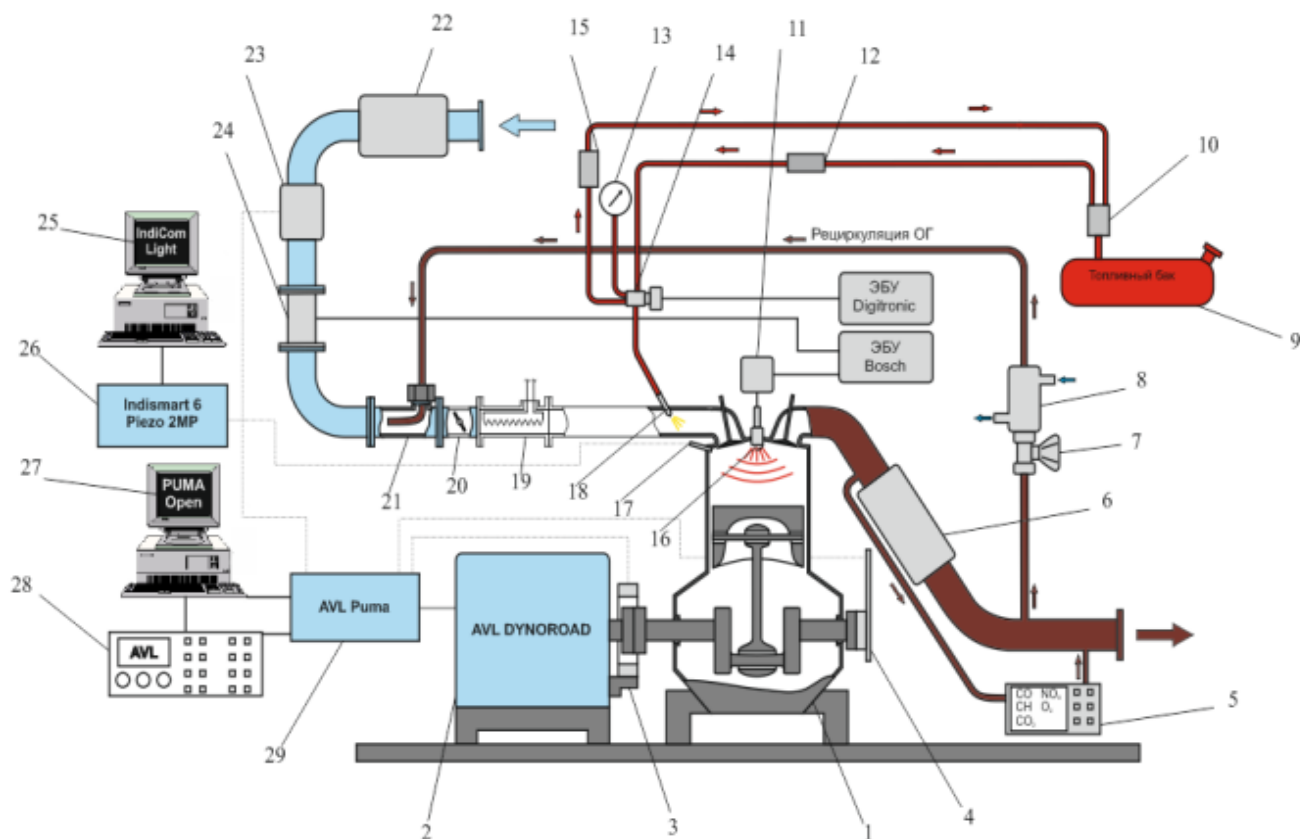


Рис. 1. Испытательный стенд двигателя ВАЗ-21124:

- 1 – бензиновый двигатель ВАЗ – 21124; 2 – асинхронный электрический тормоз; 3 – измеритель крутящего момента; 4 – датчик углового положения коленчатого вала; 5 – газоанализатор; 6 – каталитический нейтрализатор ОГ; 7 – кран; 8 – охладитель рециркулирующих ОГ; 9 – топливный бак; 10 – топливный насос; 11 – модуль (катушка) зажигания; 12 – топливный фильтр; 13 – манометр; 14 – рампа форсунок; 15 – регулятор давления; 16 – свеча зажигания; 17 – датчик давления газов в цилиндре двигателя; 18 – форсунка; 19 – подогреватель впускного воздуха; 20 – дроссельная заслонка; 21 – смеситель рециркулирующих ОГ с впускным воздухом; 22 – воздушный фильтр; 23 – расходомер воздуха AVL; 24 – датчик массового расхода воздуха Bosch; 25 – монитор (компьютер) системы индицирования IndiCom Light; 26 – блок системы индицирования; 27 – монитор (компьютер) системы управления PUMA; 28 – блок (панель) управления испытательным стендом; 29 – внешний модуль FEMs системы управления PUMA

- эффективная мощность двигателя, кВт;
- массовые часовые расходы топлива и воздуха, кг/ч;
- степень открытия дроссельной заслонки, %;
- давления окружающей среды, воздуха во впускном коллекторе, топлива в топливной рампе, масла в главной масляной системе двигателя, бар;
- температуры воздуха во впускном коллекторе, охлаждающей жидкости, топлива, масла, выпускных газов, 0С.

#### СИСТЕМА ЗАЖИГАНИЯ С УВЕЛИЧЕННОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Чтобы обеспечить устойчивое искрообразование серийная система зажигания заменяется на экспериментальную систему зажигания с электроразрядом повышенной энергии. Принципиальная схема такой системы приведена на рис. 2. Для проведения испытаний был разработан модуль зажигания, который устанавливается вместо штатной системы зажигания двигателя ВАЗ-21124. Регулирование энергии зажигания осуществляется включением/отключением дополнительных модулей (катушек) зажигания. Так, возможны варианты работы системы зажигания с одним, двумя и четырьмя модулями зажигания одновременно.

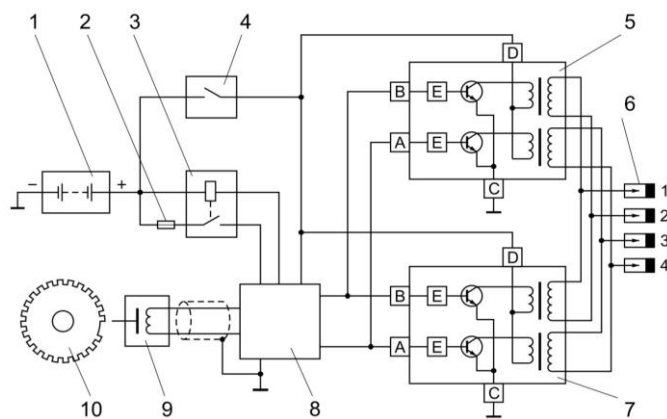


Рис. 2. Схема системы зажигания повышенной энергии для макета двигателя: 1 – аккумуляторная батарея; 2 – предохранитель; 3 – главное реле; 4 – выключатель зажигания; 5, 7 – модули зажигания; 6 – свечи зажигания; 8 – электронный блок управления; 9 – датчик положения коленчатого вала; 10 – задающий диск; Е – устройства согласования

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведены испытания рабочего цикла макета двигателя ВАЗ-21124 на моторном стенде фирмы AVL (описание стенда и его систем выше). Для достижения этой цели решались задачи влияния энергии разряда на индикаторные и эффективные показатели рабочего цикла бензинового ДВС при работе на обедненных топливно-воздушных смесях.

Экспериментальные исследования проводились при следующих условиях:

- геометрическая степень сжатия  $\epsilon = 12$ ;
- топливо-бензин;
- коэффициент избытка воздуха 1,3-1,45;
- система зажигания – штатная и с 2-х кратным увеличением энергии разряда;
- частота вращения коленчатого вала 1500 мин<sup>-1</sup>;
- открытие дроссельной заслонки – на 35,8 %;
- $\tau_{\text{выпуск}} = 9,776$  мс;
- угол опережения зажигания находился в интервале от 15 до 35,5 град ПКВ.

Сравнение параметров работы двигателя при различных системах зажигания приведено на рис. 3-5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При сравнении результатов обработки индикаторных диаграмм видно, что при увеличенной энергии зажигания процесс сгорания начинается раньше и в начальной фазе происходит более интенсивно, чем при штатной системе зажигания. В результате давление рабочего тела в цилиндре возрастает раньше и достигает большей величины. Однако вследствие более бедной смеси максимальная скорость тепловыделения и температура рабочего тела в процессе расширения при этом несколько меньше, чем при штатной системе зажигания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шароглазов Б.А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов / Б.А. Шароглазов, М.Ф. Фарафонов, В.В. Клементьев. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 403 с.
2. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов. – М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 2008. – 720 с.

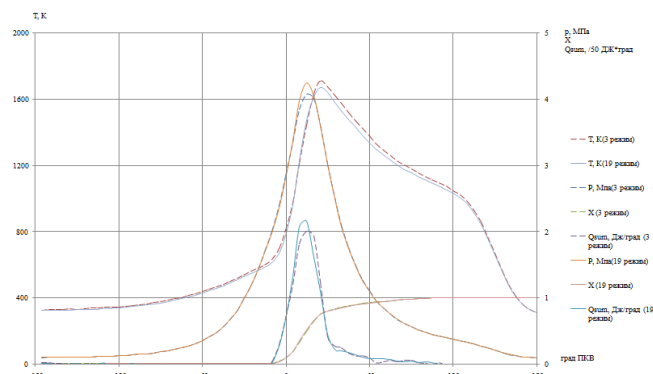


Рис. 3. Параметры двигателя 4Ч 8,2/7,56

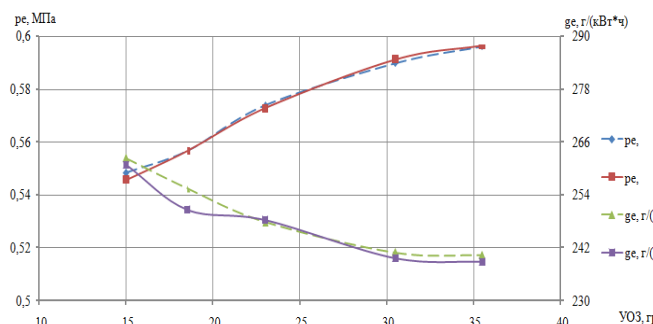


Рис. 4. Зависимость эффективной мощности и крутящего момента от угла опережения зажигания

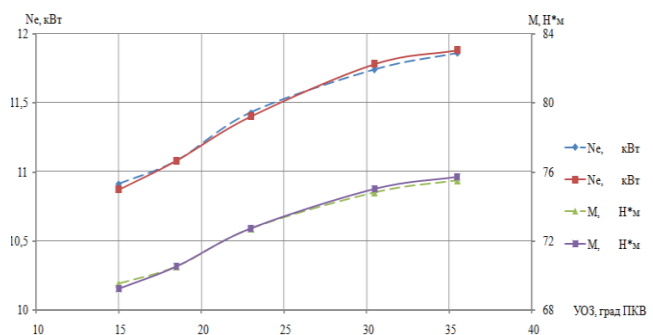


Рис. 5. Зависимость среднего эффективного давления и удельного расхода топлива от угла опережения зажигания

# Experimental Study of Automotive Engine 4H 8,2/7,56 Spark Ignition when Working on Lean-Burn

Popov A.E., Dybov V.I.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian Federation

[popovae84@mail.ru](mailto:popovae84@mail.ru), [daibovvladimir@mail.ru](mailto:daibovvladimir@mail.ru)

**Abstract.** In article results of experimental researches of working process of engine operating on lean mixtures in a double increase the spark energy, and the determination of its technical and economic indicators. For conducting such a study was created by the layout engine based on gasoline engine VAZ-21124. Test stand layout of the engine is obtained by upgrading an existing stand of engine VAZ-21124 with the use of equipment of the

company AVL GMBH. For testing was developed by the ignition module, which is installed instead of the standard engine system VAZ-21124.

**Keywords:** uty cycle, gasoline engine, increased ignition energy, lean.

# Характеристики и расчет кавитационных смесителей

Спиридонов Е.К.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

г. Челябинск, Российская Федерация

[spiridonov@usu.ac.ru](mailto:spiridonov@usu.ac.ru)

**Аннотация.** Показано, что одним из эффективных способов получения эмульсии является кавитационная обработка потока смеси в струйном пограничном слое. На основе уравнений гидродинамики и данных экспериментальных исследований струйных насосов предложена расчетная модель рабочего процесса в гидродинамическом смесителе с побудителем кавитации в виде многоструйного сопла. Рассмотрена и проанализирована характеристика кавитационного смесителя, выражающая зависимость относительной потери напора потока от относительно площади сопла, коэффициентов гидравлического сопротивления элементов проточной части. Показано, что последовательное снижение коэффициентов гидравлического сопротивления позволяет заметно уменьшить потери напора, причем для каждого набора коэффициентов сопротивления существует диапазон оптимальных значений относительной площади, в котором потери напора минимальны. При гидравлически совершенном исполнении элементов проточной части смесителя оптимальные значения относительной площади сопла 0,66...0,76, при этом минимальные потери относительного напора не превышают 0,22.

**Ключевые слова:** эмульсия, кавитация, смеситель, многоструйное сопло, расчетная модель, характеристика, потери напора.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей машиностроения и энергетики, химической, нефтяной и пищевой отраслей промышленности является разработка эффективных и экономичных смесителей для приготовления эмульсий [1]. Например, в теплоэнергетике сжигание водомазутных эмульсий в топках паровых котлов позволяет снизить токсичность дымовых газов, что при оптимальном выборе параметров процесса сжигания топлива и подготовки водомазутной эмульсии повышает экологические и технико-экономические показатели котлов [2-5]. Вместе с тем, применение смесителей большой производительности позволяет предотвратить сброс в природную среду загрязненных нефтепродуктами вод [2, 5].

Качество эмульсии характеризуется однородностью структуры и степенью дисперсности компонентов [6]. Поэтому эффективность работы смесителей, то есть устройство для приготовления эмульсии, существенным образом зависит от способа ее подготовки. Создание высокодисперсных эмульсий при помощи традиционного механического воздействия на поток компонентов затруднительно. Кавитационная обработка компонентов смеси, при которой происходит локальная концентрация энергии (пульсации и схлопывание кавитационных пузырьков) достаточной для взаимопроникновения компонентов среды на микроуровне, позволяет получить высокодисперсный,

устойчивый к расслоению продукт [7-10]. Обзор литературы, посвященной кавитации в струйных насосах, показал, что одним из эффективных способов создания эмульсии может быть кавитация в струйном пограничном слое [11-15]. При этом для повышения дисперсности эмульсии необходимо очаги кавитации равномерно распределять по нормальному сечению потока, а их число, по возможности, увеличивать. Одним из таких устройств – побудителей кавитации является многоструйное сопло с равномерно распределенными отверстиями, формирующее несколько высокоскоростных струй в проточной части смесителя [16].

Целью работы является расчет и анализ характеристик струйного кавитационного смесителя.

## ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА И РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ

Принципиальная схема струйного смесителя представлена на рис. 1. Смеситель состоит из сопла 1, смесительной камеры 2, диффузора 3. В многоструйном сопловом устройстве происходит разгон потока смеси и его дробление на несколько высокоскоростных струй, в пограничных слоях которых инициируется кавитация. Кавитационная обработка потока приводит к распаду струй и созданию мелкодисперсной среды. Благодаря равномерному распределению очагов кавитации по нормальному сечению потока смеси на некотором удалении от сопла 1 в рабочей камере 2 образуется бурный парожидкостный поток, который затем переходит в спокойный в скачке конденсации [17, 18]. В результате к выходному сечению смесительной камеры формируется эмульсия. В диффузоре часть кинетической энергии потока эмульсии переходит в потенциальную. Давление при этом повышается до значения, меньшего, чем перед смесителем.

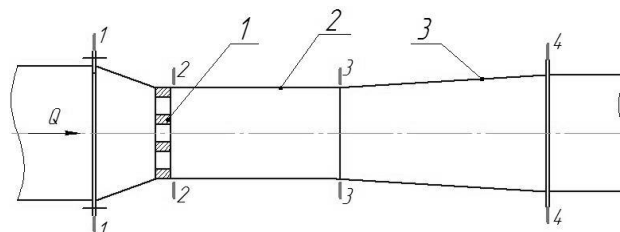


Рис. 1. Принципиальная схема гидродинамического эжектора

Исходными уравнениями, описывающие рабочий процесс в смесителе, являются уравнения баланса расхода

$$Q = v_i A_i = const; \quad (1)$$



и удельной энергии потока на участке между сечениями 1-1 и 4-4

$$\bar{p}_1 = \bar{p}_4 + \zeta_c \frac{\rho v_2^2}{2} + \frac{\rho v_3^2}{2} (\zeta_K + \zeta_D) + \Delta \bar{p}_P, \quad (2)$$

уравнение Д. Бернулли для потока смеси на участке между сечениями 1-1 и 2-2

$$\bar{p}_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} (\alpha_c + \zeta_c), \quad (3)$$

выражение числа Эйлера  $Eu$ , характеризующего кавитационные явления в струйном пограничном слое

$$Eu = \frac{\bar{p}_2 - p_{II}}{\frac{\rho v_2^2}{2}}. \quad (4)$$

Здесь  $\rho$  – плотность смеси;  $p_{II}$  – давление насыщенных паров компонента смеси с минимальной температурой кипения;  $Q$  – объемный расход смеси;  $i$  – номер сечения на принципиальной схеме;  $A_i$ ,  $v_i$ ,  $p_i$  – площадь нормально сечения, средняя скорость и статическое давление в  $i$ -м сечении,  $\bar{p}_1, \bar{p}_4$  – полные (статическое плюс динамическое) давления во входном ( $i = 1$ ) и выходном ( $i = 4$ ) сечении смесителя;  $\zeta_c, \zeta_K, \zeta_D$  – коэффициенты гидравлического сопротивления сопла, смесительной камеры и диффузора;  $\alpha_c$  – коэффициент кинетической энергии потока смеси на

срезе сопла ( $i = 2$ );  $\Delta \bar{p}_P$  – потери удельной энергии при внезапном торможении потока от скорости  $v_2$  скорости истечения смеси жидкости из сопловых отверстий до скорости  $v_3$  течения эмульсии в смесительной камере при полном ее заполнении. Согласно теории Борда-Карно [19, 20]:

$$\Delta \bar{p}_P = \rho \frac{(v_2 - v_3)^2}{2}. \quad (5)$$

Совместное решение уравнений (1)-(5) приводит к формуле

$$\Delta h = \frac{\bar{p}_1 - \bar{p}_4}{\bar{p}_1 - p_{II}} = \frac{\zeta_c + (\zeta_K + \zeta_D) \cdot \Omega^2 + (1 - \Omega)^2}{\alpha_c + \zeta_c + Eu}, \quad (6)$$

которая является выражением основной характеристики гидродинамического смесителя, устанавливающим взаимосвязь относительной потери напора  $\Delta h$  от относительной площади сопла  $\Omega = A_2/A_3$ , кавитационного числа Эйлера  $Eu$ , коэффициентов гидравлического сопротивления элементов проточной части.

В работах [14, 15] предложена эмпирическая формула взаимосвязи кавитационного числа Эйлера  $Eu$  и относительной площади сопла

$$Eu = 0.07 + 1.36(1 - \Omega). \quad (7)$$

С учетом последнего на рисунке 2 построено семейство характеристик кавитационного смесителя при коэффициенте кинетической энергии  $\alpha_c = 1$  и нескольких значениях коэффициентов гидравлического сопротивления [15, 21, 22].

Сопоставляя линии, видим, что последовательное снижение коэффициентов гидравлического сопротивления элементов проточной части позволяет заметно снизить потери напора на смесителе, причем для каждого набора

коэффициентов сопротивления существует диапазон оптимальных значений относительной площади сопла, в котором потери напора минимальны. Например, при коэффициенте сопротивления сопла  $\zeta_c = 0,14$ , смесительной камеры и диффузора  $\zeta_K + \zeta_D = 0,4$  минимальные относительные потери напора  $\Delta h_{\min} = 0,255$  при относительной площади сопла  $\Omega_{\text{опт}} = 0,6$ ; а при  $\zeta_c = 0,06$ ,  $\zeta_K + \zeta_D = 0,2$   $\Delta h_{\min} = 0,185$  при относительной площади сопла  $\Omega_{\text{опт}} = 0,76$ .

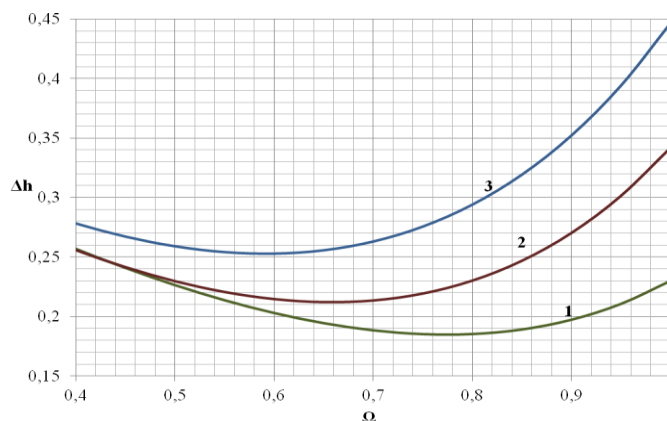


Рис. 2. Семейство характеристик кавитационного смесителя при  $\alpha_c=1$ : 1 –  $\zeta_c=0,06$ ;  $\zeta_K+\zeta_D=0,2$ ; 2 –  $\zeta_c=0,1$ ;  $\zeta_K+\zeta_D=0,3$ ; 3 –  $\zeta_c=0,14$ ;  $\zeta_K+\zeta_D=0,4$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Гидравлически совершенное исполнение элементов проточной части кавитационного смесителя и выбор оптимального соотношения площадей сопла и смесительной камеры являются основными требованиями при его разработке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Таушер В. Технология статического смешения // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1996. – №3. – С. 26-32.
2. Кормилицын В.И. Комплексная экосовместимая технология сжатия водомазутной эмульсии и природного газа с добавками сбросных вод / В.И. Кормилицын, М.Г. Лысков, А.А. Румынский // Теплоэнергетика. – 1996. – №9. – С.13-17.
3. Голубь Н.В. Эффективность сжигания водомазутной эмульсии на промышленных ТЭЦ. – М.: ВТИ, 1985. – 178 с.
4. Акчурин Р.Ю. Подготовка мазута к сжиганию в кавитационном реакторе // Энергетик. – 1986. – №9. – С.8-9.
5. Попов А.И. Уменьшение вредных выбросов при сжигании водомазутной эмульсии / А.И. Попов, Н.В. Голубь, В.И. Ерофеев // Энергетик. – 1983. – №2. – С.11-14.
6. Иванов В.М. Топливные эмульсии. / В.М. Иванов. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 246 с.
7. Яхно О.М. Особенности кавитационной технологии перемешивания высоковязких жидкостей / О.М. Яхно, Н.Н. Яске, А.Д. Коваль // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1996. – №3. – С. 23-25.
8. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // Вестник ТГТУ. – 2008. – Т. 14, №4. – С. 861-869.

9. Кнеп Р. Кавитация. / Р. Кнеп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М.: Мир, 1974. – 687 с.
10. Присол И. Кавитация. – М.: Мир, 1975. – 95 с.
11. Подвидз Л.Г. кавитационные свойства струйных насосов // Вестник машиностроения. – 1978. – №3. – С. 17-20.
12. Sander N. A Jet Pump Cavitation Prediction Parameter // ASME Fluids Engineering Meeting, 1908 Cavitation Forum, pamphlet publication. – 1968. – P. 10-18.
13. Темнов В.К. Основы теории жидкостных эжекторов. – Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1971. – 88 с.
14. Темнов В.К. О критических коэффициентах кавитации у жидкостных эжекторов / В.К. Темнов, О.А. Переплетчик // Динамика гидродневматических систем. – 1978. – №197. – С. 82-87.
15. Темнов В.К. Расчет и проектирование жидкостных эжекторов: учебное пособие / В.К. Темнов, Е.К. Спиридонов. – Челябинск: ЧПИ, 1984. – 44 с.
16. Spiridonov E.K. Characteristics and Analysis of a Cavitation Jet Mixer / E.K. Spiridonov, S.Yu. Bityutskikh // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – Vol. 51, is. 3. – P. 226-232.
17. Спиридонов Е.К. Энергетический анализ газожидкостных течений // Зимняя школа по механике сплошных сред (двенадцатая): тезисы докл. Всероссийской конф. (Екатеринбург, 25-31 января 1999 г.). – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – С. 291.
18. Спиридонов Е.К. Энергетический анализ жидкостногазовых течений // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2003. – Т. 3, №1(17). – С. 151-155.
19. Гиргизов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): учеб. для вузов. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007. – 545 с.
20. Попов Д.Н. Гидромеханика: учеб. для вузов / Д.Н. Попов, С.С. Панаиотти, М.В. Рябинин. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 382 с.
21. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
22. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

## Characteristics and Calculation of Cavity Mixers

Spiridonov E.K.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian Federation

[spiridonovek@susu.ac.ru](mailto:spiridonovek@susu.ac.ru)

**Abstract.** It is shown that one of the most efficient ways to obtain emulsion is cavitation treatment of the mixed stream in the jet boundary layer. The calculation model of the operational process in the hydrodynamic mixer with multiple-jet nozzle as agitator of cavitation is offered based on hydrodynamic equations and data of experimental research of jet pumps. There has been considered and analyzed the characteristic of the cavitation mixer which shows dependence of relative loss of total stream pressure from relative nozzle square, hydraulic resistance coefficient of flow-part elements. It is shown that gradual reduction of hydrau-

lic resistance coefficient allows to considerably decrease the losses of total stream pressure, besides there exists the range of optimum values of relative square where losses of total pressure are minimum. If the elements of the mixer flow-part are made hydraulically proper then the optimal values of the nozzle relative square are 0,66...0,76, whereas minimum losses of relative pressure don't exceed 0,22.

**Key words:** mixed stream, emulsion, cavitation, mixer, multiple-jet nozzle, calculation model, characteristic, pressure losses.

# Исследование динамических характеристик гидропривода с пропорциональным управлением

Назаров Ф.М., Форенталь В.И., Форенталь М.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[forental@mail.ru](mailto:forental@mail.ru).

**Аннотация.** В работе были исследованы динамические характеристики гидропривода поступательного действия с пропорциональным управлением расчетным и экспериментальным путем. Исследован привод поступательного действия на основе гидроцилиндра с электрической обратной связью по положению. Построена математическая модель привода с учетом характеристик насосной станции, гидроцилиндра, инерционной нагрузки, динамической характеристики распределителя и электрической обратной связи по положению. Характеристика управляющего пропорционального распределителя получена на базе статических расходных характеристик, измеренных экспериментально, и передаточной функции перемещения золотника от входного токового сигнала. Расчетным и экспериментальным путем построены амплитудно-частотные характеристики привода по перемещению для диапазона частот от 0,05 Гц до 5 Гц. Показано, что при частотах до 3 Гц предложенная расчетная модель обеспечивает точность до 3 %.

**Ключевые слова:** гидропривод, пропорциональный распределитель, динамическая характеристика, передаточная функция, проводимость.

## ВВЕДЕНИЕ

Следящие гидравлические приводы широко применяются в системах технологического оборудования различных отраслей машиностроения [1-8]. В этих системах в качестве управляющего устройства широкое применение нашли пропорциональные гидравлические распределители, которые по сравнению с сервоклапанами при менее качественных управляющих характеристиках имеют значительно более низкую стоимость, менее критичны по отношению к чистоте рабочей жидкости [8]. Это определяет их широкое применение в следящих управляющих системах.

Большое количество опубликованных работ посвящено исследованию гидроприводов с применением сервоклапанов [1, 3, 4, 6, 7]. Как правило, сервоклапаны обладают лучшими характеристиками с точки зрения обеспечения управления приводами, позволяют получать значительно большие точности в системах слежения или стабилизации по параметрам позиционирования, скорости, усилия. Гидравлические характеристики сервоклапанов в большинстве случаев при исследовании приводов описываются линеаризованными уравнениями. Существенные величины зон нечувствительности пропорциональных гидрораспределителей, которые достигают значений 20...25% от максимального хода регулирующего золотника, не позволяют корректно проводить исследования характеристик привода без их учета. В связи с достаточно большим разбросом техно-

логических параметров в конструкции пропорциональных распределителей аналитическое описание гидравлических характеристик затруднено или невозможно. Тем не менее для сокращения затрат на экспериментальную отработку гидропривода с пропорциональным управлением желательно иметь математическую модель такого привода. В связи с этим в данной работе предложен подход, основанный на частичном использовании экспериментальных характеристик конкретного распределителя. При этом предлагаемый подход позволяет сократить объемы экспериментальных исследований путем использования только статических гидравлических характеристик распределителя, измеряемых экспериментально.

В данной работе предложена модель привода, основанная на статических экспериментальных расходно-перепадных характеристиках распределителя, получение которых не является столь затратным, как испытание привода в комплексе.

Математическая модель разработана для привода, схема которого приведена на рис. 1.

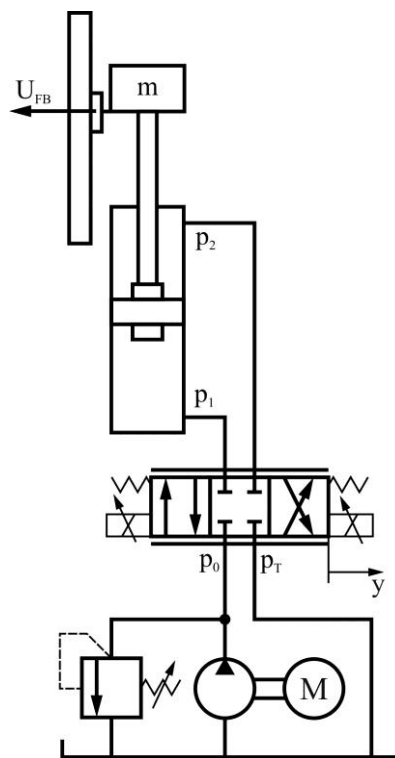


Рис. 1. Гидравлическая схема исследуемого привода



ОПИСАНИЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ

Экспериментальные статические расходные характеристики распределителя с пропорциональным управлением при нескольких фиксированных значениях перепада давления на дросселирующих щелях в зависимости от тока управления приведены на рис. 2.

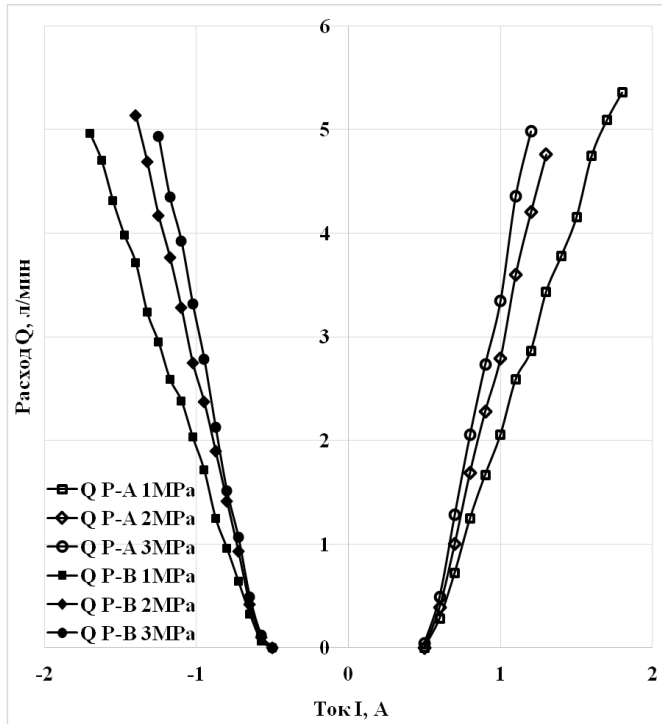


Рис. 2. Зависимость расхода в линиях P-A, P-B четырехлинейного гидравлического пропорционального распределителя в зависимости от тока управления

Расход  $Q$  через дросселирующую щель может быть вычислен следующим образом [1, 3, 4, 6, 7]:

$$Q = G\sqrt{\Delta p}, \tag{1}$$

где  $G = \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho}}$  – проводимость дросселирующих щелей золотника;  $\mu$  – коэффициент расхода, зависящий от числа Рейнольдса, формы кромок и т.п.;  $f$  – площадь дросселирующей щели, зависящая от положения золотника  $y$ ;  $\Delta p$  – перепад давления на дросселирующей щели;  $\rho$  – плотность жидкости. При применении гидроаппаратуры серийного производства потребитель не знает реальных перемещений золотника  $y$ . В связи с этим введем понятия безразмерных параметров проводимости

$$\bar{G} = \frac{G}{G_{MAX}}, \tag{2}$$

тока управления

$$\bar{I} = \frac{I}{I_{MAX}}, \tag{3}$$

перемещения золотника распределителя:

$$\bar{y} = \frac{y}{y_{MAX}} \tag{4}$$

и проводимости, отнесенной к току управления:

$$k_{GI} = \frac{\bar{G}}{\bar{I}}. \tag{5}$$

Максимальные значения проводимости  $G_{MAX}$  и тока управления  $I_{MAX}$  определены экспериментально.

Введем понятия тока зоны нечувствительности и перемещения золотника зоны нечувствительности:

$$\bar{I}_{NS} = \frac{I_{NS}}{I_{MAX}}, \tag{6}$$

$$\bar{y}_{NS} = \frac{y_{NS}}{y_{MAX}}. \tag{7}$$

Тогда зависимость (1) с учетом графиков, рис. 2, может быть представлена в виде:

$$Q_j = \begin{cases} k_{GIj} \times (\bar{I} - \bar{I}_{NS}) \times G_{MAX} \times \sqrt{\Delta p_j}, & \text{при } \bar{I} > \bar{I}_{NS} \\ 0, & \text{при } \bar{I} \leq \bar{I}_{NS} \end{cases} \tag{8}$$

В результате обработки экспериментальных данных получены значения коэффициента  $k_{GIj}$  для каждой  $j$ -ой из четырех комбинаций работающих дросселирующих щелей. Фактически проводимость непосредственно зависит не от тока управления, а от положения золотника  $y$ , которое в каждый момент времени является функцией тока управления. Динамические характеристики перемещения золотника пропорционального распределителя, как правило, приводятся в паспортах на аппаратуру или каталогах. Зависимость перемещения золотника  $y(t)$  от тока управления  $I(t)$  однозначно выражается зависимостью вида:

$$y(t) = W_v \times I(t), \tag{9}$$

где  $W_v$  – передаточная функция пропорционального распределителя, которая чаще всего близка к колебательному звену второго порядка или двум апериодическим звеньям.

Выражение (9) может быть представлено в безразмерном виде:

$$\bar{y}(t) = W_v \times \bar{I}(t). \tag{10}$$

В статическом состоянии перемещение золотника пропорционально току управления:

$$\bar{y} = k_v \times \bar{I}, \tag{11}$$

где коэффициент  $k_v$  – коэффициент усиления перемещения золотника по току управления. Это означает, что выражение (6) может быть представлено в виде:

$$Q_j = \begin{cases} k_{GIj} \times \frac{(\bar{y} - \bar{y}_{NS})}{k_v} \times G_{MAX} \times \sqrt{\Delta p_j}, & \text{при } \bar{y} > \bar{y}_{NS} \\ 0, & \text{при } \bar{y} \leq \bar{y}_{NS} \end{cases} \tag{12}$$

С учетом (10) уравнения расходов через все дросселирующие щели распределителя имеют вид:

$$Q_1 = \begin{cases} k_{GI\_PA} \times \frac{(\bar{y} - \bar{y}_{NS})}{k_v} \times G_{MAX} \times \sqrt{p_0 - p_1}, & \text{при } \bar{y} > \bar{y}_{NS} \\ 0, & \text{при } -\bar{y}_{NS} < \bar{y} \leq \bar{y}_{NS} \\ k_{GI\_AT} \times \frac{(\bar{y} + \bar{y}_{NS})}{k_v} \times G_{MAX} \times \sqrt{p_1 - p_T}, & \text{при } \bar{y} < -\bar{y}_{NS} \end{cases} \tag{13}$$

$$Q_2 = \begin{cases} k_{GI\_BT} \times \frac{(\bar{y} - \bar{y}_{NS})}{k_v} \times G_{MAX} \times \sqrt{p_2 - p_T}, & \text{при } \bar{y} > \bar{y}_{NS} \\ 0, & \text{при } -\bar{y}_{NS} < \bar{y} \leq \bar{y}_{NS} \\ k_{GI\_PB} \times \frac{(\bar{y} + \bar{y}_{NS})}{k_v} \times G_{MAX} \times \sqrt{p_0 - p_2}, & \text{при } \bar{y} < -\bar{y}_{NS} \end{cases}$$

где  $Q_1$  – расход в поршневую полость гидроцилиндра;  $Q_2$  – расход из штоковой полости гидроцилиндра,  $p_1$  и  $p_2$  – давления соответственно в поршневой и штоковой полостях.

Давления в штоковой и поршневой полостях могут быть найдены из выражений:

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{dx}{dt} A_1 + \frac{E_1}{V_1} \frac{dp_1}{dt} \\ Q_2 = \frac{dx}{dt} A_2 - \frac{E_2}{V_2} \frac{dp_2}{dt} \end{cases}, \quad (14)$$

где  $A_1, A_2$  – площади поршневой и штоковой полостей соответственно;  $E_1, E_2$  – эквивалентные модули упругости, рассчитанные для сжимаемой системы жидкость-трубопровод [1-3].

Уравнение движения гидроцилиндра:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{m} \left( p_1 \cdot A_1 - p_2 \cdot A_2 - b \cdot \frac{dx}{dt} - F_{CF} \cdot \text{sign} \left( \frac{dx}{dt} \right) \right), \quad (15)$$

где  $b$  – коэффициент вязкого трения;  $F_{CF}$  – сила сухого трения.

#### ОПИСАНИЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Характеристика насосной станции для условий входа в пропорциональный распределитель была получена экспериментально и представлена на рис. 4.

Математическое представление характеристики насосной станции представлено в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} p_0 = k_{PQ1} \cdot Q + a_{PQ1}, \text{ при } Q \leq Q_{prv} \\ p_0 = k_{PQ2} \cdot Q + a_{PQ2}, \text{ при } Q > Q_{prv} \end{cases}, \quad (16)$$

где  $Q_{prv}$  – расход, соответствующий началу открытия предохранительного клапана;  $k_{PQ1,2}$  и  $a_{PQ1,2}$  – коэффициенты линеаризации.

Давление на сливе распределителя определяется зависимостью  $p_T = Qk_{lam} + k_{turb} Q^2$ , где коэффициенты  $k_{lam}$  и  $k_{turb}$  отражают суммарные потери давления, полученные экспериментально.

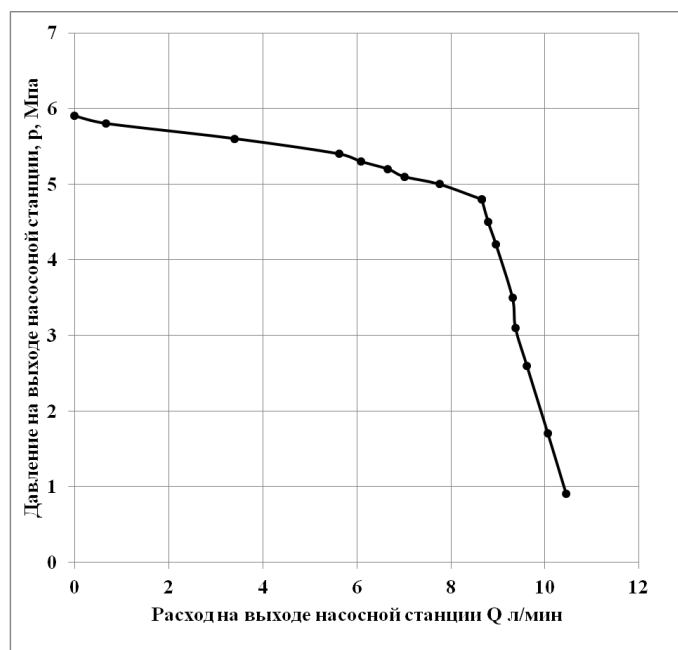


Рис. 4. Характеристика насосной станции

#### ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Электрическая система управления с обратной связью может быть описана уравнением:

$$U_{ER} = U_{REF} - U_{FB}, \quad (17)$$

где  $U_{ER}$  – сигнал рассогласования, поступающий на электронный усилитель распределителя;  $U_{REF}$  – управляющий сигнал;  $U_{FB}$  – сигнал обратной связи по перемещению штока гидроцилиндра.

Пропорциональные гидравлические распределители имеют большие значения перекрытий дросселирующих щелей, достигающих 20 % хода золотника распределителя. Для уменьшения влияния нелинейностей, возникающих в связи с наличием таких значений гидравлических перекрытий, применяют системы электронной коррекции характеристик в области малых сигналов управления.

Сигнал рассогласования поступает на усилитель тока с характеристиками, приведенными на рис. 5.

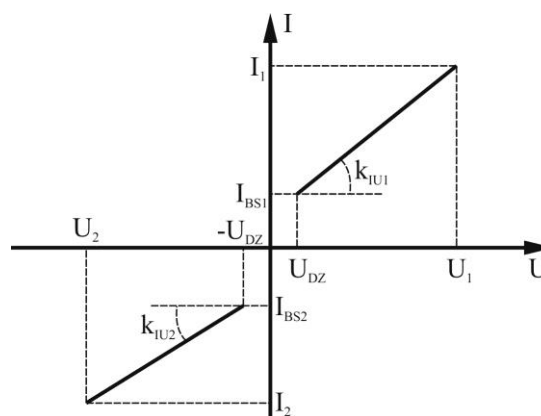


Рис. 5. Нелинейное преобразование сигнала по напряжению в управляющий ток в блоке управления пропорциональной аппаратурой

Выходным сигналом нелинейного усилителя является ток управления, значение которого математически можно описать функцией:

$$I = \begin{cases} k_{IU1} \times U_{ER} + I_{BS1}, & \text{при } U_{ER} > U_{DZ} \\ 0, & \text{при } -U_{DZ} \leq U_{ER} \leq U_{DZ} \\ k_{IU2} \times U_{ER} - I_{BS2}, & \text{при } U_{ER} < -U_{DZ} \end{cases}; \quad (18)$$

где  $k_{IUi} = \frac{\Delta I_i}{\Delta U_i}$  – коэффициент усиления тока нелинейного

усилителя по напряжению, настраивается индивидуально для положительного и отрицательного входного сигнала,  $I_{BS}$  – начальное смещение тока;  $U_{DZ}$  – зона нечувствительности усилителя по входному напряжению.

Приведенные выше уравнения вместе с законом изменения управляющего сигнала во времени образуют замкнутую систему уравнений, описывающих динамическую систему. Решение данной системы проведено численно на ЭВМ.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

В исследованном гидроприводе в качестве исполнительного механизма применен гидроцилиндр с односторонним штоком: диаметр цилиндра 40 мм, штока 20 мм.

Массовая нагрузка составляла 40 кг. Гидроцилиндр управлялся пропорциональным распределителем Atos DHZO-A-071-L1 с усилителем Atos E-BM-AC-05F/RR. Для обеспечения равенства скоростей прямого и обратного хода необходимо иметь различные величины открытия дросселирующих щелей золотника распределителя при равном по модулю положительном и отрицательном сигнале управления. Данное условие корректировалось настройкой коэффициента усиления  $k_{IU1}$ .

Большие значения положительных перекрытий распределителя, рис. 2, компенсируются настройкой величины тока смещения  $I_{BS}$ .

При экспериментальных и численных исследованиях значение амплитуды входного сигнала составляло 2 В, что соответствовало значению перемещения привода с амплитудой 50 мм, значение силы сухого трения было также получено экспериментально и составляло  $F_{CF} \approx 100 \pm 16Н$ , давление настройки предохранительного клапана насосной станции 6 МПа. Ток смещения на усилителе тока блоке управления пропорционального распределителя был настроен на величину  $I_{BS} \approx 0,5А$ , что соответствовало току зоны нечувствительности распределителя  $I_{NS} \approx 0,5А$ , коэффициенты усиления по току  $k_{IU1} = 1,8 А/В$ ,  $k_{IU2} = 1,4 А/В$ .

В исследуемом гидроприводе в качестве исполнительного механизма применен гидроцилиндр с односторонним штоком. Для обеспечения равенства скоростей прямого и обратного хода необходимо иметь различные величины открытия дросселирующих щелей золотника распределителя при условном положительном и отрицательном сигнале управления.

Настройка различных значений усиления по току приводит к тому, что при одинаковых по амплитуде входных сигналах  $U_{ER}$ , но различных по знаку, поступающих на вход усилителя тока получают различные значения тока управления на распределителе, и соответственно различные значения расходов в линиях распределителя, рис. 6. Такая настройка коэффициентов усиления позволила настроить примерно одинаковые значения скоростей движения штока цилиндра при изменении направления движения.

Моделирование работы привода при различных частотах входного сигнала позволило получить теоретические логарифмические амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики привода. Одновременно были проведены экспериментальные исследования для получения аналогичных характеристик привода.

Графики перемещения привода при гармоническом входном сигнале с амплитудой, соответствующей перемещению привода 50 мм и частоте 0,5 Гц приведены на рис. 7.

Вычисленное значение относительной погрешности при различных значениях частоты входного сигнала между расчетной характеристикой привода и экспериментально полученной не превышает 2 %.

Графики логарифмических амплитудно- и фазочастотных характеристик привода приведены на рис. 8. Пунктиром показаны расчетные зависимости, сплошными линиями – экспериментальные.

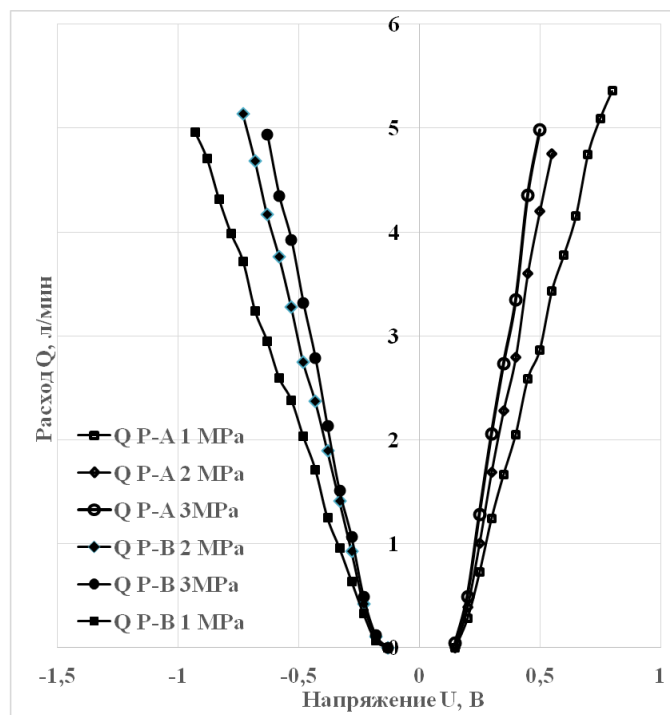


Рис. 6. Зависимость расхода в линиях P-A, P-B четырехлинейного гидравлического пропорционального распределителя в зависимости от входного сигнала  $U_{ER}$

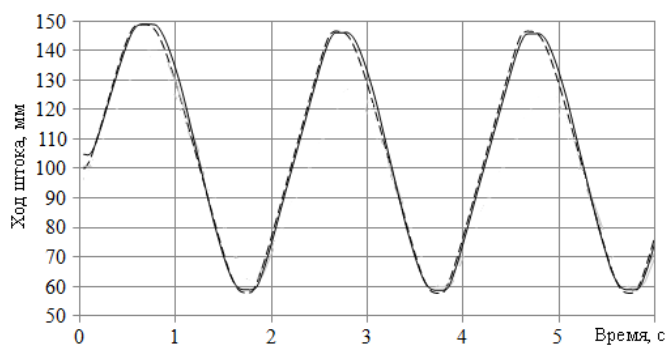


Рис. 7. Перемещение привода во времени при гармоническом входном сигнале (пунктир – расчет, сплошная линия – эксперимент)

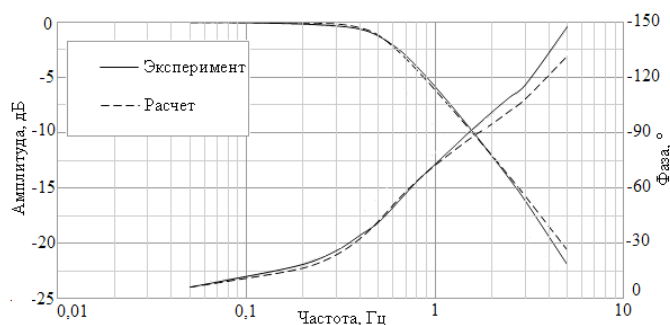


Рис. 8. Логарифмические амплитудно- и фазочастотные характеристики привода

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что в диапазоне частот от 0,05 Гц до 3 Гц примененные аппроксимации экспериментальных гидравлических характеристик пропорционального гидрораспределителя позволило определить амплитуду перемещения с точностью 2-3 %, при гармоническом входном воздействии, при этом ошибка по фазе не превышает 10°. При частотах от 3 до 5 Гц ошибка по амплитуде не превышает 10 %.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные и расчетные исследования динамики гидропривода на базе гидроцилиндра с управляющим пропорциональным распределителем показали, что, несмотря на значительные нелинейности и выбросы характеристик таких распределителей, использование экспериментальных статических расходных характеристик в сочетании с математическим моделированием остальной части привода по известным зависимостям, позволяет с достаточной для проектировочных расчетов точностью получать частотные характеристики привода до частот порядка 5 Гц. Для больших частот необходимо более подробно учитывать характеристики упругости и демпфирования элементов системы, таких как рукава высокого давления, трубопроводы, соединительные муфты и т.д., а так же динамические характеристики источника питания (насосной станции).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бургвиц А.Г. Характеристики золотниковых гидрораспределителей с учетом микрогеометрии дросселирующих щелей / Бургвиц А.Г., Форенталь В.И. // Вестник машиностроения. – 1993. – №3. – С. 25-28.

2. Дубровин В. А. Моделирование системы управления гидропривода циклического перемещения подвижной рамы подблочного блока. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. – Вып. 2. – С. 38-42

3. Randall T. Anderson Mathematical Modeling of a Two Spool Flow Control Servo Valve Using a Pressure Control Pilot / T. Randall, Y.Li. Perry // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 2002. – Vol. 124. – P. 420-427

4. Juma Yousuf Alaydi. Modeling and Simulation of High-Performance Symmetrical Linear Actuator // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2012. – Vol. 3, is. 8. – P. 1.

5. Шмид Д. Управляющие системы и автоматика / Д. Шмид, А. Бауман, Х. Кауфман, Б. Зиппель. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.

6. Казмиренко В.Ф. Электрогидравлические мехатронные модули движения: Основы теории и системное проектирование. Учебное пособие. – М.: Радио и связь, 2001 г. – 432 с.

7. Константинов С.В. Электрогидравлические рулевые приводы систем управления полетом маневренных самолетов / С.В. Константинов, П.Г. Редько, С.А. Ермаков. – М.: Янус-К, 2006. – 316 с.

8. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справочник. – М.: Машиностроение, 2008. – 640 с.

# Investigation of Dynamic Characteristics of the Hydraulic Drive with Proportional Control

Forental V.I., Forental M.V., Nazarov F.M.

South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation

[forental@mail.ru](mailto:forental@mail.ru)

**Abstract.** The dynamic characteristics of hydraulic drive with proportional control are investigated by experimental and modeling approaches. The linear motion drive based on hydraulic cylinder with electrical feedback by position is researched. The mathematical model of drive is developed taking into account the characteristics of pump station, hydraulic cylinder, inertial load, dynamic characteristic of proportional valve, and electrical feedback by position. The proportional valve characteristic is determined based on experimental static flow characteristics and

transfer function of spool displacement on input current. Bode diagram for displacement of cylinder is obtained experimentally and by modeling for frequency 0.05-5 Hz. It is shown, that for frequency up to 3 Hz proposed model provides the accuracy of 3 %.

**Keywords:** hydraulic drive, proportional directional valve, dynamic characteristic, transfer function, conductivity.



# Вязкостные характеристики углеводородов в области высоких давлений

Редников С.Н.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[srednikov@mail.ru](mailto:srednikov@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрены вязкостных характеристик углеводородов в области высоких давлений. Приведены описание наиболее распространенных методов моделирования течения. Подробно рассмотрены вопросы моделирования способности жидких сред сопротивления сдвигу.

**Ключевые слова:** вязкость, температура, вязкость, углеводороды.

## ВВЕДЕНИЕ

Течения углеводородов в области высоких давлений может сопровождаться процессами полимеризации и деполимеризации, в таких условиях вязкость жидкостей уже нельзя описать монотонной зависимостью от температур и давлений [1, 3-5, 7, 8, 11,12]. Вязкость подавляющего большинства жидких сред в широком диапазоне температур изменяется в соответствии с зависимостями Вильямса-Лэнделла-Ферри, Фулчера-Фогеля, Эйринга и им подобными [6, 10, 15, 18, 19, 22]. Эти зависимости представляют собой убывающие функции температуры и давления, удовлетворительно описывающие течение капельных жидкостей: наиболее часто встречающихся в природе и применяемых в технике, в частности, жидких металлов, расплавов природных минералов, полимеров. Характеристики течения таких жидкостей достаточно хорошо изучены и продолжают интенсивно уточняться. Так, вязкостные характеристики углеводородов в диапазоне давлений менее 150 МПа достаточно хорошо изучены [1, 3, 6]. Исследование поведения углеводородов при давлениях более 150 МПа, а также в области фазовых переходов, где могут наблюдаться как процессы стеклования, так и кристаллизации [10,11], затруднено появлением фаз, сильно отличающихся по вязкости. Кроме того, при давлениях выше 198 МПа при проектировании вискозиметров необходимо принимать во внимание изменение с ростом давления свойств конструкционных материалов [12, 12, 14], параметров измерительных устройств [2, 17, 21], химической активности среды [16, 18, 20] и других факторов.

Для проведения исследования вязкостных характеристик жидкостей использовался ротационный вискозиметр с измерительной ячейкой типа коаксиальных цилиндров. Подвижным является внутренний цилиндр, т. е. используется измерительная система Серле. В данном вискозиметре оператором задается частота вращения ротора и, как будет далее показано, линейно связанная с ней скорость сдвига. Другими словами он является СР-реометром. Для привода вискозиметра использован бесколлекторный электродвигатель с питанием от постоянного тока, позволяющий плавно изменять частоту вращения от 0 до 7000 об/мин. Двигатель управляется электронным регулятором

скорости, обеспечивающим изменение частоты вращения посредством широтно-импульсной модуляции фазового напряжения и синхронизацию подаваемого напряжения с вращением двигателя без применения дополнительных датчиков. Вязкость исследуемой жидкости вычисляется исходя из потребляемой приводным двигателем мощности. При проведении измерений блок коаксиальных цилиндров помещается в герметичную емкость с исследуемой жидкостью, в которой с помощью мультипликатора создается избыточное давление до 198 МПа. Конструкция измерительной ячейки представлена на рис. 1.

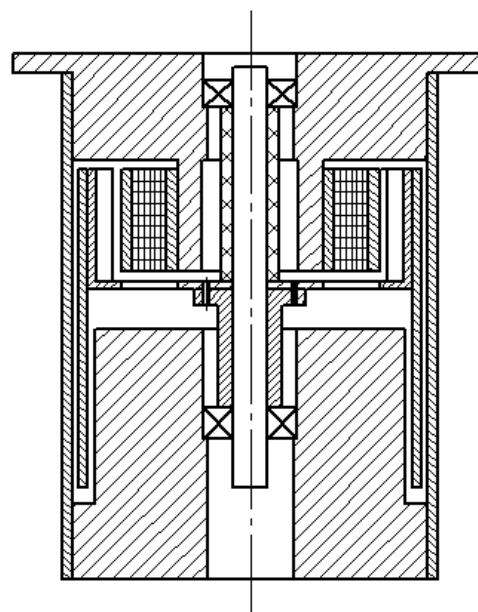


Рис 1. Конструкция измерительной ячейки

Используемый ротационный вискозиметр обладает следующими характеристиками:

- вязкость исследуемых жидкостей 0,005...0,1 ПаС;
- скорость сдвига 5000... 30000 с<sup>-1</sup>;
- давление исследуемой жидкости 0,1...198 МПа;
- температура исследуемых жидкостей 15...25 °С;

Исследуемые жидкости: нетокпроводящие углеводороды. Напряжение источника питания замеряется с точностью  $\pm 0,1\%$ ; потребляемый ток –  $\pm 0,8\%$ , обороты ротора –  $\pm 0,1\%$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Были проведены измерения вязкости некоторых гидравлических жидкостей в доступном рассматриваемой установке диапазоне скоростей сдвига и при различных давлениях. Результаты представлены на рис. 2-7.

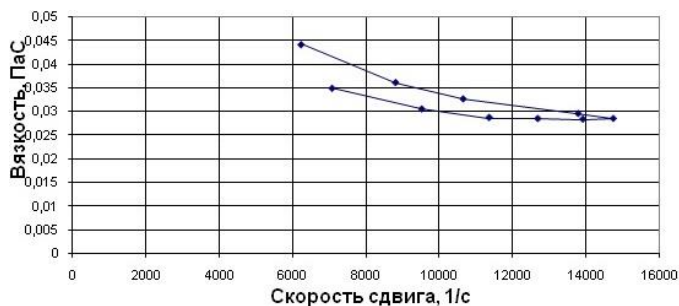


Рис. 2. Кривая вязкости масла VG-46 при начальной температуре 23,4 °С и атмосферном давлении

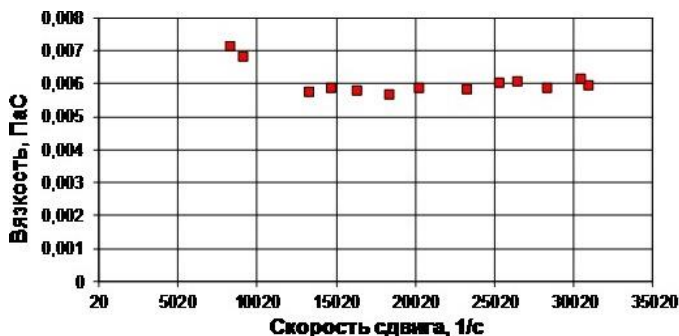


Рис. 3. Кривая вязкости керосина при постоянной температуре 23,4 °С и атмосферном давлении (для поддержания постоянной температуры ротор вискозиметра останавливался после замера каждой точки; характеристика использовалась для тарировки)

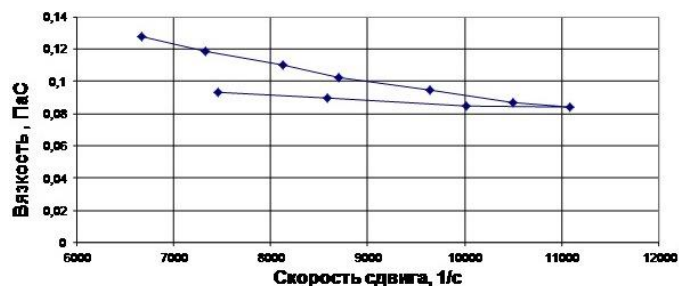


Рис. 4. Кривая вязкости полусинтетического масла Agip syntetic при начальной температуре 24,0 °С и атмосферном давлении

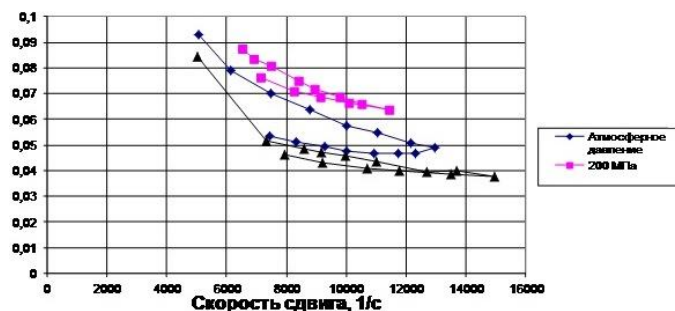


Рис. 5. Кривые вязкости полусинтетического масла Mitsubishi DiaQueen ATF SP3 при начальной температуре 24,0 °С (график «релаксация» показывает кривую вязкости сразу после резкого сброса давления с 198 МПа до атмосферного)

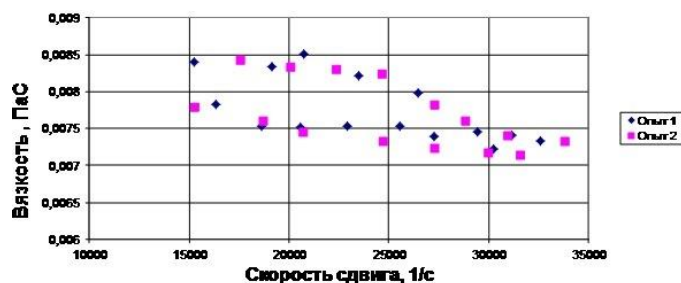


Рис. 6. Кривая вязкости летного дизельного топлива при начальной температуре 24,0 °С и атмосферном давлении (измерения для графика «Опыт 2» проведены через 10 минут после окончания измерений для графика «Опыт 1»)

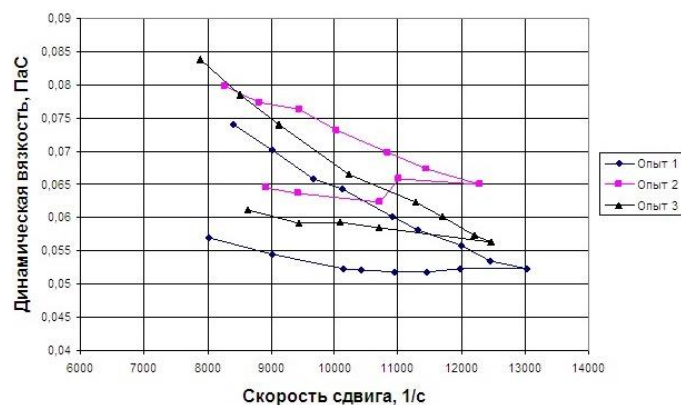


Рис. 7. Кривая вязкости полусинтетического масла для АКПП Castrol automatic при начальной температуре 24,0 °С. (график «Опыт 1» построен при атмосферном давлении; график «Опыт 2» – сразу после сброса давления с 198 МПа до атмосферного; график «Опыт 3» – через 20 минут после сброса давления)

### Выводы

Полученные результаты показывают возможность применения рассмотренного вискозиметра для проведения экспериментальных исследований вязкостных характеристик углеводородных жидкостей при высоких давлениях, выявлены эффекты релаксации в углеводородных системах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г.И., Городцов В.А., Калашников В.Н. Турбулентность аномальных жидкостей // Минск: Наука и техника, в кн. «Тепло- и массоперенос», 1968.-с.3-23.
2. Белкин И.М., Виноградов Г.В., Леонов А.И. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов // М.: Машиностроение, 1967. 272 с.
3. Астарита Дж., Маруччи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М.: Мир. - 1978. - 309 с.
4. Виноградов Г. В., Малкин А. Я. Реология полимеров. М.: Химия. — 1977.-438 с.
5. Лихачев Е. Р. Зависимость вязкости воды от температуры и давления // Журнал технической физики, 2003, т. 73, вып. 4. с. 135 - 136
6. Остапенко А. А. Влияние электрического поля на динамическую вязкость жидких диэлектриков // Журнал технической физики, 1998, т. 68, №1.-е; 40-43

7. Фабелинский И. Л. О макроscopicкой и молекулярной сдвиговой вязкости // Успехи физических наук.- 1997. Т. 167, № 7.-с. 721-7331
8. Фогельсон Р. Л., Лихачев Е. Р. Температурная зависимость вязкости // Журнал технической физики, 2001, т. 71, вып. 8. с. 128 - 131
9. Френкель Я; И. Кинетическая теория жидкостей. — Ленинград: Наука, 1975.-592 с.
10. Гришин А.П., Ребиндер П.А., Александрова Э.А., Маркина З.Н. О кристаллизации, структурном застывании и гистерезисе в растворах парафина с добавками поверхностно-активных веществ // М.: ДАН СССР, 1970. т. 194. - № 4. - с.850-853.
11. Скородумов, В.Ф. Термодинамические аспекты стеклования под давлением / В.Ф. Скородумов // Журнал физической химии. – 1994. – Т. 68, № 12. – С. 2254–2256.
12. Циклис, Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких давлениях / Д.С. Циклис. – 3-е изд. – М.: Химия, 1965. – 416 с.
13. Бриджмен, П.В., Исследования больших пластических деформаций и разрыва / П.В. Бриджмен; пер. с англ. – М.: Мир, 1955. – 467 с.
14. Бриджмен, П.В., Физика высоких давлений / П.В. Бриджмен; пер. с англ. – М.: ОНТИ, 1935. – 256 с.
15. Иоселевич В.А. Микро- и макрогидродинамика полимерных растворов // М.: Наука, «Механика и научно-технический прогресс», 1987. т.2. -с.146-163.
16. Первушин В.Е. К оценке влияния теплоты внутреннего трения на характеристики структурного течения вязкопластичной жидкости в круглой трубе // М.: ПМФТ, 1974. № 3. - с.79-85
17. Реология. Теория и практика. Под редакцией Ф.Эйриха. М.: Издательство иностранной литературы, 1962. - 921 с.
18. Ребиндер П.А. Физико химическая механика дисперсных структур, в кн.: «Физико - химическая механика дисперсных структур» // М.: Наука, 1966. с. 3-6.
19. Ремезов С.В. Структурно-реологические свойства дисперсных систем с неполярной дисперсионной средой. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук // М.: МГУ, 1996. 21 с.
20. Фройштетер Г.Б., Данилевич С.Ю., Радионова Н.В. Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах. Киев: Наукова думка, 1990. -216 с.
21. Харин В.Т. Интерпретация данных ротационной вискозиметрии вязко-упругих тиксотропных жидкостей // М.: Докл. АН СССР, 1987. т.293. - № 4. -с.823-827.
22. Яхно О.М., Дубовицкий В.Ф. Основы реологии полимеров. // Киев: Вишья школа, 1976. 185 с.

## Viscosity Characteristics of Hydrocarbons at High Pressures

Rednikov S.N.

South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[srednikov@mail.ru](mailto:srednikov@mail.ru)

**Abstract.** The article deals with the viscosity characteristics of hydrocarbons at high pressures. The most common methods of the process modeling are described and the issues of modeling the shear strength ability of liquids.

**Keywords:** viscosity, temperature, hydrocarbons.



# Модернизация системы смазки турбокомпрессора двигателя внутреннего сгорания\*

Плаксин А.М., Гриценко А.В.  
Южно-Уральский государственный  
аграрный университет  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[alexgrits13@mail.ru](mailto:alexgrits13@mail.ru)

Глемба К.В.  
Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет),  
Южно-Уральский государственный  
аграрный университет  
г. Челябинск, Российская Федерация,  
[glemba77@mail.ru](mailto:glemba77@mail.ru)

**Аннотация.** Одним из наиболее распространенных способов увеличения мощности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является газотурбинный наддув, которым оснащают до 70 % общего количества двигателей. Можно также выделить существенные недостатки его использования: низкая эксплуатационная надежность – доля отказов приходящаяся на турбокомпрессор составляет до 30 % от общих отказов двигателей; высокая цена турбокомпрессора; высоко затратный ремонт, обусловленный высокой трудоёмкостью и значительной величиной простоя машинно-тракторных агрегатов; потери в результате простоя высокопроизводительных машинно-тракторных агрегатов. Снижение ресурсных параметров двигателей с турбонадувом связано с высокими температурными перегрузками, возникающими вследствие непредусмотренных режимов выбега ротора турбокомпрессора. Снизить тепловую напряженность деталей турбокомпрессора и уменьшить длительность выбега предлагается за счет использования гидроаккумулятора и тормозного устройства. Изготовлен стенд для исследования турбокомпрессора с предлагаемыми устройствами. В результате исследований на стенде и их внедрения удается избежать полусухого и сухого трения и продлить срок службы турбокомпрессора. При совместном использовании гидроаккумулятора и тормозного устройства величина времени выбега ротора уменьшилась в среднем на 30-35% по сравнению с величиной времени при свободном выбегае. Данное мероприятие позволяет сократить количество отказов ТКР на 10-15%.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, турбонадув, турбокомпрессор, гидроаккумулятор, тормозное устройство, ресурс, выбег.

## ВВЕДЕНИЕ

По мнению экспертов и специалистов в области производства и конструирования турбокомпрессоров (ТКР) дальнейшее повышение уровня надёжности ТКР нового поколения возможно будет обеспечить за счёт применения более совершенной технологии изготовления и изменения конструкции ТКР, а именно: встраивание корректоров подачи топлива – повышение надёжности на 10-25%; совершенствование подшипникового узла – 15-20 %; модернизация системы смазки ДВС – 5-7 %; применение новых конструкционных материалов – 10-13 %; улучшение отвода тепла от корпуса ТКР – 10-20 %; уменьшение уровня вибрации деталей ТКР – 2-5 %; уменьшение уровня тепловой напряжённости деталей ТКР – 5-10 %. Из практики эксплуатации двигателей с ТКР известно, что

основным показателем надёжности ТКР являются показатели ресурса (износостойкости) подшипникового узла. Основным, наиболее часто встречающимся видом отказа ТКР является заклинивание вала (ротора) [1-10].

Проведен сравнительный анализ определяющих факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность ТКР, были сформулированы выводы о причинах обуславливающих появление основного отказа ТКР – заклинивания: превышение предельных значений динамических и температурных параметров при работе ТКР на критических режимах, приводящих к нарушению устойчивых процессов в парах трения; закоксовывание смазочного масла в каналах смазки ТКР; расцентровка осей и отверстий деталей ТКР в области турбины; повышенный расход масла через ТКР; деформация корпуса ТКР, влекущая за собой уменьшение зазоров; локальный перегрев деталей ТКР при остановке дизеля; интенсивный износ подшипника ТКР при отсутствии смазки после остановки дизеля; недостаточное поступление смазочного масла (масляное голодание) в ТКР [1-25].

По результатам проведённых исследований были сформулированы следующие задачи: произвести анализ причин снижения эксплуатационной надёжности ТКР; разработать конструкцию экспериментального стенда с гидроаккумулятором и тормозным устройством; экспериментально определить взаимосвязь параметров процесса торможения ротора в условиях возникновения противодавления. Для повышения эксплуатационной надёжности ТКР нужно обеспечить смазку и охлаждение подшипников в период выбега ротора при останове двигателя и ограничить время его выбега каким-либо тормозным устройством. На основе глубокого анализа научных работ, литературных источников и конструкторских схем была сформулирована научная гипотеза, заключающаяся в улучшении эксплуатационной надёжности ТКР двигателя организацией смазки подшипников ротора турбокомпрессора после остановки двигателя с использованием для этой цели гидроаккумулятора и применением тормозного устройства для снижения времени выбега ротора. В соответствии с вышеизложенным была поставлена цель работы: повышение эксплуатационной надёжности ТКР автотракторных двигателей путём организации смазки пар трения после остановки двигателя и снижения времени выбега ротора применением тормозного устройства.

\* Тема хоздоговора: “Разработка стенда для испытания турбокомпрессоров тракторных и комбайновых двигателей”. Работа выполнена в соответствии со Стратегией машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России на период до 2020 г., разработанной в соответствии с Федеральным законом “О развитии сельского хозяйства” от 29.12.2006 г. № 264

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уравнение движения ротора турбокомпрессора в общем виде можно записать так [1, 4, 11, 24, 25]:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_K - M_{ТОРМ}, \quad (1)$$

где  $J \cdot d\omega/dt$  – момент от сил инерции движущихся масс ротора, Н·м;  $J$  – момент инерции ротора относительно оси, кг·м<sup>2</sup>;  $d\omega/dt$  – угловое ускорение (замедление) ротора, рад/с<sup>2</sup>;  $M_T$  – эффективный момент, развиваемый турбиной, Н·м;  $M_K$  – момент, потребляемый компрессором, Н·м;  $M_{ТОРМ}$  – момент механических сопротивлений вращению ротора, т.е. тормозной момент, Н·м.

В момент выключения подачи воздуха на турбину  $M_K$  и  $M_T$  равны нулю, тогда уравнение движения ротора на режиме выбега примет следующий вид:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -M_{ТОРМ}. \quad (2)$$

Режим работы компрессора в период торможения можно определить графически путём наложения характеристик сети (степени закрытия заслонки) на полную характеристику компрессора, представляющую собой зависимости полного давления  $P_N$ , мощности  $N$  и КПД от производительности (рис. 1). Точка пересечения характеристик сети и полного давления является рабочей точкой и определяет величину давления и производительности компрессора. При полностью открытой заслонке характеристика сети является пологой, и режим работы определяется точкой  $A$ . Этой точке соответствуют значения производительности  $Q_A$  и давления  $P_A$ .

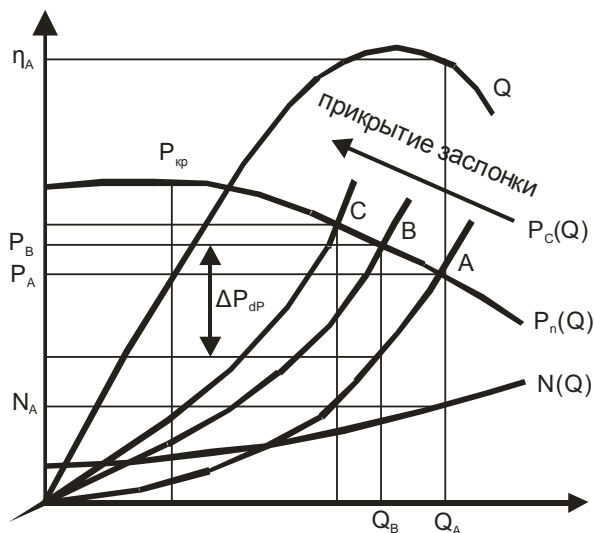


Рис. 1. Напорная характеристика компрессора, турбокомпрессора и линии регулирования

По известной производительности определяем потребляемую мощность  $N_A$  и коэффициент полезного действия  $\eta_A$ . При закрывании заслонки сопротивление (противодавление) растёт, и характеристика сети становится более крутой. Рабочая точка перемещается из положения  $A$  в положение  $B$ , а затем в  $C$ . Эти точки определяют новые параметры работы компрессора, а соответственно и всего ТКР в целом. По рис. 1 видно, что дроссельный способ торможения осуществляется уменьшением подачи компрессора. Мощность на валу ТКР в результате дросселирования уменьшается, чем и обеспечивается быстрое и плавное

торможение ротора. К примеру, дросселирование до точки  $B$  приводит к уменьшению давления на дросселе  $\Delta P_{др}$  [3].

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Предлагается новая конструктивная разработка, направленная на увеличение надежности ТКР в эксплуатации. Система смазки турбокомпрессора двигателя содержит главную масляную магистраль, напорный трубопровод, связывающий магистраль с подшипником турбокомпрессора, гидроаккумулятор, дополнительно установлено тормозное устройство, привод которого осуществляется от главной масляной магистрали. Для управления системой смазки используется электронный блок управления. Между воздухоочистителем и насосным колесом турбокомпрессора в соединительном патрубке установлены датчики расхода и температуры воздуха, соединенные с электронным блоком управления. Между воздушным и выпускным патрубками по пути следования к турбинному колесу турбокомпрессора установлен байпасный трубопровод, предназначенный для подачи охлажденного воздуха в режиме выбега к турбинному колесу турбокомпрессора. На корпусе турбокомпрессора установлен электромагнитный клапан-форсунка, соединенный с гидроаккумулятором, служащим для подвода масла к подшипнику турбокомпрессора в режиме выбега турбокомпрессора при остановке двигателя. На выходе из подшипника турбокомпрессора установлен датчик температуры масла, соединенный с электронным блоком управления.

Тормозное устройство в своей конструкции имеет две поворотные заслонки, а их привод осуществляется от главной масляной магистрали через напорную магистраль. Система работает следующим образом. Электромагнитный клапан-форсунка подаёт масло в подшипник турбокомпрессора по сигналу электронного блока управления при остановке двигателя внутреннего сгорания и работе турбокомпрессора в режиме выбега ротора. Масло, проходящее через подшипник турбокомпрессора, попадает на выходной датчик температуры масла, который установлен в сливной масляной магистрали. Сигнал от него поступает в электронный блок управления, который выдаёт управляющие импульсы для управления потоком смазочного масла, переправляя его или через масляный радиатор, или минуя его (в зависимости от температуры масла). При остановке двигателя управляемая клапан-форсунка открывается по сигналу датчиков положения коленчатого вала и оборотов турбокомпрессора электронно, продолжая смазывать и охлаждать подшипник турбокомпрессора. Данное устройство позволяет избежать теплового удара, и как следствие, поломки деталей турбины турбокомпрессора. Предлагаемое техническое устройство проявляет свой результат в виде исключения эффекта закоксовывания остатков смазочного масла в каналах системы смазки турбокомпрессора при внезапной (аварийной) остановке двигателя под нагрузкой в режиме выбега ротора турбокомпрессора. Данный способ заключается как в регулируемой (по объёму, времени и температуре) подаче масла в подшипник турбокомпрессора, так и в регулируемой подаче на вход турбинного колеса сжатого воздуха, имеющего температуру порядка 100 °С. В результате происходит снижение температуры деталей турбины, имеющих температуру 600-700 °С, повышается эксплуатационная надёжность подшипников, сохраняется целостность ротора, корпуса и турбокомпрессора в целом [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подтверждения теоретических предпосылок были проведены экспериментальные исследования по оценке времени выбега турбокомпрессоров ТКР-11 [4-8]. Сравнение экспериментальных результатов при четырех различных вариантах выбега представлено на рис. 2 – зависимость частоты вращения ротора турбокомпрессора марки ТКР-11 от времени выбега.

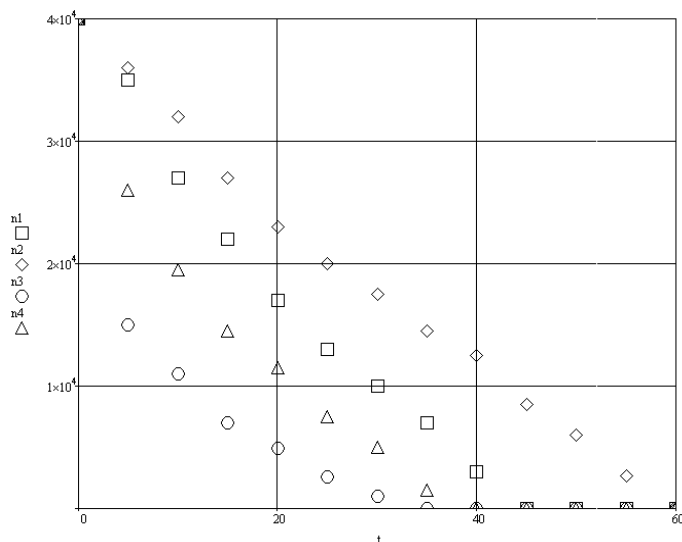


Рис. 2. Зависимость частоты вращения  $n_1, n_2, n_3, n_4$ , рад/с от времени выбега  $t$ , с: 1 – выбег ротора в штатном режиме; 2 – выбег ротора с включённым гидроаккумулятором; 3 – выбег ротора с тормозным устройством; 4 – выбег ротора с включённым гидроаккумулятором и тормозным устройством

С целью определения величины замедления при свободном выбеге произвели вычисление первой производной от значений частоты вращения ротора ТКР. В результате получили зависимость замедления ротора ТКР от времени выбега рис. 3.

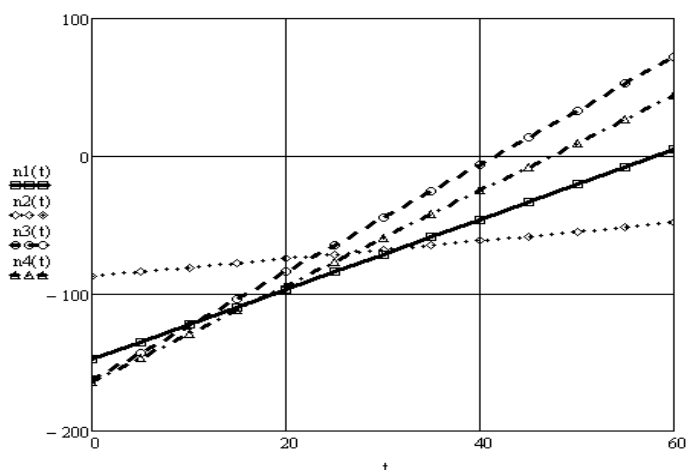


Рис. 3. Зависимость замедления  $n_1(t), n_2(t), n_3(t), n_4(t)$ , рад/с<sup>2</sup> от времени выбега  $t$ , с

Для определения величины момента сопротивления вращению ротора ТКР произвели умножение величин замедления на момент инерции ротора ТКР. В результате получили зависимость тормозного момента от времени выбега рис. 4.

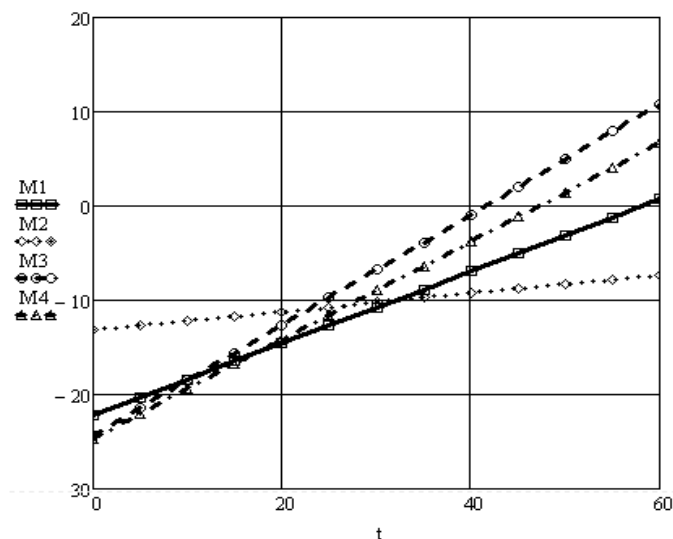


Рис. 4. Зависимость тормозного момента  $M_1, M_2, M_3, M_4$ , Н·м от времени выбега  $t$ , с

Выводы

По анализу данных на рис. 2-4 и по результатам работы можно сделать выводы.

Установленный в систему смазки турбокомпрессора дизеля гидроаккумулятор позволяет осуществлять штатную смазку и охлаждение подшипников ротора при падении оборотов коленчатого вала ДВС, а также при его остановке при перегрузке в режиме выбега ротора.

Внедрение тормозного устройства позволяет сократить время выбега ротора и тем самым предотвратить наступление масляного голодания и сухого трения подшипника ротора.

Совместное применение гидроаккумулятора и тормозного устройства позволяет снизить до минимума риск наступления сухого трения и аварийного выхода из строя турбокомпрессора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При совместном использовании гидроаккумулятора и тормозным устройством величина времени выбега ротора уменьшилась в среднем на 30-35% по сравнению с величиной времени при свободном выбеге (линия 4 на рис. 2-4). Данное мероприятие позволяет сократить количество отказов ТКР на 10-15%, а соответственно и простои агрегатов при использовании в растениеводстве. Расчётный экономический эффект составляет в пределах 50-80 тыс. рублей за сезон эксплуатации агрегатов с тракторами различной единичной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плаксин А.М. Диагностирование системы выпуска двигателей внутреннего сгорания путем контроля сопротивления выпускного тракта / А.М. Плаксин, А.В. Гри-

ценко, С.Э. Бисенов, К.В. Глемба, К.И. Лукомский // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – №8. – С. 322.-326.

2. Плаксин А.М. Продление срока службы турбокомпрессоров автотракторной техники применением гидроаккумулятора в системе смазки / А.М. Плаксин, А.В. Гриценко, А.Ю. Бурцев, К.В. Глемба, К.И. Лукомский // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – №6. – С. 728.-732.

3. Плаксин А.М. Увеличение надежности турбокомпрессоров автотракторной техники применением гидроаккумулятора / А.М. Плаксин, А.В. Гриценко, А.Ю. Бурцев, К.В. Глемба, К.И. Лукомский // *Вестник КрасГАУ*. – 2014. – №8. – С. 176.-180.

4. Гриценко А.В. Разработка методов тестового диагностирования работоспособности систем питания и смазки двигателей внутреннего сгорания (экспериментальная и производственная реализация на примере ДВС автомобилей): дис ... доктора техн. наук. – Челябинск, 2014. – 397 с.

5. Плаксин А.М. Способ обеспечения работоспособности турбокомпрессора дизелей применением автономного смазочно-тормозного устройства / А.М. Плаксин, А.В. Гриценко, А.Ю. Бурцев, К.В. Глемба // *Вестник КрасГАУ*. – 2015. – №6. – С. 89.-93.

6. Плаксин А.М. Результаты экспериментальных исследований времени выбега ротора турбокомпрессора ТКР-11 / А.М. Плаксин, А.В. Гриценко, А.Ю. Бурцев // *АПК России*. – 2014. – Т. 70. – С. 130.-135.

7. Гриценко А.В. Техничко-экономическая эффективность от внедрения модернизированной системы смазки турбокомпрессора / А.В. Гриценко, А.Ю. Бурцев // *АПК России*. – 2015. – Т. 72. – С. 39.-45.

8. Бурцев А.Ю. Повышение эксплуатационной надежности турбокомпрессоров дизелей тракторов / А.Ю. Бурцев, А.М. Плаксин, А.В. Гриценко // *АПК России*. – 2015. – Т. 72. – С. 23.-25.

9. Гриценко А.В. Исследования выбега ротора турбокомпрессора ТКР-11 / А.В. Гриценко, А.М. Плаксин, А.Ю. Бурцев // *Агропродовольственная политика России*. – 2015. – №1 (13). – С. 52.-55.

10. Гриценко А.В. Способ и стенд для диагностирования турбокомпрессора ТКР-11 / А.В. Гриценко, А.М. Плаксин, И. Ганиев, А.Ю. Бурцев, Ф.А. Гафаров // *Вестник Таджикского технического университета*. – 2014. – Т. 4 (28). – С. 92.-97.

11. Гриценко А.В. Диагностирование подшипников кривошипно-шатунного механизма двигателя внутреннего сгорания по параметрам пульсации давления в центральной масляной магистрали: дисс ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2009. – 189 с.

12. Куков С.С. Диагностирование системы смазки двигателя внутреннего сгорания / С.С. Куков, А.В. Гриценко // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. – 2009. – №1. – С. 33.-34.

13. Гриценко А.В. Диагностирование двигателей внутреннего сгорания по давлению масла // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. – 2013. – №1. – С. 22.-24.

14. Гриценко А.В. Диагностирование коренных и шатунных подшипников кривошипно-шатунного механизма / А.В. Гриценко, К.В. Глемба, О.Н. Ларин // *Вестник*

*ЮУрГУ: Межвуз. сб. научн. тр.* – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2014. – Т. 14. – №1. – С. 63.-71.

15. Гриценко А.В. Методические приемы повышения точности диагностирования подшипников коленчатого вала / А.В. Гриценко, С.С. Куков, К.В. Глемба // *АПК России*. – 2010. – Т. 57. – С. 51.-56.

16. Глемба В.К. Продление срока службы подшипников скольжения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания / В.К. Глемба, К.В. Глемба // *АПК России*. – 2010. – Т. 57. – С. 34.-35.

17. Куков С.С. Диагностирование коренных подшипников кривошипно-шатунного механизма по параметрам давления в центральной масляной магистрали / С.С. Куков, А.В. Гриценко // *Вестник КрасГАУ*. – 2009. – №3. – С. 143.-147.

18. Куков С.С. Диагностирование коренных подшипников кривошипно-шатунного механизма по параметрам давления в центральной масляной магистрали / С.С. Куков, А.В. Гриценко // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. – 2009. – №3. – С. 34.-35.

19. Карпенко А.Г. Автомобильные эксплуатационные материалы: учебное пособие. / А.Г. Карпенко, К.В. Глемба, В.А. Белевитин. – Челябинск: Издательство Челяб. гос. пед. ун-та, 2014. – 124 с.

20. Гриценко А.В. Разработка средств и методов диагностирования с частично параллельным резервированием элементов, а также с устранением лишних диагностических операций и диагностических параметров // *Вестник КрасГАУ*. – 2012. – №7. – С. 120.-125.

21. Куков С.С., Гриценко А.В. Способ безразборной диагностики степени износа подшипников двигателя внутреннего сгорания // *Патент России № 2399898*. 2010. Бюл. №26.

22. Глемба В.К., Глемба К.В. Подшипник скольжения // *Патент России № 85958*. 2009. Бюл. №23.

23. Носырев Д.Я. Определение технического состояния турбокомпрессора и приводного центробежного нагнетателя / Д.Я. Носырев, А.А. Свечников, Ю.Ю. Становова // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2010. – №3. – С. 59.-63.

24. Малаховецкий А.Ф. Повышение надёжности турбокомпрессоров автотракторных двигателей путём снижения их теплонапряжённости: дис ... канд. техн. наук. – Саратов, 2005. – 141 с.

25. Потапов С.В. Повышение долговечности капитально отремонтированных тракторных дизелей применением гидроаккумулятора в смазочной системе: дис ... канд. техн. наук. – Челябинск, 1999. – 181 с.

# Modernization of the Lubrication System of the Turbocharger of the Engine

Plaksin A. M., Gritsenko A. V.

South Ural State Agrarian University  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[alexgrits13@mail.ru](mailto:alexgrits13@mail.ru)

Glemba K. V.

South Ural State University (National Research University)  
South Ural State Agrarian University  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[glemba77@mail.ru](mailto:glemba77@mail.ru)

*Abstract.* One of the most common ways of increasing the power of internal combustion engines (ice) is a gas-turbine supercharging, which is equipped with up to 70 % of the total number of engines. You can also highlight significant drawbacks of its use: low operational reliability – the proportion of failures attributable to the turbocharger is up to 30 % of the total failures of engines; the high price of the turbocharger; high-cost repairs due to the high complexity and the considerable amount of downtime of machine and tractor aggregates; loss as a result of down-

time high-performance machine-tractor units. Reducing resource parameters of turbocharged engines occurs due to high temperature overloads that arise due to unintended modes of the coasting rotor of the turbocharger. To reduce the heat load on parts of the turbocharger are encouraged through the use of the accumulator and the braking device.

*Keywords:* the internal combustion engine, turbocharger, turbocharger, accumulator, brake device; resource, run-on.



# Развитие научных основ динамики машин как раздела прикладной механики

Добров И.В.

Национальная металлургическая академия Украины  
г. Днепропетровск, Украина  
[igordobrov@yahoo.com](mailto:igordobrov@yahoo.com)

**Аннотация.** Приведена характеристика силы инерции в рамках классификации сил при решении задач механики машин, базирующихся на одновременном и безусловном соблюдении законов Ньютона и закона сохранения энергии. Доказано, что каждому потенциальному полю перемещений материального тела соответствует потенциальное поле скоростей, и полюса этих полей расположены в одной и той же точке пространства. Для абсолютно твердого тела перемещающегося с неравномерной скоростью сила инерции представляет внутреннюю потенциальную силу и потенциалом силы инерции является скорость материального тела.

**Ключевые слова:** механика, прикладная механика, механика машин, классификация сил, сила инерции.

## ВВЕДЕНИЕ

Все многообразие задач, решаемых в механике<sup>1</sup> как науке "...о движении вещества" [2], "...строится на ряде основных физических представлений, таких как время, пространство, одновременность, масса, сила" [2]. Тем не менее, при решении ряда задач динамики машин методами математического моделирования имеют место некорректные результаты решения с точки зрения классической механики в части несоответствия полученного решения закону сохранения энергии или одному из законов Ньютона [3-6]. Эти несоответствия в первую очередь связаны с нарушением основополагающих подходов к определению разнообразных сил, действующих в механических системах, с учетом изменения энергии при выполнении механической работы. До настоящего времени не получил однозначного решения вопрос о реальности или фиктивности силы инерции [5-11], без учета которой не производится анализ динамики современных быстроходных машин. Причем, имеется четкое определение силы инерции<sup>2</sup>, методы ее вычисления и использования для составления расчетных схем динамики машин [4-9, 12], однако вопрос о реальности или фиктивности этой силы остается открытым.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе предлагается вопрос о силах инерции в механике машин, их определении и классификации рассматривать с позиции прикладной механики как раздела механики, связанного с решением инженерных (практических) задач при перемещении и деформации конкретных механических систем в ограниченной области пространства в

течение определенного отрезка времени при использовании определенных источников механической энергии "неживого происхождения" [13]. Такой подход при корректном решении задач механики машин (прикладной механики) [12] базируется на неукоснительном и одновременном соблюдении основополагающих принципов классической механики, изложенных в трех законах Ньютона [3], при соблюдении закона сохранения энергии [14, 15] и основан на следующих положениях [13, 16, 17]:

- силу  $P^3$  (рис. 1) может уравновесить только сила;
- к телу<sup>4</sup> нельзя приложить силу, если тело не оказывает сопротивление действию этой силы;
- сила ( $P$ ) может совершать механическую работу ( $A_p = P \cdot s_p$ ), связанную с перемещением ее точки приложения ( $s_p$ ), только в том случае, если источник действия силы (источник энергии этой силы  $E_p$ ) может изменять свою механическую энергию ( $\Delta E_p \neq 0$ );

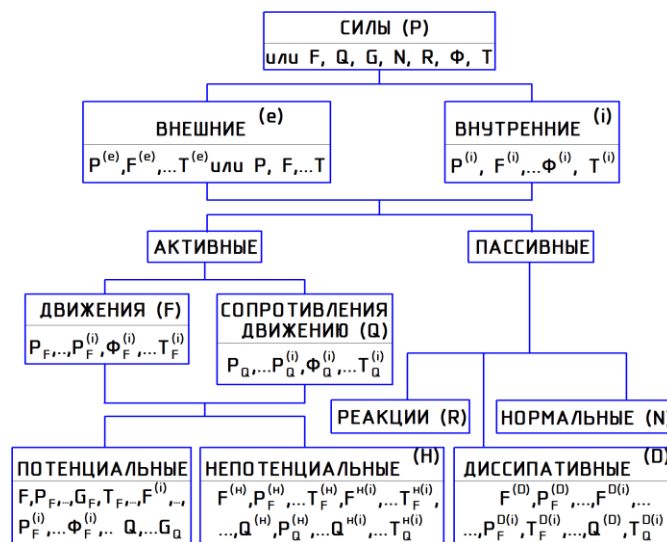


Рис. 1. Классификация сил в прикладной механике:  
 $F$  – сила движения,  $Q$  – сила сопротивления движению;  
 $G = P_G$  – сила тяжести,  $N = P_N$  – нормальная сила,  
 $R = P_R$  – сила реакции,  $\Phi = P_\Phi$  – сила инерции,  
 $T = P_T$  – сила трения

<sup>1</sup> "Механика. Наука о механическом движении и механическом взаимодействии материальных тел" [1].

<sup>2</sup> "Сила инерции. Величина равная произведению массы материальной точки на ее ускорение и направленная противоположно этому ускорению" [1].

<sup>3</sup>  $P$  – обозначение любой силы, без характеристики ее особенностей, от слова "potential" [16].

<sup>4</sup> Здесь и далее по тексту под термином "тело" ("элемент тела") будем понимать материальный объект, объем которого  $V_m$  ( $\Delta V_m < V_m$ ) конечен и может быть меньше любого малого наперед заданного объема пространства  $\Delta V_n$  ( $\Delta V_m < \Delta V_n \rightarrow 0$ ).

- изменение механической энергии источника действия силы – равно работе, которую производит сила при перемещении точки приложения этой силы относительно того положения, которое занимает в пространстве ее источник энергии;

- к телу, которое перемещается с определенной скоростью, нельзя приложить внешнюю силу движения больше той силы, которую в текущий момент времени обеспечивает мощность источника энергии этой силы при перемещении точки приложения силы со скоростью равной скорости подвижного тела.

Для решения задач механики машин (прикладной механики) предложена [16, 17] классификация сил (см. рис. 1 и табл. 1), выполненные на основе нормативной терминологии [1, 17] и научно-технической литературы [3-5, 13-15, 18-19].

Таблица 1

Характеристика сил прикладной механики

<b>Сила (P)</b> - векторная величина, являющаяся мерой механического действия одного материального тела на другое.	
<b>Внешняя сила</b> - сила, действующая на какое-либо материальное тело механической системы со стороны тела, не принадлежащего этой системе. Источник энергии внешней силы находится за пределами системы тел.	<b>Внутренняя сила</b> - сила, действующая на какое-либо материальное тело (точку тела) механической системы со стороны других материальных тел (точек тела), принадлежащих рассматриваемой механической системе (телу). Источник энергии внутренней силы расположен внутри рассматриваемой системы тел.
<b>Активные силы</b>	
совершают механическую работу ( $A_p \neq 0$ ), связанную с перемещением и (или) деформацией тела, на которое они действуют.	
<b>Сила движения</b> ( $P_F$ или $F, G_F, \Phi_F, T_F$ ) – сила, точка приложения которой к подвижному телу перемещается в сторону направления линии действия силы на это тело ( $A_F > 0$ ).	<b>Сила сопротивления движению</b> ( $P_Q$ или $Q, G_Q, \Phi_Q, T_Q$ ) – сила, точка приложения которой к подвижному телу перемещается в сторону противоположную направлению линии действия силы на это тело ( $A_Q < 0$ ).
<b>Потенциальная сила</b> - сила, точка приложения которой неподвижна ( $s_p = s \neq 0$ ) относительно поверхности (объема) подвижного тела ( $v_m \neq 0$ ), на которое она действует, не изменяя направления линии действия. <b>Непотенциальная сила</b> ( $F^{(H)}, Q^{(H)}$ ) – сила, точка приложения которой к подвижному телу перемещается относительно точки поверхности (объема) этого тела ( $s_F \neq s, s \neq 0, s_Q \neq s$ ), и (или) направление линии действия силы изменяет свое положение в пространстве ( $0 < A_F^{(H)} < A_F, 0 > A_Q^{(H)} > A_Q$ ).	
<b>Пассивные силы.</b>	
приложенные к телу, не совершают механическую работу ( $A_p = 0$ ) по перемещению и (или) деформации этого тела:	
<b>диссипативная сила</b> ( $P^{(D)}$ ) – сила, действующая на тело таким образом, что точка приложения силы перемещается ( $s_p \neq s = 0$ ) относительно поверхности (объема) неподвижного тела, на которое она действует; <b>сила реакции</b> ( $R$ ) – сила, действующая на неподвижное тело, при этом точка приложения силы не перемещается ( $s_p = s = 0$ ) относительно точки поверхности (объема) этого тела; <b>нормальная сила</b> ( $N$ ) - сила, действующая на тело в направлении, перпендикулярном перемещению тела.	

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Условие неравномерного поступательного движения тела  $m$  определяется действием второго закона Ньютона<sup>5</sup>

$$P(t) \sim \Delta(m(t) \cdot v(t)) \quad (1)$$

Для абсолютно твердого тела  $m(t) = const$  уравнение (1) может быть представлено в виде

$$P(t) \cdot k(t) = m \cdot \Delta v(t), \quad (2)$$

где  $k(t)$  – коэффициент пропорциональности, который принимается равным  $k(t) = t$  [17-19] и представляет время действия движущей силы (силы движения) в направлении линии, вдоль которой происходит изменение количества движения тела  $m$ . При  $t \rightarrow dt$  получим  $\Delta v(t) \rightarrow dv$  и уравнение (2) приводится к виду

$$P(t) = m \cdot \frac{dv(t)}{dt} = m \cdot \frac{d\dot{x}(t)}{dt} \quad (3)$$

Учитывая, что  $\dot{x}(t) = \varphi(\ddot{x}(t), t)$ , из (3) следует

$$P(t) = m(\ddot{x}t + \ddot{x}) \quad (4)$$

Анализ (4) показывает:

$$P(t) = \begin{cases} m \cdot (\dot{x}t + \ddot{x}) \neq const \Leftarrow (\ddot{x} \neq 0); \\ m\ddot{x} = const \Leftarrow (\ddot{x} = 0). \end{cases} \quad (5)$$

Неравномерное прямолинейное движение тела  $m$  с постоянным ускорением ( $\ddot{x} > 0$ ) или замедлением ( $\ddot{x} < 0$ ) возможно только при постоянной по величине и направлению движущей силе  $P_F$ . При этом уравнение (5), вытекающее из второго закона Ньютона, не определяет характер движущей силы<sup>6</sup> и это требует дополнительного анализа уравнения (5). В работе [18] при  $\ddot{x} = const$  получено уравнение, которое в принятых обозначениях будет представлено в виде

$$P = \pm m\ddot{x} \quad (6)$$

В правой части уравнения (6), при корректном решении задач прикладной механики, может быть только сила, уравновешивающая внешнюю силу  $P$ . Если такая внешняя сила отсутствует, то уравновесить внешнюю силу  $P$  в уравнении (6) может только внутренняя сила тела  $m$ . В условиях неравномерного движения такой силой согласно [1] является сила инерции

$$\pm m\ddot{x} = \mp \Phi. \quad (7)$$

Рассмотрим (рис. 2) процесс поступательного движения тела массой  $m = \rho \cdot V_m = \rho \cdot l \cdot h \cdot b$  ( $\rho$  – удельная масса,  $l \times h \times b$  – габариты тела  $m$ ) единичной ширины ( $b = 1$ ) по горизонтальной поверхности “без трения” (на роликах  $r$ ) с ускорением  $a_m = \ddot{x} > 0$  (рис. 2, а) под дейст-

<sup>5</sup> “Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит в направлении той прямой, по которой эта сила действует” [3]. Жирным шрифтом автором выделено слово Ньютона, которое указывает на то, что второй закон Ньютона определяет только качественное соотношение между изменением количества движения и приложенной движущей силой.

<sup>6</sup> Во втором законе Ньютона не указывается на характеристику движущей силы, которая может быть как внешней силой, так и внутренней. При этом изменение количества движения тела в направлении линии действия движущей силы может быть как со знаком плюс (ускоренное движение), так и минус (замедленное движение).



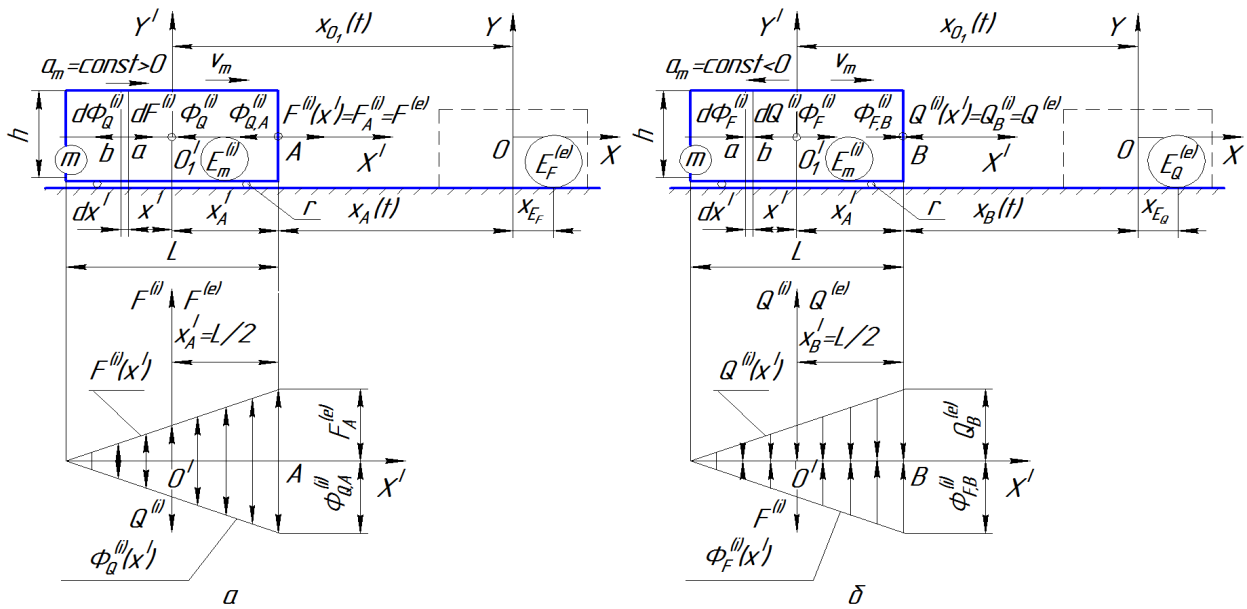


Рис. 2. Схемы действия сил при неравномерном поступательном движении тела  $m$  :  
 а – равноускоренном; б – равнозамедленном

вием внешней силы движения  $P_F = F^{(e)}$ , приложенной к телу  $m$  в точке  $A$  на поверхности этого тела ( $F^{(e)} = F_A^{(e)}$ ), и с замедлением  $a_m = \ddot{x} < 0$  (рис. 2, б) под действием внешней силы сопротивления движению  $P_Q = Q^{(e)}$ , приложенной к телу  $m$  в точке  $B$  ( $Q^{(e)} = Q_B^{(e)}$ ). Для характеристики энергосиловых параметров движения тела  $m$  под действием внешних сил применяем неподвижную систему координат  $XOY$ , которая непосредственно ( $x_{E_F}$ ) или косвенно связана с неподвижным источником энергии внешней силы движения  $E_F^{(e)}$  (рис. 2, а) или сопротивления движению  $-E_Q^{(e)}$  ( $x_{E_Q}$  на рис. 2, б). Для характеристики внутренних сил, действующих в теле  $m$  протяженностью  $l$  будем использовать подвижную систему координат  $X'O'Y'$  у которой ось  $O'Y'$  проходит через центр масс тел  $m$  (посредине длины  $l$  при  $m(x') = m(x) = const$ ) параллельно оси  $OY$ , а ось  $O'X'$  – в направлении скорости  $v_m$  перемещения тела  $m$ . Взаимосвязь координат этих систем определяется уравнением

$$x = x_{O'} \pm x', \quad (8)$$

где  $x_{O'}$  – координата центра массы тела  $m$  в системе координат  $XOY$ ;  $x' = x'_o$  – координата материальной точки тела (элемента тела  $dm = \frac{m}{l} \cdot dx'$ ), определяющая положение

$dm$  в системе координат  $X'O'Y'$  (рис. 2, а, б). Учитывая, что кинематика тела (элемента тела) не зависит от того, какая из сил действует на тело (элемент тела) внешняя сила или составляющая внутренних сил, если векто-

ра этих сил в любой момент времени равны между собой (второй закон Ньютона), из (8) и рис. 2, а следует

$$\bar{F}^{(e)} = \bar{F}_A^{(e)} = \bar{F}^{(e)}(x_A) = \bar{F}^{(i)}(x'_A). \quad (9)$$

В свою очередь действие внутренней силы движения,  $F^{(i)}(x'_A)$  согласно третьего закона Ньютона<sup>7</sup> будет уравновешивать внутренняя сила сопротивления движению  $\Phi_Q^{(i)}(x'_A)$  [9]

$$\bar{F}^{(i)}(x'_A) = -\Phi_Q^{(i)}(x'_A) = -\Phi_{Q,A}^{(i)}. \quad (10)$$

Для определения закона распределения внутренних сил в теле  $m$  выделим (рис. 2, а) на расстоянии  $x'$  от центра массы этого тела элемент  $dm$  на боковые поверхности которого в точках  $b$  и  $a$  согласно (10) будут действовать силы  $-\Phi_Q^{(i)}(x') = F^{(i)}(x') = F^{(e)}(x')$  и  $F^{(e)}(x+dx) = F^{(i)}(x'+dx') = -\Phi_Q^{(i)}(x'+dx')$  (на рис. 2, а условно не показаны). Откуда следует условие равноускоренного движение элемента  $dm$  (рис. 2, а):

$$\begin{cases} d\bar{F}^{(i)}(x') = d\bar{F}^{(e)} = const > 0; \\ d\bar{\Phi}_Q^{(i)}(x') = -d\bar{F}^{(i)}(x') = const < 0. \end{cases} \quad (11)$$

Из (11) с учетом граничных условий (9) получим (эпюра сил на рис. 2, а)

$$\begin{cases} \bar{F}^{(i)}(x') = \frac{\bar{F}^{(e)}}{l} \cdot (\frac{l}{2} + x') > 0; \\ \bar{\Phi}_Q^{(i)}(x') = -\frac{\bar{\Phi}_Q^{(i)}}{l} \cdot x' = -\bar{F}^{(i)}(x') < 0, \end{cases} \quad (12)$$

<sup>7</sup> “Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иными словами, взаимодействия двух тел друг с другом равны между собой и направлены в противоположные стороны” [3].

где  $\bar{\Phi}_Q^{(i)} = -\bar{a}_m \cdot \int_{-0,5l}^{0,5l} \frac{m}{l} \cdot dx^l = -\bar{a}_m \cdot m$  – сила инерции,

внутренняя сила сопротивления движению абсолютно твердого тела  $m$  при его равноускоренном движении, приведенная к центру массы этого тела в системе координат  $X^l O^l Y^l$   $x^l_\phi = \frac{\int_{-0,5l}^{0,5l} \Phi_Q^{(i)}(x^l) \cdot x^l \cdot dx^l}{\Phi_Q^{(i)}} = 0$  (рис. 2, а).

Работа внутренней силы движения при перемещении тела  $m$  на расстояние  $x_{O^l}(t) = \frac{\ddot{x}(\Delta t)t^2}{2}$  за время  $t = \Delta t$  составит

$$A_F^{(i)}(\Delta t) = \int_0^{x_{O^l}(t)} \int_{-0,5l}^{0,5l} F^{(i)}(x^l) \cdot dx^l \cdot dx = F^{(e)} x_{O^l}(t) = A_F^{(e)}(\Delta t) \quad (13)$$

и обеспечивается за счет изменения механической энергии источника  $E_F^{(e)}$  [2]

$$A_F^{(e)}(\Delta t) = -\Delta E_F^{(e)}. \quad (14)$$

В свою очередь работа внутренней силы сопротивления движению  $\Phi_Q^{(i)}$  составит

$$A_{\Phi_Q}^{(i)}(\Delta t) = \int_0^{x_{O^l}(t)} \int_{-0,5l}^{0,5l} \Phi_Q^{(i)}(x^l) \cdot dx^l \cdot dx = -\frac{m \cdot (\Delta v_m)^2}{2} = -A_F^{(e)}(\Delta t) \quad (15)$$

и обеспечивает изменение внутренней механической энергии  $E_m^{(i)}$  тела  $m$

$$A_{\Phi_Q}^{(i)}(\Delta t) = -\Delta E_m^{(i)} = \frac{m \cdot (\Delta v_m)^2}{2}. \quad (16)$$

При этом обеспечивается закон сохранения энергии в процессе равноускоренного движения тела  $m$

$$\Delta E_F^{(e)} + \Delta E_m^{(i)} = 0. \quad (17)$$

Нетрудно получить зависимости для равнозамедленного движения элемента  $dm$  (рис. 2, б):

$$\begin{cases} d\bar{Q}^{(i)}(x^l) = d\bar{Q}^{(e)} = const < 0; \\ d\bar{\Phi}_F^{(i)}(x^l) = -d\bar{Q}^{(i)}(x^l) = const > 0, \end{cases} \quad (18)$$

Уравнения (18) позволяют определить характер (эпюру) распределения внутренних сил при равнозамедленном движении тела  $m$  (рис. 2, б)

$$\begin{cases} \bar{\Phi}_F^{(i)}(x^l) = \frac{\bar{\Phi}_F}{l} \left( \frac{l}{2} + x^l \right) > 0, \\ \bar{Q}^{(i)}(x^l) = -\bar{\Phi}_F^{(i)} < 0 \end{cases} \quad (19)$$

и получить зависимости

$$\begin{cases} A_{\Phi_F}^{(i)}(\Delta t) = \frac{m \cdot (\Delta v_m)^2}{2} > 0; \\ A_{\Phi_Q}^{(i)}(\Delta t) = -A_{\Phi_F}^{(i)}(\Delta t) = -A_Q^{(e)} < 0, \end{cases} \quad (20)$$

которые обеспечивают закон сохранения энергии при этом движении

$$A_{\Phi_F}^{(i)}(\Delta t) = -\Delta E_m^{(i)} = \Delta E_Q^{(e)} = -A_Q^{(e)}. \quad (21)$$

Согласно [2] для потенциальной силы “необходимо, чтобы выражение элементарной работы было полным дифференциалом некоторой скалярной функции...”. Учитывая, что кинетическая энергия тела  $m$  является скалярной функцией, получим:

$$d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = m \cdot \dot{r} \cdot dr = m \cdot \ddot{r} \cdot dr = \begin{cases} \Phi_F^{(i)} \cdot dr = dA_{\Phi_F}^{(i)} > 0 \text{ при } \ddot{r} < 0 \text{ и } dE_m^{(i)} < 0; \\ -\Phi_Q^{(i)} \cdot dr = -dA_{\Phi_Q}^{(i)} < 0 \text{ при } \ddot{r} > 0 \text{ и } dE_m^{(i)} > 0, \end{cases} \quad (22)$$

где  $r = r(x, y, z)$  – радиус-вектор, определяющий положение тела  $m$  (его центр тяжести) в системе координат  $XOYZ$ ;  $dA_{\Phi_F}^{(i)}$  и  $dA_{\Phi_Q}^{(i)}$  – соответственно элементарная работа силы инерции при равнозамедленном и равноускоренном движении тела  $m$ ;  $dE_m^{(i)}$  – элементарное изменение внутренней (кинетической) энергии тела  $m$  в процессе неравномерного движения этого тела.

Из уравнений (10)-(22) и табл. 1 следует, что сила инерции абсолютно твердого тела – это внутренняя потенциальная сила, которая оказывает противодействие внешней силе, обеспечивающей неравномерное движение тела, обладающего инертной массой<sup>8</sup>. Источником энергии силы инерции является кинетическая энергия, которая является внутренней энергией подвижного материального тела, а потенциалом силы инерции является скорость<sup>9</sup> перемещения этого тела.

Для подтверждения этого положения докажем теорему.

Если в каком либо пространстве имеется потенциальная функция  $U(x, y, z)$ , то в этом же пространстве имеется потенциальная функция  $V(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$  и полюс силового поля  $U(x, y, z)$  является полюсом силового поля  $V(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ .

#### ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ТЕОРЕМЫ

Если на подвижное тело действуют потенциальные силы, то согласно закону сохранения механической энергии следует

$$E = \Pi + T = const, \quad (23)$$

где  $\Pi = -U(x, y, z) = -U(r)$  – потенциальная энергия ( $\Pi$ ) силового поля  $U(x, y, z) = U(r)$ , взаимодействующего с

<sup>8</sup> Здесь необходимо отметить, что сила инерции для пластически деформируемого тела не являются потенциальной силой, т. к. не выполняется условие (22) [20].

<sup>9</sup> “Потенциал, зависящий от скорости...был сначала введен (и ошибочно) Вебером в классической электродинамике, где постулируются силы, зависящие от скорости. Немецкий математик Е. Шеринг был видимо первым, кто серьезно пытался ввести такие силы в механику (см. Göt. Abh. 18, 3, 1873). Так, например, в первом издании Уиттекера, Аналитическая динамика, 1904, есть ссылка на потенциал в смысле “потенциальной функции Шеринга”. Однако этот термин, по-видимому, не вошел в употребление, так как в последующих изданиях он был исключен.” [4]. Подчеркнуто мною, т.к. это утверждение автора [4] не является бесспорным.

телом, центр массы  $m$  которого расположен в точке пространства  $U(x, y, z)$ , определяемой радиусом-вектором  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \gg l$  ( $l$  – максимальный линейный размер тела) в декартовой системе координат  $XOYZ$ , центр  $O$  которой расположен в полюсе силового поля  $U(x, y, z)$ ;  
 $T = \frac{m \cdot v^2}{2} = -V(m, \dot{x}(x), \dot{y}(y), \dot{z}(z)) = -V(m, \dot{r}(r))$  – кинетическая энергия тела  $m$  в системе координат  $XOYZ$ .

Следовательно, уравнение (23) может быть представлено в виде

$$E(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) = U(x, y, z) + V(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) = const. \quad (24)$$

Откуда следует

$$dE = \nabla U + \dot{\nabla} V = 0 \quad (25)$$

Из (16,17), (20-22), (25), получим

$$dE = (P_x^{(e)} + \Phi_x) \cdot dx + (P_y^{(e)} + \Phi_y) \cdot dy + (P_z^{(e)} + \Phi_z) \cdot dz = 0, \quad (26)$$

где  $P_x^{(e)} = \frac{\partial U}{\partial x}$ ,  $P_y^{(e)} = \frac{\partial U}{\partial y}$  и  $P_z^{(e)} = \frac{\partial U}{\partial z}$  – проекции на оси координат  $XOYZ$  потенциальной силы  $P^{(e)} = P^{(e)}(m, r) = gradU$ ;  $\Phi_x = \frac{\partial V}{\partial \dot{x}}$ ,  $\Phi_y = \frac{\partial V}{\partial \dot{y}}$  и  $\Phi_z = \frac{\partial V}{\partial \dot{z}}$  – проекции на оси координат  $XOYZ$  силы инерции  $\Phi = \Phi(m, \dot{r}(r)) = gradV$ .

Уравнение (26) при  $dx \neq 0, dy \neq 0$  и  $dz \neq 0$  имеет решение, если

$$gradU = -gradV$$

Следовательно, поля  $U(x, y, z)$  и  $V(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$  имеют один и тот же полюс, что и требовалось доказать.

Из теоремы следует, что потенциалом силы  $P^{(e)}$  является положение точки приложения этой силы к телу  $m$  относительно полюса силового поля  $U(x, y, z)$  (источника энергии силы  $P^{(e)}$ ), а потенциалом силы инерции  $\Phi^{(i)}$  является скорость тела  $m$  относительно источника энергии внешней силы, действующей на это тело.

*Рассмотрим пример.* Тело  $m$  в виде материальной точки, имеющей электрический заряд, движется в электростатическом поле тела  $M \gg m$  (рис. 3). При отсутствии сил сопротивления перемещению телу  $m$  в однородном потенциальном поле тела  $M$  это тело может совершать два вида движений (рис. 3, а и рис. 3, б).

1. Поступательное ускоренное движение тела  $m$  по нормали  $On$  к центру массы тела  $M$ , расположенной в полюсе  $p_s$  линейного силового поля на пересечении осей координат  $OX$  и  $OY$  (рис. 3, а), под действием внутренней силы  $P_{M-m}^{(i)}$  между этими телами. Составляющими этой силы являются силы  $\vec{P}_{Mm}^{(i)}$  и  $\vec{P}_{mM}^{(i)} = -\vec{P}_{Mm}^{(i)}$ , приложенные соответственно к телу  $M$  со стороны тела  $m$  и к телу  $m$  со стороны тела  $M$ . Для каждого из этих тел, согласно приведенной классификации сил, можно принять  $\vec{P}_{Mm}^{(i)} = \vec{P}_M$  и  $\vec{P}_{mM}^{(i)} = \vec{P}_m^{(e)} = \vec{F}_m$ . В этом случае ускорения

тел  $M$  и  $m$  составят:  $\vec{a}_M = \frac{\vec{P}_M}{M} \approx 0$  и можно принять

$$\vec{P}_M = \vec{R}_M; \quad \vec{a}_m = \frac{\vec{F}_m}{m} \quad \text{и} \quad \vec{\Phi}_Q = -\vec{a}_m m = -\vec{F}_m.$$

При перемещении тела  $m$  из точки  $A(r_1)$  в точку  $B(r_2 < r_1)$  сила  $F_m$  совершает работу  $A_F = F_m \cdot (r_1 - r_2) > 0$ . Эта работа приводит к изменению потенциальной энергии тела  $m$  на величину  $\Delta\Pi = F_m \cdot (r_2 - r_1) = -A_F$ . В то же время, при равноускоренном движении тела  $m$  из точки  $A(r_1)$  в точку  $B(r_2 < r_1)$ , скорость этого тела увеличивается на величину  $\Delta v_m = \sqrt{2 \cdot a_m \cdot (r_1 - r_2)}$  и изменение кинетической

энергии тела  $m$  составит  $\Delta T = \frac{m \cdot (\Delta v_m)^2}{2} = F_m \cdot (r_1 - r_2) > 0$ . Такой характер движения тела  $m$  в потенциальном силовом поле обеспечивает условие  $\Delta E = \Delta\Pi + \Delta T = 0$ , (27)

при котором до момента непосредственного контакта тел  $M$  и  $m$  соблюдается закон сохранения механической энергии (23). В момент взаимодействия тел  $M$  и  $m$  механическая энергия или ее часть переходит в другие виды энергии, но этот вопрос в настоящей статье не рассматривается.

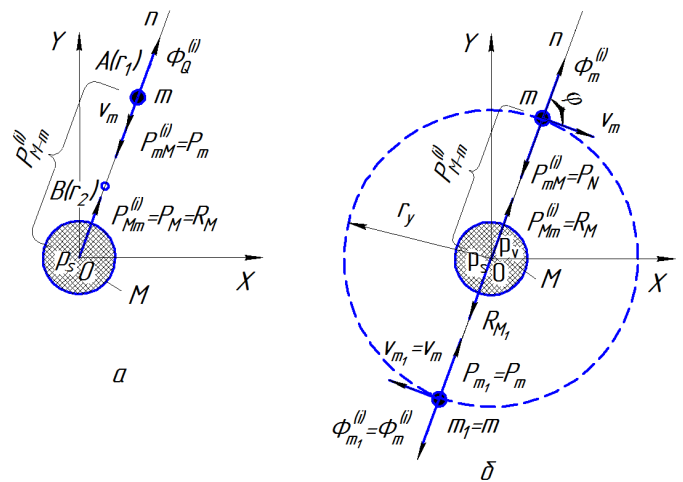


Рис. 3. Энергосиловые параметры движения тела  $m$  без внешнего сопротивления в однородном потенциальном поле: а – поступательное; б – равномерное вращение

2. Движение тела  $m$  (рис. 3, б) по окружности уровня потенциального поля  $U(r)$  с полюсом  $p_s$  и радиусом  $r_y$  является одновременно равномерным движением этого тела со скоростью  $v_m$  по окружности уровня потенциального поля  $V(\dot{r})$  с полюсом  $p_v$ . При этом на тело  $m$  действует сила инерции  $\Phi_m = m \cdot \frac{v_m^2}{r_y}$ , направление линии действия которой составляет угол  $\varphi = 0,5 \cdot \pi$  с направлением скорости движения этого тела. Соответственно работа силы инерции за время  $t$  равна нулю  $A_\Phi = \Phi_m \cdot v_m \cdot t \cdot \cos \varphi = 0$ . Аналогично равна нулю и работа силы  $P_{mM}^{(i)} = P_N$ , которая

уравновешивает силу инерции. В этом случае  $\Delta T = 0$  и  $\Delta E = 0$ . Следовательно,  $\Delta E = 0$  и условие (27) соблюдается, не зависимо от времени движения тела  $m$  в потенциальном поле тела  $M$ . В свою очередь, действие силы  $P_N = -\Phi_m$  определяет величину силы  $P_{Mm}^{(i)} = -P_N$ . Для того, чтобы обеспечить постоянное положение центра массы тела  $M$  в системе координат  $XOY$ , необходимо обеспечить уравновешивание силы  $P_{Mm}^{(i)} = R_M$  силой  $R_{M1} = -R_M$  за счет равномерного вращения тела  $m_1 = m$  со скоростью  $v_{m_1} = v_m$  по окружности радиусом  $r_y$  при диаметрально противоположном расположении этих тел.

#### Выводы

1. Сила инерции абсолютно твердого тела по отношению к этому телу является внутренней потенциальной силой, которая действует при изменении кинетической энергии тела и уравновешивает равнодействующую внешних сил (внешнюю силу), приложенных (ую) к твердому телу в процессе его неравномерного движения.
2. Кинетическая энергия является внутренней механической энергией подвижного тела и обеспечивает работу сил инерции при действии на тело неуравновешенных внешних сил (внешней силы). Потенциалом силы инерции является скорость движения этого тела в текущий момент времени.
3. Каждому потенциальному полю перемещения материального тела соответствует потенциальное поле скоростей. Полюса этих полей расположены в одной и той же точке пространства и силовые функции полей имеют противоположные знаки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Теоретическая механика. Терминология. Буквенные обозначения величин: сборник рекомендуемых терминов. – М.: Наука, 1984. – Вып. 102. – 48 с.
2. Невзглядов В.Г. Теоретическая механика. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959. – 584 с.
3. Исаак Ньютон. Математические начала натуральной философии. Перевод с латинского и примечания А.Н. Крылова. – М.: Наука, 1989. – 688 с.

4. Голдстейн Г. Классическая механика. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1975. – 584 с.
5. Лойцзянский А.Г. Курс теоретической механики. Том второй. Динамика / А.Г. Лойцзянский, А.И. Лурье. – М.: Наука, 1983. – 639 с.
6. Хайкин С.Э. Физические основы механики. – М.: Наука, 1971. – 752 с.
7. Добронравов В.В. Основы аналитической механики. М.: Высшая школа, 1976. – 263 с.
8. Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
9. Кирпичев Л.В. Беседы о механике. – М.-Л.: ГНТИ, 1933. – 368 с.
10. Седов Л.И. Очерки, связанные с основами механики и физики. – М.: Знание, 1983. – 64 с.
11. Боголюбов А.Н. Сергей Николаевич Кожевников (1906-1988) / А.Н. Боголюбов, Е.Я. Антонюк, С.А. Федосова. – М.: Наука, 1998. – 236 с.
12. Колчин Н.И. Теория механизмов и машин / Н.И. Колчин, М.С. Мовнин. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 616 с.
13. Добров И.В. Физические основы процессов внешнего трения при решении задач прикладной механики // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – №7. – С. 3-10.
14. Ломоносов М.В. Избранные произведения. – М.: АН СССР, Ин-т истории естествозн. и техники. – Т.1 – 535 с.
15. Hermann von Helmholtz Über die Erhaltung der Kraft. – Berlin: Druck und Verlag von G. Reimer, 1847.
16. Эйлер Л. Основы динамики точки. Первые главы из “Механики” и из “Теории движения твердых тел”. – М.-Л.: ОНТИ-НКТП-СССР, 1938. – 500 с.
17. Теория механизмов и машин. Терминология. Буквенные обозначения величин: сборник рекомендуемых терминов. – М.: Наука, 1984. – Вып. 99. – 39 с.
18. Даламбер Ж. Динамика. Пер. с франц. – М.-Л.: Гостехтеориздат, 1950. – 343 с.
19. Лагранж Ж. Аналитическая механика. Том. 1. Перевод с франц. В.С. Гохмана. – М.-Л.: ГНТИ, 1950. – 594 с.
20. Добров И.В. Расчетно-аналитический метод определения влияния сил инерции на условия волочения полосы в монолитной клиновой волоке // Машиностроение: сетевой электронный журнал. – 2015. №3, с. 28-32.

## Development of Scientific Bases of the Dynamics of Machines as a Section of Applied Mechanics

Dobrov I.V.

National Metallurgical Academy of Ukraine  
Dnepropetrovsk, Ukraine  
[igordobrov@yahoo.com](mailto:igordobrov@yahoo.com)

**Abstract.** The characteristic of the inertia forces within the classification of forces in solving the problems of the mechanics of machines, based on the simultaneous and unconditional compliance with the laws of Newton and the law of the energy conservation. It is proved that every potential field of movement of a material body corresponds to a potential velocity field, and the poles of these fields are located in the same point in space. For an abso-

lutely rigid body moving with a nonuniform velocity, the inertia force is the internal potential power and potential of the inertia force is the speed of the material body.

**Keywords:** mechanics, applied mechanics, the mechanics of machines, classification of forces, the force of inertia.



# Научно-испытательный комплекс для исследования узлов поддрессоривания транспортных средств

Новиков В.В., Поздеев А.В.

Волгоградский государственный технический  
университет  
г. Волгоград, Российская Федерация  
[nvv\\_60@mail.ru](mailto:nvv_60@mail.ru), [avp24897@mail.ru](mailto:avp24897@mail.ru)

Дьяков А.С.

Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана  
г. Москва, Российская Федерация  
[diakov57@list.ru](mailto:diakov57@list.ru)

**Аннотация.** В Волгоградском государственном техническом университете (Россия) совместно с компаниями BISS-ITW (Индия) и ООО «Испытательные стенды» (Россия) разработан уникальный научно-испытательный сервогидравлический комплекс, предназначенный для исследования различных узлов поддрессоривания транспортных средств с целью определения их упруго-демпфирующих характеристик и виброзащитных свойств. Стендовое оборудование позволяет испытывать как отдельные элементы подвески (гидравлические и газонаполненные амортизаторы, пружины, листовые рессоры, амортизационные стойки, пневматические и пневмогидравлические рессоры, опорные катки и шины, сайлент-блоки), так и блок одноопорной подвески в сборе с поддрессоренной массой, соответствующей реальной нагрузке на колесо. Программа испытаний обеспечивает задание эксплуатационных режимов работы узлов поддрессоривания при кинематическом и силовом воздействии с помощью сервогидравлического оборудования, управляемого специальным программным комплексом. Возможности стенда позволяют получать реальные характеристики элементов испытываемой системы поддрессоривания и комплексное представление об их эффективности в режимах, характерных эксплуатационным условиям работы подвески транспортного средства.

**Ключевые слова:** испытательный стенд, гидропульсатор, программа испытаний, режим нагружения, узлы поддрессоривания, характеристики подвески, эффективность виброзащиты.

## ВВЕДЕНИЕ

Для испытания узлов поддрессоривания транспортных средств и определения их характеристик применяют различные типы специальных и универсальных стендов. На промышленных предприятиях в основном применяют стенды, имеющие узкие функциональные возможности. Они, как правило, предназначены для ресурсных испытаний обычно какого-то одного элемента подвески или блока подвески вместе с колесом. Однако для совершенствования систем поддрессоривания необходимы универсальные многофункциональные стенды, которые позволяли бы испытывать различные типы подвесок и колес в условиях, близких к эксплуатационным режимам нагружения [1-25].

В Волгоградском государственном техническом университете (Россия) совместно с компаниями BISS-ITW (Индия) и ООО «Испытательные стенды» (Россия) разработан уникальный научно-испытательный сервогидравлический комплекс, предназначенный для исследования характеристик и виброзащитных свойств

различных узлов поддрессоривания транспортных средств. Универсальность стендового оборудования заключается в том, что он позволяет испытывать как отдельные упругие и демпфирующие элементы системы поддрессоривания, так и блок одноопорной подвески в сборе, в том числе с колесом. В 2015 году научно-испытательный сервогидравлический комплекс был смонтирован на кафедре автоматических установок Волгоградского государственного технического университета и включен в состав испытательной лаборатории «ИЛ ВолгГТУ».

## УСТРОЙСТВО И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТЕНДА

Основными силовыми элементами стенда являются горизонтальное опорное основание 1, гидропульсатор 2, вертикальная направляющая стойка 3 с подвижной рамой 4 и грузами 5, имитирующими поддрессоренную массу, и лебедка 6 (рис. 1). Кроме того, в состав комплекса входят: насосная станция с радиатором и сервогидроклапанами, стойка блока электронного управления режимами работы стенда и записи регистрируемых параметров.

На стенде можно испытывать гидравлические и газонаполненные амортизаторы, пружины, листовые рессоры, амортизационные стойки, пневматические и пневмогидравлические рессоры, опорные катки и шины, сайлент-блоки, блоки одноопорных подвесок с поддрессоренной массой, соответствующей реальной нагрузке на колесо.

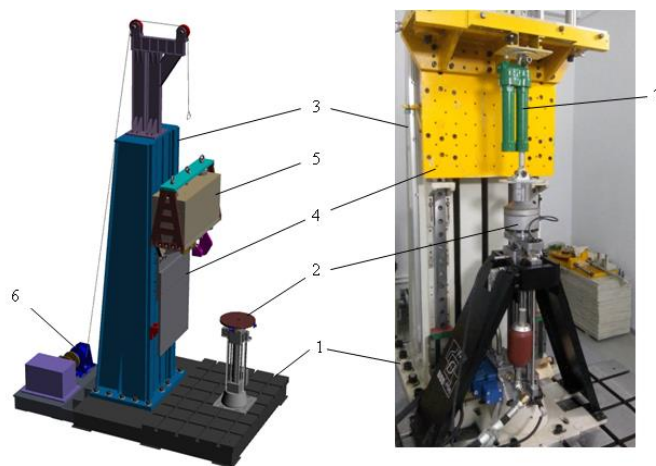


Рис. 1. Схема и общий вид силовой части стенда:  
1 – основание рамы стенда, 2 – гидропульсатор, 3 – направляющая стойка, 4 – подвижная рама, 5 – грузы, 6 – лебедка, 7 – испытываемый узел



Основные параметры и диапазоны научно-испытательного сервогидравлического комплекса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры стенда

№ п/п	Параметр	Значение
1.	Диапазон хода штока гидропульсатора	1,0 мкм–0,5 м
2.	Диапазон скоростей хода штока гидропульсатора	0,001–2,4 м/с
3.	Диапазон частот колебаний штока гидропульсатора	0,0001–50 Гц
4.	Максимальное усилие гидропульсатора:	50 кН
	- на ходе сжатия (при растяжении испытуемого элемента);	
4.	- на ходе растяжения (при сжатии испытуемого элемента)	12 кН
	5.	Максимальный вертикальный размер испытуемого элемента
6.	Основные режимы работы гидропульсатора:	гармонический треугольный прямоугольный случайный
7.	Диапазон подвижных грузов, имитирующих поддрессоренную массу	0,2–2 т
8.	Диапазон вертикального хода подвижного груза	± 0,25 м
9.	Максимальное усилие лебедки	30 кН
10.	Диапазон скоростей движения троса лебедки	0,01–0,1 м/с

Программа испытаний обеспечивает задание различных эксплуатационных режимов работы узлов поддрессоривания при кинематическом и силовом нагружении с помощью сервогидравлического оборудования, управляемого специальным программным комплексом.

Динамические режимы работы стенда обеспечивают:  
 - силовое нагружение испытуемого элемента вибрацией с заданным спектром для определения его рабочих характеристик (в замкнутом контуре);  
 - кинематическое нагружение испытуемого элемента вибрацией с заданным спектром при свободном вертикальном

перемещении подвижных грузов, имитирующих поддрессоренную массу транспортного средства, относительно рамы стенда для определения спектров вынужденных колебаний (в разомкнутом контуре), в том числе проведение и симуляция дорожного теста с препятствиями, воспроизведение дорожного профиля различных уровней;  
 - определение свободно-затухающих колебаний поддрессоренной массы методом подтягивания, сбрасывания или задания гидропульсатором единичного кинематического импульса;  
 - определение силовых характеристик испытуемого элемента при имитации свободного падения на горизонтальное силовое основание с определением контактного силового взаимодействия.

С помощью контрольно-измерительной аппаратуры и датчиков обеспечивается возможность записи абсолютных и относительных вертикальных перемещений (деформаций), скоростей и ускорений поддрессоренной и неподдрессоренной масс подвески транспортного средства и штока гидропульсатора, вертикального усилия в месте крепления испытуемого элемента к штоку гидропульсатора, силы трения, давления и температуры в рабочих полостях и на поверхности испытуемых элементов.

Благодаря многофункциональной системе приспособлений, креплений и отверстий конструкция стенда (рис. 1) является универсальной и модульной, поскольку механическую часть стенда можно достаточно быстро адаптировать под различные конфигурации и геометрию испытуемых блоков и их отдельных элементов.

Примеры установки на стенд пневмогидравлической рессоры высокого давления машины специального назначения, блока пружинной подвески с пневматическим колесом легкового автомобиля, газонаполненного амортизатора приведены на рис. 2.

Примеры записи рабочих диаграмм при испытаниях на стенде различных узлов поддрессоривания в замкнутом силовом контуре показаны на рис. 3.

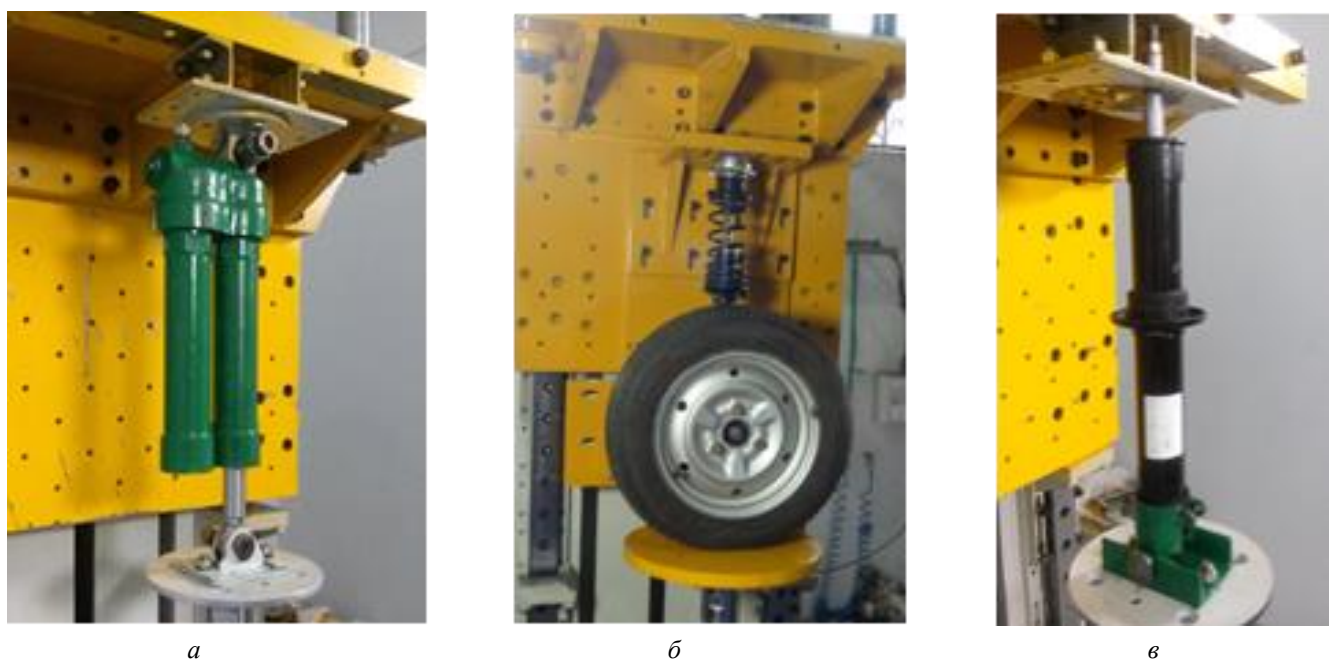


Рис. 2. Примеры установки на стенд пневмогидравлической рессоры высокого давления машины спецназначения (а), блока пружинной подвески с пневматическим колесом легкового автомобиля (б), газонаполненный амортизатор (в)

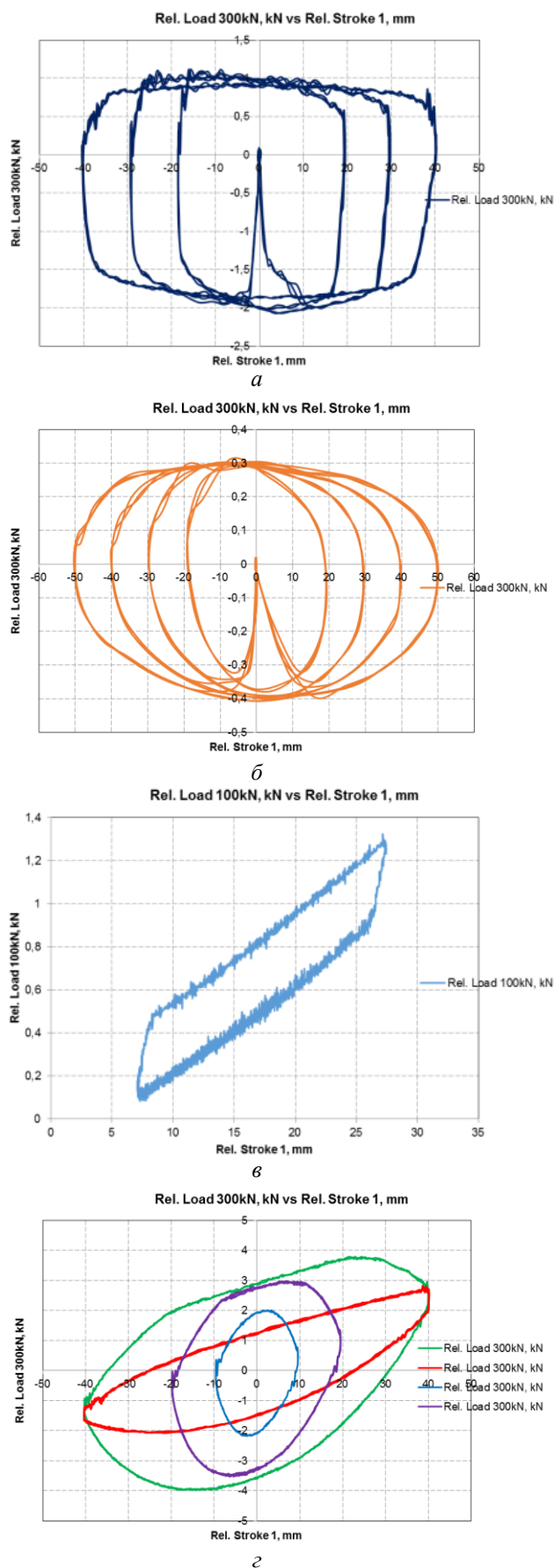


Рис. 3. Примеры записи рабочих диаграмм при испытаниях газонаполненных амортизаторов (а, б), листовой рессоры (в) и пневмогидравлической рессоры (г)

Так на рис. 3 (а, б) представлены серии рабочих диаграмм газонаполненных амортизаторов от автомобилей марок BMW X5 (рис. 3, а) и Hyundai Sonata (рис. 3, б), записанные при использовании функции многошагового программирования.

На рис. 3, в, г показаны одиночные рабочие диаграммы рессор с линейными и нелинейными упругими характеристиками. Рабочая диаграмма на рис. 3, в относится к листовой рессоре, а на рис. 3, г изображены рабочие диаграммы пневмогидравлической рессоры высокого давления (в данном случае давление рессоры 2,0 МПа) при различных амплитудах и частотах колебаний.

Программное обеспечение также как и механическая часть испытательного комплекса имеет ряд особенностей, которые отличают новый стенд от ранее известных аналогов. Первая особенность заключается в возможности управления работой гидроупружителя по каналам силы и перемещения. Вторая особенность состоит в автоматической и ручной тонкой настройке PID-параметров работы высокоскоростного сервоклапана. К третьей особенности можно отнести задание истории нагружения и многошаговое программирование режимов испытаний, которое может состоять из генерации стандартных форм нагружения, так и вводимых оператором профилей нагружения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможности научно-испытательного сервогидравлического комплекса позволяют получать реальные характеристики элементов испытываемой системы поддрессоривания и комплексное представление об их эффективности в режимах, характерных эксплуатационным условиям работы подвески транспортного средства. В результате обеспечивается уменьшение материальных и временных затрат, а также повышается точность получаемых результатов при проверке технического состояния элементов системы поддрессоривания, настройке систем управления ее внутренними характеристиками, разработке новых видов элементов подвесок и алгоритмов регулирования их свойств в зависимости от необходимых режимов работы и задаваемых условий испытаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Носов Н.А. Расчет и конструирование гусеничных машин. – Л.: Машиностроение, 1972. – 560 с.
2. Дербаремдигер А.Д. Гидравлические амортизаторы автомобилей. – М.: Машиностроение, 1979. – 236 с.
3. Певзнер Я.М. Колебания автомобиля. Испытания и исследования. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.
4. Губин В.В. Методы и средства стендовых испытаний подвески тракторов / В.В. Губин, А.О. Куликов, В.П. Шевчук // Динамика колесных и гусеничных машин: межвуз. тем. сб. – Волгоград, 1980. – С. 89-96.
5. Рябов И.М., Котельников В.Н., Колмаков В.И. Стенд для испытания упругих элементов // Авторское свидетельство СССР №1041903. 1983. Бюл. №34.
6. Рябов И.М., Новиков В.В., Колмаков В.И. Стенд для испытания упругих элементов // Авторское свидетельство СССР №1332176. 1987. Бюл. №31.
7. Бурякова М.В. Анализ и классификация известных стендов для испытаний колес и подвесок АТС / М.В. Бурякова, И.М. Рябов, В.В. Новиков, К.В. Чернышов, А.В. Васильев // Актуальные проблемы эксплуатации транспорта: Межвуз. науч. сб. – Саратов, 1998. – С. 78-83.

8. Новиков В.В. Техника эксперимента (при стендовых испытаниях подвесок и колес АТС): учеб. пособ. / В.В. Новиков, И.М. Рябов. – Волгоград, 1999. – 80 с.

9. Рябов И.М., Новиков В.В., Чернышов К.В., Васильев А.В., Бурякова М.В. Стенд для испытания пневматических шин и упругих элементов транспортных средств // Патент России № 2133459. 1999. Бюл. №20.

10. Новиков В.В. Пневмогидравлические рессоры подвесок автотранспортных средств: монография / В.В. Новиков, И.М. Рябов. – Волгоград: РПК "Политехник", 2004. – 311 с.

11. Уруков И.Н. Модернизация стенда для испытания подвески автомобиля / И.Н. Уруков, О.В. Смолянов, В.В. Новиков // Тез. докл. юбилейного смотра-конкурса науч., конструкторских и технол. работ студентов ВолГТУ (Волгоград, 11-13 мая 2005 г.). – Волгоград, 2005. – С. 137-138.

12. Новиков В.В. Установка для испытания подвески автомобиля при кинематическом и силовом возбуждении гармонических колебаний / В.В. Новиков, И.М. Рябов, Е.Н. Лиховцов // Прогресс транспортных средств и систем – 2005: матер. междунар. науч.-практ. конф. (Волгоград, 20-23 сент. 2005 г.). – Волгоград, 2005. – Ч.1. – С. 117.

13. Новиков В. В. Повышение виброзащитных свойств подвесок АТС за счет изменения структуры и характеристик пневмогидравлических рессор и амортизаторов: дис. ... д-ра техн. наук. – Волгоград, 2005. – 448 с.

14. Новиков В.В. Стендовые испытания пневмоподвески автобуса "ВЗТМ-32731" с гидроамортизаторами разной мощности // Грузовик. – 2007. – № 6. – С. 41-44.

15. Новиков В.В. Стендовые испытания пневмоподвески с воздушным демпфером в виде дросселя и обратного клапана // Грузовик. – 2007. – № 7. – С. 43-46.

16. Новиков В.В. Универсальный стенд для испытания подвесок и шин автотранспортных средств / В.В. Новиков, И.М. Рябов, В.И. Колмаков, К.В. Чернышов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – №3. – С. 45-50.

17. Новиков В.В. Виброзащитные свойства подвесок автотранспортных средств: монография / В.В. Новиков, И.М. Рябов, К.В. Чернышов. – Волгоград, 2009. – 338 с.

18. Дьяков А.С. Повышение демпфирующих свойств подвесок АТС путем изменения структуры и характеристик резинокордных пневматических рессор: дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2009. – 162 с.

19. Поздеев А.В. Повышение виброзащитных свойств двухполостных пневматических рессор на основе синтеза оптимальных алгоритмов коммутации полостей: дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2012. – 220 с.

20. Поздеев А.В. Экспериментальные исследования подвесок НТС (Часть 1. Многофункциональный стенд для экспериментальных исследований элементов систем подрессоривания автотранспортных средств): метод. указ. к лаб. работе / А.В. Поздеев, А.С. Дьяков, В.В. Новиков, А.В. Похлебин. – Волгоград, 2012. – 16 с.

21. Исследования двухкамерной пневматической рессоры с коммутацией полостей / Поздеев А.В., Дьяков А.С., Новиков В.В., Рябов И.М. // Грузовик. – 2013. – № 1. – С. 35-37.

22. Новиков В.В. Стенды для испытания подвесок наземных транспортных средств: учеб. пособ. / В.В. Новиков, И.М. Рябов, А.С. Дьяков, А.В. Поздеев, А.В. Похлебин. – Волгоград: ВолГТУ, 2013. – 114 с.

23. Поздеев А.В. 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: ВолГТУ, 2013. – 244 с.

24. Горобцов А.С. Исследование интенсивности нагрева гидроамортизатора / А.С. Горобцов, В.В. Новиков, А.С. Дьяков, В.В. Гетманский, Е.А. Каныгина, А.А. Макаров // Грузовик. – 2014. – №1. – С. 31-32.

25. Дьяков А.С. Экспериментальное исследование характеристик пневмогидравлической рессоры для колесного шасси специального назначения / А.С. Дьяков, В.В. Новиков // Грузовик. – 2015. – №7. – С. 7-11.

## Scientific and Testing Complex for Research of Vehicles Suspension Units

Novikov V.V., Pozdeev A.V.  
Department of Automatic Units  
Volgograd State Technical University  
Volgograd, Russian Federation  
[nvv\\_60@mail.ru](mailto:nvv_60@mail.ru), [avp24897@mail.ru](mailto:avp24897@mail.ru)

Diakov A.S.  
Department of Wheeled Vehicles  
Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russian Federation  
[diakov57@list.ru](mailto:diakov57@list.ru)

**Abstract.** Volgograd State Technical University (Russia) with companies "BISS-ITW" (India) and "Test Rigs" (Russia) developed a unique research and testing servo-hydraulic complex designed for studies of various vehicles suspension units to determine their elastic-damping characteristics and vibration isolation properties. Bench equipment allows to test of individual suspension components (hydraulic and gas-filled shock absorbers, coil springs, leaf springs, shock absorber struts, pneumatic and hydro-pneumatic springs, wheels and tires, bushings) and the single support suspension unit as an assembly with sprung mass corresponding to the real load on the wheel. The test program imple-

mented the setting of operating modes of the suspension units at the kinematic and force influence using servo-hydraulic equipment that is managed by a special software complex. The capabilities of the test rig allow to obtain the real characteristics of the testing suspension system elements and integrated view of their effectiveness in modes which are typical for operating conditions of the vehicles suspension.

**Keywords:** test rig, hydropulser, testing program, loading mode, suspension units, suspension characteristics, efficiency of vibration protection.



# Нестационарные режимы влагоудаления

Ахмедьянова Е.Н., Пташкина-Гирина О.С.

Южно-Уральский государственный аграрный университет  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[Karinlen@mail.ru](mailto:Karinlen@mail.ru), [girina2002@mail.ru](mailto:girina2002@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы использования гранулированных опилок (пеллет). Определены пути повышения энергоэффективности установок сушки пеллет за счет использования нестационарных режимов сушки гранулированных опилок с помощью тепловых агрегатов (насосов).

**Ключевые слова:** пеллеты, пеллетирование, котлоагрегат, рециркуляция, нестационарный (осциллирующий) режим, тепловой насос.

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросы дешевого топлива для отопления малоэтажного строительства, административных и промышленных сооружений являются крайне актуальными для районов, находившихся на значительном удалении от систем газоснабжения. Весьма привлекательным является использование в качестве топлива продуктов переработки отходов древесины – пеллет.

Процесс производства пеллет является весьма энергозатратным. Цикл производства включает в себя следующие стадии: сортировку; измельчение; сушку, прессование и расфасовку. Основные энергозатраты на получение конечного продукта составляют затраты на процесс сушки. Остальные статьи затрат, связанные с измельчением, прессованием, фасовкой и упаковкой, имеют энергозатраты на порядок меньше [7, 8].

## СУШИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВЛАГОУДАЛЕНИЯ

Наиболее часто используемые в производстве сушильные установки выполняются в виде;

- 1) камерные сушильные установки;
- 2) ленточные сушильные установки;
- 3) сушильные установки вихревого типа;
- 4) установки сушки в кипящем слое [9].

В большинстве из вышеперечисленных сушильных установок, исключая камерные установки периодического действия можно улучшить технико-экономические показатели используя системы рециркуляции и нестационарный (осциллирующий) режим сушки [2, 3, 6].

Несмотря на то, что применяемое оборудование разнообразно по физическому принципу, но процесс сушки происходит однообразно, как правило с однократным прохождением сушильного агента. Это приводит к загрязнению окружающей среды, т.к. в атмосферу выбрасываются продукты сушки содержащие не только влагу, но и летучие вещества, кроме того, это не всегда эффективно с экономической точки зрения. В мобильных установках, где производства сушильного агента (топочных газов) осуществляется за счет сжигания до 50 % исходного сырья, является на наш взгляд весьма расточительным. Хорошо описано в литературе системы с частичной или с

полной рециркуляции сушильного агента используется относительно редко. Для сушки гранулированного топлива требуются так называемые «мягкие» режимы. Температура сушильного агента не должна быть выше 140 °С и влажность конечного продукта 12 %. Наиболее эффективными с нашей точки зрения – это сушильные установки с частичной рециркуляцией и регенерации тепла с использованием тепловых труб и теплонасосных агрегатов.

Для реализации предложено использовать следующую схему сушильной установки (рис. 1, 2).

Использование теплообменника на тепловых трубах позволяет передать тепло от отводимого сушильного агента, имеющего температуру 120-135 °С к части циркулирующего газа. Этот вид теплообменника необходим для обеспечения возможности использования фреоновых тепловых насосов, имеющих максимальную температуру нагреваемой среды не выше 120 °С, что связано с особенностью теплоносителя. Таким образом, теплообменник на тепловых трубах должен понизить температуру сушильного агента до 90-100 °С, что делает эффективное функционирование тепловых насосов.

Следующим и наиболее важным фактором в повышении энергоэффективности сушильных установок является уменьшение времени процесса сушки.

В процессе сушки влажных материалов необходимо учитывать не только форму связи влаги с материалом, но и режим сушки. В настоящее время распространены три связи – это химическая, физико-химическая и физико-механическая [1, 2].

Химическая связь – это ионные и молекулярные силы, при сушке опилок ее не удаляют и не учитывают ее содержание, так как химическая связь очень крепка.

Физико-химическая связь опилок делится на:

- а) адсорбционную – это тонкий слой воды в несколько сотен молекул и адсорбирован на активной поверхности опилок, за счет притяжения адсорбционной силы;
- б) осмотическую – это проникающая внутрь клетки влага из-за осмотического давления;
- в) структурная (иммобилизованная) – это влага незначительная, с весьма малой энергией связи, она захвачена с новыми структурными образованиями при формировании геля.

Физико-механическую связь подразделяют на два вида в зависимости от размеров капилляров радиус капилляров больше  $10^{-5}$  см и на радиус капилляров меньше  $10^{-5}$  см [5].

## ВЛАГОУДАЛЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ

В процессе сушки влага будет перемещаться и проходить от внутренних слоев к поверхности опилок, а в дальнейшем испаряться в атмосферу. При анализе процессов сушки используют понятия интенсивности  $I$  и скорости сушки  $N$ . По формуле Дальтона можно определить интен-

сивность испарения жидкости со свободной поверхности при стационарном режиме [2, 6, 9]:

$$I = \frac{W}{F \cdot \tau} = \beta_p(p_n - p_c), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (1)$$

где  $W$  – количество испаренной жидкости, кг;  $F$  – поверхность испарения, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время, с;  $\beta_p$  – коэффициент массоотдачи, отнесенной к разности парциальных давлений, кг влаги/(м<sup>2</sup>·с·Па);  $p_n$  – парциальное давление диффундирующего вещества над жидкой (твердой поверхностью), Па;  $p_c$  – парциальное давление диффундирующего вещества вдали от поверхности раздела фаз, Па.

Можно использовать для приближенных расчетов формулу

$$I = 5,7 \cdot \omega^{0,8}(p_n - p_c), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (2)$$

где  $\omega$  – скорость воздуха, м/с;

Для расчета испаренной жидкости используем следующую формулу

$$I = \beta_c(p_n - p_c), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (3)$$

где  $\beta_c$  – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентрации диффундирующего вещества, м/с;  $p_n$  и  $p_c$  – концентрации диффундирующего вещества на жидкой (твердой) поверхности раздела фаз и вдали от поверхности раздела фаз, кг/м<sup>3</sup>.

В свою очередь коэффициент массоотдачи  $\beta_c$  и  $\beta_p$  свя-

заны соотношением [10]

$$\beta_c = \frac{\beta_p}{R \cdot T} \quad (4)$$

где  $R \approx 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – универсальная газовая постоянная для сухого воздуха, м/с;  $T$  – температура испаренной жидкости, °К;

В свою очередь просматривается следующая зависимость между количеством испаренной жидкости и количеством затраченного тепла:

$$q = I \cdot r = \alpha(t_c - t_n), \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°C}) \quad (5)$$

где  $r$  – удельная теплота испарения, Дж/кг;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Дж/(м<sup>2</sup>·с·°C);  $t_c, t_n$  – температуры окружающей среды и поверхности испарения, °C.

Процессы сушки можно условно разделить на характерные периоды. Период прогрева, период постоянной скорости испарения (для него характерна наибольшая скорость испарения влаги), период падающей скорости сушки.

В период постоянной скорости сушки температура материала постоянна  $dt/d\tau=0$ , скорость диффузии влаги к поверхности равна скорости испарения, тепло, необходимое для испарения влаги, отбирается от окружающего сушильного агента путем теплообмена конвекцией и в ряде случаев излучением. Интенсивность испарения  $I$ , в этом случае, прямо пропорциональна плотности потока

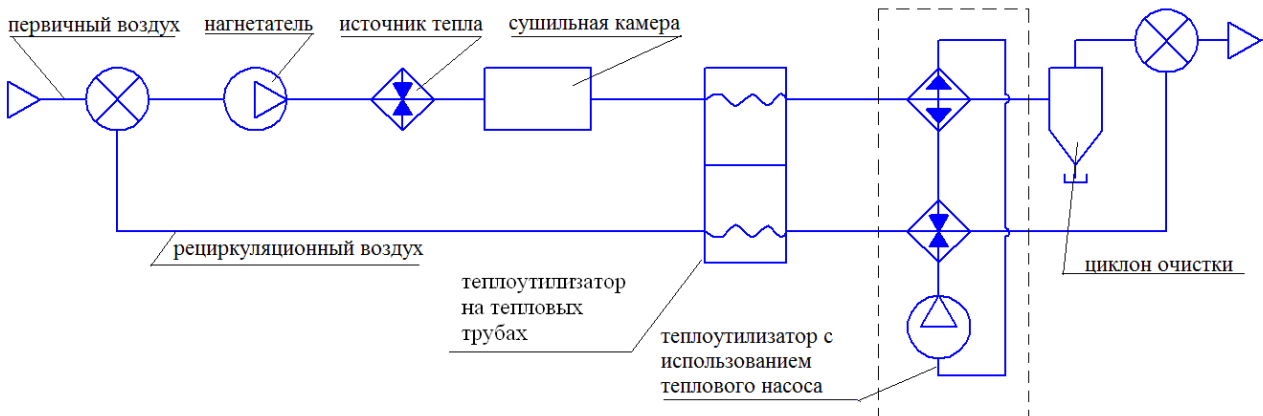


Рис. 1. Комбинированная схема сушильной установки с частичной рециркуляцией

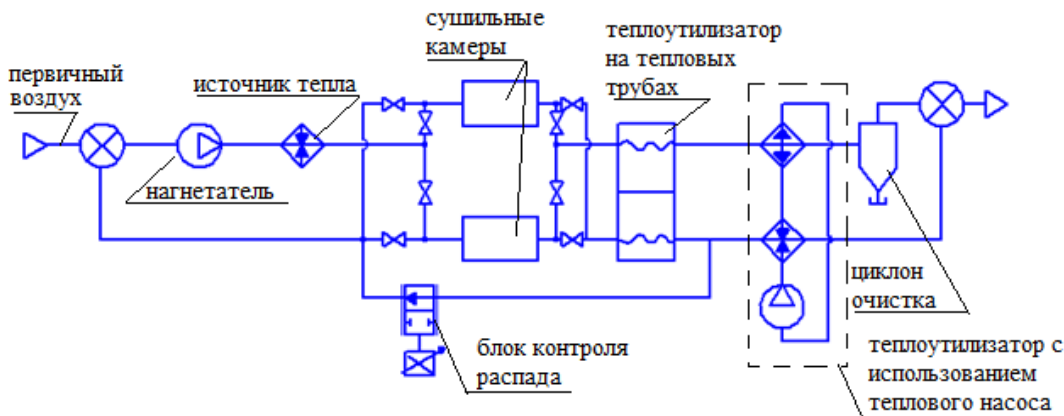


Рис. 2. Схема сушильной установки с частичной рециркуляцией, утилизацией тепла и блоком обеспечивающим нестационарный (осциллирующий) режим



тепла на поверхности тела

$$I_m = \frac{q}{r} = \frac{N}{100} \cdot R_v \frac{\rho}{r} = \left( \frac{d\omega}{dt} \right) \frac{R_v}{100} \cdot \frac{\rho}{r}, \quad (6)$$

де  $N = (dw/dr)$  – скорость сушки в периоде постоянной скорости,  $R_v = V/F$  – отношение объема тела к его поверхности, м;  $\rho$  – плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>.

Закон термовлагопроводности, согласно которому влага в материале перемещается по направлению теплового потока, а газ – в противоположную сторону, был открыт А. В. Лыковым [6]. Так при сушке влага в материале может перемещаться к его поверхности под действием разности ее концентрации, под влиянием термовлагопроводности и под действием градиента избыточного давления (при температуре материала, близкой или большей 100 °С, наблюдается фильтрационный перенос [2]).

В общем виде уравнение переноса массы при сушке материала может быть записано следующим образом:

$$I_m = -a_m \rho_0 \frac{du}{dx} - \delta a_m \rho_0 \frac{dt}{dx} - \alpha_p \rho_0 \frac{dp}{dx} \quad (7)$$

где  $I_m$  – количество жидкости, переместившееся внутри тела в единицу времени через единицу поверхности, кг/(м<sup>2</sup>·ч);  $a_m$  – коэффициент потенциалопроводности (определяется экспериментально для конкретного материала), м<sup>2</sup>/ч;  $u$  – концентрация влаги, кг/кг;  $x$  – координата, м;  $\rho_0$  – плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta$  – термоградиентный коэффициент, 1/°С (определяется экспериментально для конкретного материала);  $\alpha_p$  – коэффициент фильтрационного переноса, м<sup>2</sup>/ч, Н/м<sup>2</sup> (определяется экспериментально для конкретного материала);  $du/dx$ ,  $dt/dx$  и  $dp/dx$  – частные производные, пропорциональные градиентам влажности, температуры и давления.

Ряд исследователей [1,4] отмечают, что при охлаждении материала изменяется величина и направление температурного градиента. Это приводит к тому, что термовлагопроводность будет способствовать движению, влаги от центра к периферии. В этой связи интересны результаты, приведенные в работе [1,3,4]. С целью интенсификации сушки может оказаться целесообразно использовать режим с промежуточным нагревом и охлаждением.

Исследование проводилось методом математического моделирования.

Используемая система уравнений:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \alpha_m \cdot \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \alpha_m \cdot \rho \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon \cdot \frac{r}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (9)$$

Масса удаляемой влаги

$$m_B = -D \cdot \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - D \cdot \delta \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (10)$$

Здесь:  $T$  – температура,  $u$  – влагосодержание,  $x$  – текущая координата  $\alpha$  – температуропроводность,  $a_m$  – коэффициент диффузии,  $r$  – скрытая теплота парообразования,  $\varepsilon$  – критерий испарения  $\varepsilon = 0$  при диффузии влаги и  $\varepsilon = 1$  при диффузии пара,  $\tau$  – время,  $\delta$  – коэффициент термодиффузии  $c$  – теплоёмкость

#### Выводы

В результате математического моделирования можно сказать, что при периодической подаче сушильного агента с неизменной температурой возможно интенсификация процесса. Таким образом, нестационарные режимы сушки могут увеличить интенсивность процесса, а в некоторых случаях и повысить качество получаемого продукта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гамаюнов Н.И., Ильченко Л. И. // Химическая промышленность. – 1979. – № 6, – С. 344-348.
2. Гельперин Н.И. Основы техники псевдоожижения // Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн, В.Б. Кваша. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
3. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
4. Гинзбург А.С. // Химическая промышленность. – 1979. – № 6. – С. 328-330.
5. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое / А.С. Гинзбург, В.А. Резчиков. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 196 с.
6. Лыков А.В. Тепло-массообмен в процессах сушки. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.
7. Кречетов И.В. Сушка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1987. – 440 с.
8. Кречетов И.В. Сушка древесины. – М.: Бриз, 1992. – 449 с.
9. Куталадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Л.: Mashgiz, 1968. – 456 с.
10. Слободкин А.С. Приближенный метод расчета кинетики прогрева влажного материала в кипящем слое при осциллирующем режиме // ИФК. – 1964. – № 3.

## Unsteady Modes of Moisture Removal

Akhmedyanova E.N., Ptashkina-Girina O.S.

South-Ural State Agrarian University

Chelyabinsk, Russian Federation

[Karinlen@mail.ru](mailto:Karinlen@mail.ru), [girina2002@mail.ru](mailto:girina2002@mail.ru)

**Abstract.** The article deals with the peculiarities of using granulated sawdust (pellets), with the ways to improve the efficiency of plants due to unsteady modes of drying granulated sawdust with thermal units (pumps) being determined.

**Keywords:** pellets, pelleting, boiler unit, recycling, unsteady (oscillating) mode, heat pump.

# Сравнительная оценка виброзащитных свойств подвески с различными маховичными динамическими гасителями колебаний кузова автомобиля

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

Волгоградский государственный технический университет

г. Волгоград, Российская Федерация

[avp24897@mail.ru](mailto:avp24897@mail.ru)

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию виброзащитных свойств маховичных динамических гасителей колебаний кузова транспортного средства. Отмечается, что ранее авторами предложены дополнительные маховичные динамические гасители с механическим приводом и доказано, что они повышают виброзащитные свойства системы поддресоривания. Однако такие динамические гасители колебаний имеют большую массу. Поэтому был разработан маховичный динамический гаситель с гидравлическим приводом, содержащим гидроцилиндр и гидравлическую машину с маховиком. В результате теоретического исследования выявлены параметры гидропривода, обеспечивающие минимальные значения амплитуды колебаний поддресоренной массы в области низкочастотного резонанса, и установлено, что маховичный динамический гаситель колебаний с гидравлическим приводом обеспечивает подвеске меньшую массу и более высокие виброзащитные свойства, чем маховичный динамический гаситель с механической передачей.

**Ключевые слова:** динамический гаситель колебаний, маховик, гидравлическая машина, гидроцилиндр, виброзащитные свойства, автомобиль.

## ВВЕДЕНИЕ

В монографии [1], вышедшей в свет в 1976 г. говорится о целесообразности использования динамических гасителей колебаний колес автомобилей в виде дополнительных подпружиненных грузов. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования таких гасителей [2-12] показали их эффективность. Однако для гашения колебаний кузова автомобилей подобные динамические гасители неприменимы вследствие их большой массы. В работах [12-24] предложены и исследованы маховичные динамические гасители колебаний кузова, в которых маховик приводится во вращение механической передачей (рис. 1, а). Для исключения блокировки подвески на высоких частотах в таком приводе используется муфта сцепления с оптимальными параметрами [13-22]. В работах [23, 24] показано, что для уменьшения массы маховика необходимо увеличивать передаточное число механической передачи. Однако при этом увеличивается масса самой передачи, что ограничивает возможности снижения массы гасителя в целом. Поиски путей снижения массы маховичного гасителя колебаний кузова привели к идее использования в качестве привода маховика гидравлической ма-

шины, соединенной трубопроводами с гидравлическим цилиндром (рис. 1, б) [16, 25-30]. Данная статья посвящена сравнительной оценке виброзащитных свойств рассмотренных маховичных динамических гасителей.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Любые гидравлические машины имеют объемные утечки. Если предположить, что объемные утечки рабочей жидкости в гидромашине отсутствуют, то объемная постоянная (объем жидкости, проходящей через гидромашину при одном обороте вала) гидравлической машиной связана с ходом штока поршня в гидроцилиндре зависимостью

$$Q = F_a x_t, \quad (1)$$

где  $F_a$  – площадь поперечного сечения кольцевой полости в гидроцилиндре гасителя колебаний,  $x_t$  – ход штока поршня за один оборот маховика.

Зависимость угла поворота маховика  $\varphi$  от деформации подвески  $x$  можно определить по формуле

$$\varphi = 2\pi \frac{x}{x_t} = 2\pi \cdot F_a \cdot \frac{z-q}{Q}. \quad (2)$$

Введем обозначение коэффициента передачи от деформации подвески к повороту маховика

$$\frac{z-q}{\varphi} = \frac{Q}{2\pi F_a} = b \quad (3)$$

Динамика подвески с гидравлическим маховичным гасителем колебаний без учета утечек выглядит следующим образом:

$$\frac{J}{b} \ddot{\varphi} + m\ddot{z} + k(\dot{z} - \dot{\varphi}) + c(z - q) = 0 \quad (4)$$

или

$$m\ddot{z} + k(\dot{z} - \dot{\varphi}) + c(z - q) + \frac{J}{b^2} (\ddot{z} - \ddot{\varphi}) = 0. \quad (5)$$

Здесь  $J$  и  $\varphi$  – момент инерции и угол поворота маховика;  $m$  и  $z$  – поддресоренная масса и ее перемещение;  $c$  – жесткость упругого элемента;  $k$  – коэффициент сопротивления амортизатора (коэффициент демпфирования);  $q$  – кинематическое возмущение.

Разделим левую и правую часть на  $m$  и получим:

$$\ddot{z} + 2h(\dot{z} - \dot{\varphi}) + \omega_0^2(z - q) + J_{rel}(\ddot{z} - \ddot{\varphi}) = 0. \quad (6)$$

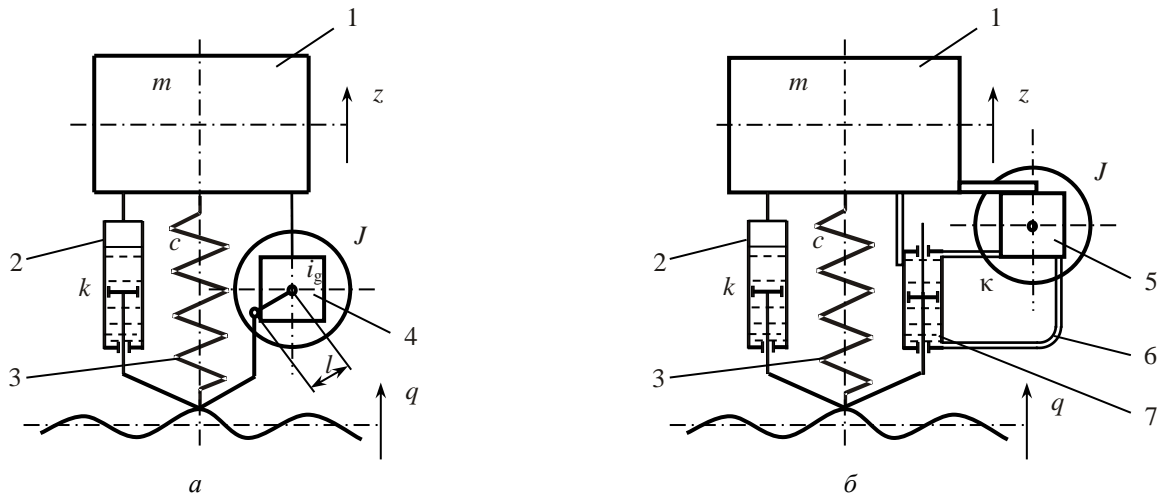


Рис. 1. Схемы подвесок, содержащих маховичные динамические гасители колебаний: *a* – с механической передачей движения маховику, *б* – с гидравлической передачей движения маховику; 1 – подрессоренная масса *m*; 2 – гидравлический амортизатор с коэффициентом сопротивления *k*; 3 – упругий элемент с жесткостью *c*; 4 – механическая передача с передаточным числом  $i_g$ , имеющая на входном звене рычаг длиной *l*, а на выходном звене – маховик с моментом инерции *J*; 5 – гидравлическая машина с маховиком на выходном валу, обладающим моментом инерции *J*; 6 – трубопровод; 7 – цилиндр со штоком-поршнем; *z* – перемещение подрессоренной массы; *q* – кинематическое возмущение

Здесь  $\omega_0^2 = \frac{c}{m};$  (7)

$$2h = \frac{k}{m};$$
 (8)

$$J_{rel} = \frac{J}{mb^2} = \frac{J}{m} \left( \frac{2\pi F_a}{Q} \right)^2.$$
 (9)

Уравнения (4), (5) и (6) по форме совпадают с соответствующими уравнениями подвески с механическим приводом маховика без сдающего звена и имеют одинаковые с ними решения [16]. Так, решение уравнения (6) в виде коэффициента динамичности представляет собой следующее выражение

$$K_z = \frac{z_0}{q_0} = \sqrt{\frac{(1-i^2 J_{rel})^2 + 4\psi^2 i^2}{(1-i^2 - i^2 J_{rel})^2 + 4\psi^2 i^2}}.$$
 (10)

При учете объемных утечек в гидравлической машине математическая модель, описывающая динамику колебательной системы, усложняется. При остановленном маховике в процессе движения штока-поршня в гидравлическом амортизаторе жидкость течет через зазоры в гидравлической машине, образуя гидравлическое сопротивление, которое в линейном виде имеет вид:

$$F_{d.h.}(\dot{x}_{st./fl.}) = \kappa \dot{x}_{st./fl.},$$
 (11)

где  $\dot{x}_{st./fl.}$  – скорость движения штока-поршня в гидроцилиндре при остановленном маховике;  $\kappa$  – коэффициент демпфирования гидропривода.

Блокирование маховика при наличии объемных утечек не приводит к неподвижности колебательную систему. Таким образом, наличие объемных утечек обеспечивает дополнительную степень свободы для колебательной системы. В качестве дополнительной обобщенной координаты можно рассматривать угол поворота маховика  $\varphi$ .

При вращающемся маховике сила гидравлического сопротивления движению штока-поршня в гидроцилиндре зависит от разности между скоростью движения штока-поршня и угловой скоростью вращения маховика:

$$F_{d.h.} = \kappa(\dot{z} - \dot{q} - b\dot{\varphi}).$$
 (12)

Тогда условие равенства сил, действующих на центр подрессоренной массы, и условие равенства моментов на оси маховика образуют систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m\ddot{z} + k(\dot{z} - \dot{q}) + c(z - q) + \kappa(\dot{z} - \dot{q} - b\dot{\varphi}) = 0, \\ J\ddot{\varphi} - \kappa \cdot b(\dot{z} - \dot{q} - b\dot{\varphi}) = 0. \end{cases}$$
 (13)

Второе уравнение системы допускает понижение порядка. Учтя это и выражения (7), (8), (9), а также произведя замену

$$2\chi = \frac{\kappa}{m},$$
 (14)

получим:

$$\begin{cases} (\ddot{z} + 2h(\dot{z} - \dot{q}) + \omega_0^2(z - q) + 2\chi(\dot{z} - \dot{q}) - 2\chi b\dot{\varphi}) = 0, \\ \ddot{\varphi} + \frac{2\chi}{J_{rel}}\dot{\varphi} - \frac{2\chi}{J_{rel}b}(z - q) = 0. \end{cases}$$
 (15)

Коэффициент динамичности системы по отношению к подрессоренной массе равен

$$K_z = \sqrt{\frac{\left[ \frac{2\chi}{J_{rel}}\omega_0^2 - (2h + 2\chi)\omega^2 \right]^2 + \left[ \omega_0^2\omega + 2h\frac{2\chi}{J_{rel}}\omega \right]^2}{\left[ \frac{2\chi}{J_{rel}}\omega_0^2 - (2h + 2\chi + \frac{2\chi}{J_{rel}})\omega^2 \right]^2 + \left[ \omega_0^2\omega + 2h\frac{2\chi}{J_{rel}}\omega - \omega^3 \right]^2}}.$$
 (16)

В относительных параметрах:

$$K_z = \sqrt{\frac{(2\bar{\psi}_{fl} - (2\psi_d + 2\bar{\psi}_{fl}J_{rel})i^2)^2 + (1 + 2\psi_d 2\bar{\psi}_{fl})^2 i^2}{(2\bar{\psi}_{fl} - (2\psi_d + 2\bar{\psi}_{fl}J_{rel} + 2\bar{\psi}_{fl})i^2)^2 + (1 - i^2 + 2\psi_d 2\bar{\psi}_{fl})^2 i^2}}, \quad (17)$$

где

$$\psi_d = \frac{h}{\omega_0}; \quad (18)$$

$$\bar{\psi}_m = \frac{\chi}{J_{rel}\omega_0}; \quad (19)$$

$$i = \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (20)$$

Анализ колебательных систем с маховичным гасителем, имеющим гидравлический привод без утечек (аналог механического привода), показывает, что амплитудно-частотные характеристики этой колебательной системы имеют частоту, при которой амплитуды колебаний объекта виброзащиты (подрессоренной массы) равны нулю. При отклонении от этой частоты в сторону увеличения или уменьшения амплитуды колебаний существенно возрастают. Именно это обстоятельство приводит к необходимости применения в механических приводах редукторов с переменным передаточным числом или введения в привод сдвигующих звеньев, например, муфты сцепления.

Исследуем колебательную систему с гидравлическим приводом маховика на предмет существования инвариантных точек, в которых пересекаются все амплитудно-частотные характеристики системы с различными значениями коэффициента демпфирования гидропривода. При отсутствии демпфирования:

$$K_z = \sqrt{\frac{4\bar{\psi}_{fl}^2(1 - i^2 J_{rel})^2 + i^2}{4\bar{\psi}_{fl}^2(1 - i^2 - i^2 J_{rel})^2 + (1 - i^2)^2 i^2}}. \quad (21)$$

Рассматриваемая система имеет две инвариантные точки:

$$i_{inv1} = \sqrt{\frac{J_{rel} + 1 - \sqrt{J_{rel}^2 + 1}}{J_{rel}}}, \quad i_{inv2} = \sqrt{\frac{J_{rel} + 1 + \sqrt{J_{rel}^2 + 1}}{J_{rel}}}. \quad (22)$$

Коэффициенты в инвариантных точках, соответственно:

$$K_{inv1} = \frac{J_{rel}}{\sqrt{J_{rel}^2 + 1 - 1}}, \quad K_{inv2} = \frac{J_{rel}}{\sqrt{J_{rel}^2 + 1 + 1}} \quad (23)$$

Инвариантные точки разбивают весь диапазон относительных частот на три интервала:  $(0; i_{inv1})$ ,  $(i_{inv1}; i_{inv2})$  и  $(i_{inv2}; \infty)$ . На втором интервале с увеличением демпфирования в гидроприводе амплитуды колебаний подрессоренной массы уменьшаются, а на первом и третьем интервалах – увеличиваются.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 представлены амплитудно-частотные характеристики рассматриваемой системы в сравнении с амплитудно-частотными характеристиками системы без маховичного гасителя и системы с маховичным гасителем, имеющим механический привод.

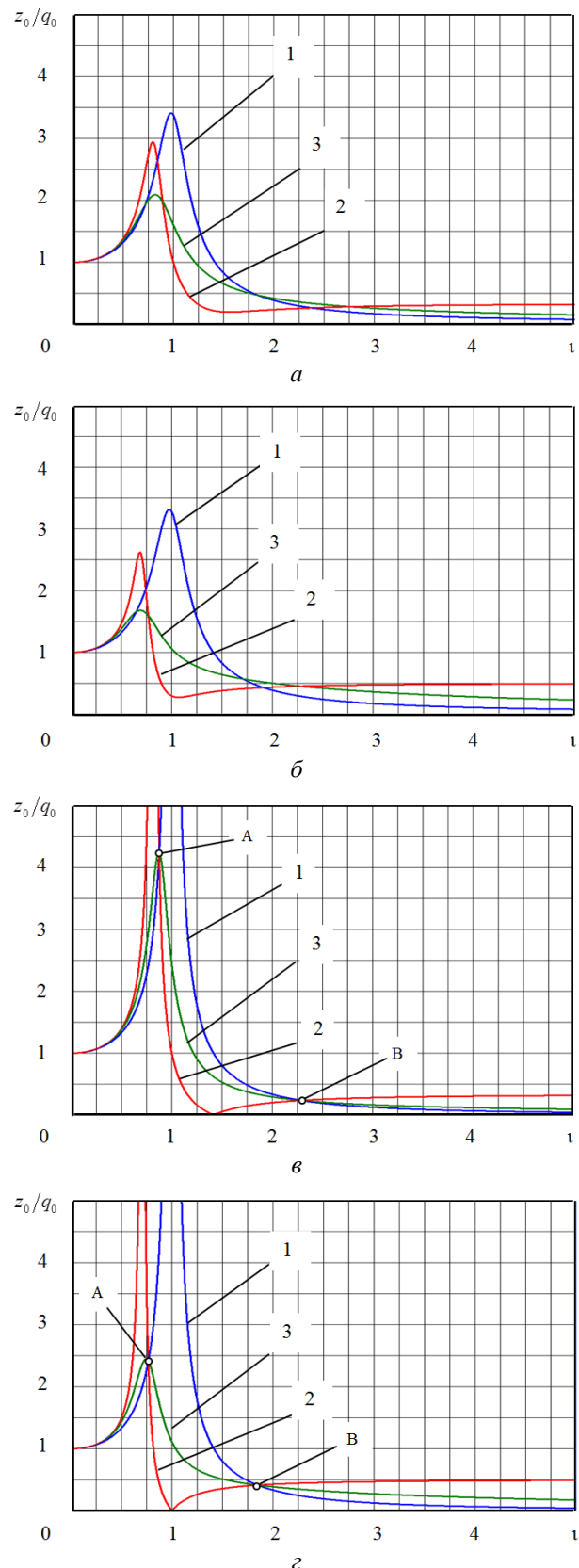


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики колебательной системы при  $\bar{\psi}_{fl} \approx 0,5$ : а – при  $\psi_d = 0,15$ ,  $J_{rel} = 0,5$ ; б – при  $\psi_d = 0,15$ ,  $J_{rel} = 1$ ; в – при  $\psi_d = 0$ ,  $J_{rel} = 0,5$ ; г – при  $\psi_d = 0$ ,  $J_{rel} = 1$  (А, В – инвариантные точки; 1 – без гасителя; 2 – гаситель с механическим приводом; 3 – гаситель с гидроприводом)



Как следует из рис. 2, увеличение относительного момента инерции маховика понижает резонансную частоту колебаний системы и уменьшает амплитуды колебаний в первых двух диапазонах (до второй инвариантной точки) и увеличивает их в третьем диапазоне. Наличие штатного амортизатора также уменьшает амплитуды колебаний в первых двух диапазонах и увеличивает их в третьем диапазоне. Демпфирование в гидроприводе также влияет на амплитуду колебаний подрессоренной массы. На втором диапазоне с увеличением демпфирования в гидроприводе амплитуды колебаний подрессоренной массы уменьшаются, а на первом и третьем диапазонах – увеличиваются. Амплитуда колебаний подрессоренной массы в резонансе зависит от величины демпфирования гидропривода. Минимальное значение этой амплитуды достигается при относительном коэффициенте затухания  $\bar{\psi}_{fl} \approx 0,5$  для параметров  $\psi_d = 0$ , относительном моменте инерции  $J_{rel} = 0,5$ , и при  $\bar{\psi}_{fl} \approx 0,4$  для параметров  $\psi_d = 0, J_{rel} = 0,5$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что маховичный динамический гаситель колебаний с гидравлическим приводом обеспечивает более высокие виброзащитные свойства подвески, чем маховичный динамический гаситель с механической передачей, поскольку обеспечивает меньшие амплитуды колебаний кузова транспортного средства в области низкочастотного резонанса и при высоких частотах возмущения в резонансной области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хачатуров А.А. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / А.А. Хачатуров, Л.В. Афанасьев, В.С. Васильев и др. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
2. Домнин Д.А. Метод улучшения вибродемпфирующих параметров автомобильной подвески путем выбора рациональных параметров динамических гасителей колебаний колес: дисс. ... канд. техн. наук. – М.: 2005. – 128 с.
3. Yoo W.S. Damping Models for Multibody Dynamic Simulation / W.S. Yoo and oth. // Proceedings of the EUROMECH Colloquium 495 “Advances in simulation of multibody system dynamics”. – Bryansk, 2008.
4. Рябов И.М. Потенциальные виброзащитные свойства подвески автомобиля с динамическим гасителем колебаний колёс / И.М. Рябов, К.В. Чернышов, А.М. Ковалев // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 12. – С. 13-16.
5. Рябов И. М. Теоретическое исследование виброзащитных свойств подвески с динамическим гасителем колебаний колёс при движении автомобиля по случайному профилю / И.М. Рябов, К.В. Чернышов, А.М. Ковалев // Изв. ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы»: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2010. – Вып. 3, № 10. – С. 76-80.
6. Чернышов К.В. Влияние изменения демпфирования в динамическом гасителе колебаний колеса на плавность хода автомобиля / К.В. Чернышов, И.М. Рябов, А.М. Ковалев, Т.М. Расулов // Изв. ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы»: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2011. – Вып. 4, № 12. – С. 57-60.
7. Рябов И.М. Выбор параметров динамического гасителя колебаний колеса с учётом изменения жёсткости шины в процессе эксплуатации / И.М. Рябов, К.В. Чернышов, А.М. Ковалев // Грузовик. – 2011. – № 3. – С. 2-5.
8. Гудков В.А. Особенности подвески с динамическими гасителями колебаний колёс / В.А. Гудков, И.М. Рябов, Д.В. Гудков, К.В. Чернышов, А.М. Ковалев // Шина Плюс (Украина). – 2012. – № 3. – С. 8-9.
9. Чернышов К.В. Математическое моделирование колебательной системы с динамическим гасителем / К.В. Чернышов, И.М. Рябов, А.М. Ковалев, Т.М. Расулов // Грузовик. – 2012. – № 10. – С. 14-21.
10. Рябов И.М. Выбор массы динамического гасителя колебаний колеса / И.М. Рябов, А.М. Ковалев, К.В. Чернышов, Т.М. Расулов // Автомобильная промышленность. – 2013. – № 8. – С. 15-17.
11. Рябов И.М. Динамический гаситель вертикальных колебаний колеса автомобиля, интегрированный с конструкцией дискового тормозного механизма / И.М. Рябов, А.М. Ковалев, К.В. Чернышов, Т.М. Расулов // Автомобильная промышленность. – 2015. – № 4. – С. 17-19.
12. Рябов И.М., Новиков В.В. Амортизатор // Патент России № 2142585. 1999.
13. Рябов И.М., Новиков В.В. Амортизатор // Патент России № 2142586. 1999.
14. Новиков В.В. Амортизаторы с рекуперацией энергии в цикле колебаний / В.В. Новиков, И.М. Рябов, К.В. Чернышов, В.В. Воробьев, А.В. Галов // Справочник. Инженерный журнал. – 2001. – №7. – С. 31-34.
15. Инерционные амортизаторы со сдвигим элементом для подвесок АТС / Рябов И.М., Новиков В.В., Воробьев В.В., Данилов С.В., Смолянов О.В. // Грузовик. – 2005. – №4. – С. 9-10.
16. Новиков В.В. Виброзащитные свойства подвесок автотранспортных средств: монография / В.В. Новиков, И.М. Рябов, К.В. Чернышов. – Волгоград, 2009. – 338 с.
17. Рябов И.М. Математическая модель подвески транспортного средства с инерционно-фрикционным амортизатором / И.М. Рябов, К.В. Чернышов, В.В. Воробьев, И.Н. Уруков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 1(21). – С. 29-31.
18. Рябов И.М. Теоретическое исследование и выбор рациональных параметров релаксационной подвески АТС с инерционным элементом / И.М. Рябов, К.В. Чернышов, А.В. Поздеев // Изв. ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы»: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2010. – Вып. 3, № 10. – С. 83-86.
19. Рябов И.М. Математическое моделирование релаксационной подвески АТС с инерционным элементом / И.М. Рябов, К.В. Чернышов, А.В. Поздеев // Изв. ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы»: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2010. – Вып. 3, № 10. – С. 80-82.
20. Рябов И.М. Типы конструкций инерционно-фрикционных амортизаторов, их моделирование и испытания / И.М. Рябов, В.В. Новиков, А.В. Поздеев, К.В. Чернышов, А.С. Митрошенко // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 4. – С. 23-26.
21. Чумаков Д.А. Виброзащитные свойства пневматических рессор с инерционными демпфирующими устройствами / Д.А. Чумаков, А.В. Поздеев, В.И. Карлов // Юби-



лейная XXV международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов МИКМУС-2013: сборник трудов. – М.: Ин-т машиноведения им. А.А.Благодатова РАН, 2013. – С. 381-387.

22. Поздеев А.В. Виброзащитные свойства релаксационной подвески с инерционным демпфирующим устройством / А.В. Поздеев, И.М. Рябов, А.Ю. Соколов, А.С. Митрошенко, Д.А. Чумаков // Известия ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы»: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2014. – Вып. 8, № 3 (130). – С. 30-33.

23. Рябов И.М., Чернышов К.В., Воробьев В.В., Соколов А.Ю. Амортизатор // Патент России № 2313014. 2007.

24. Чернышов К.В. Вывод и анализ закона оптимального регулирования параметров динамического гасителя колебаний в одномассовой колебательной системе при гармоническом возмущении / К.В. Чернышов, И.М. Рябов, А.М. Ковалев, А.В. Поздеев // Известия ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы»: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2013. – Вып. 7, № 21 (124). – С. 47-52.

25. Новиков В.В. Виброзащитные свойства подвески при совместной работе гидравлических и инерционно-фрикционных амортизаторов / В.В. Новиков, О.В. Смолянов // Вестник машиностроения. – 2009. – №1. – С. 81-83.

26. Новиков В.В. Vibrational protection provided by automobile suspensions with both hydraulic and inertial-frictional

shock absorbers / В.В. Новиков, О.В. Смолянов // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29, № 1. – С. 68-70.

27. Новиков В.В. Инерционно-гидравлический амортизатор с гидромотором роliko-лопастного типа / В.В. Новиков, И.М. Рябов, К.В. Чернышов, А.С. Дьяков, А.В. Поздеев, И.А. Голяткин // Прогресс транспортных средств и систем – 2013: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Волгоград, 2013. – С. 78-79.

28. Голяткин И.А. Расчёт инерционно-гидравлического амортизатора с гидромотором роliko-лопастного типа / И.А. Голяткин, В.В. Новиков, А.В. Поздеев // XVIII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области: тез. докл. – Волгоград, 2014. – С. 65-67.

29. Голяткин И.А. Виброзащитные свойства инерционно-гидравлического амортизатора роliko-лопастного типа / И.А. Голяткин, А.В. Поздеев, В.В. Новиков // XIX региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области: тез. докл. – Волгоград, 2015. – С. 80-81.

30. Голяткин И.А. Исследование виброзащитных свойств инерционно-гидравлического амортизатора с роliko-лопастным гидромотором / И.А. Голяткин, А.В. Поздеев, В.В. Новиков // XXVI международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов. МИКМУС-2014: тр. конф. – М.: Ин-т машиноведения им. А.А. Благодатова РАН, 2015. – С. 483-487.

# Comparative Evaluation of the Vibration Isolation Properties of the Suspension with Different Flywheel Dynamical Absorbers of the Car Body Oscillations

Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Pozdееv A.V.

Volgograd State Technical University

VSTU

Volgograd, Russian Federation

[avp24897@mail.ru](mailto:avp24897@mail.ru)

**Abstract.** The article is devoted to the study of the vibration isolation properties of the flywheel dynamical absorber of the vehicle body oscillations. It's noted that the authors have proposed previously additional flywheel dynamical absorbers with mechanical drive and it is proved that they improve the vibration isolation properties of the suspension system. However, such dynamical absorbers are heavy. That's why it's developed a flywheel dynamical absorber with hydraulic drive containing the hydraulic cylinder and hydraulic machine with a flywheel. As a result of the theoretical research it's identified the parameters of

the hydraulic drive, providing the minimum value of the amplitude of the sprung mass oscillations in an area of low-frequency resonance, and it's found that the flywheel dynamical absorber with the hydraulic drive provides to suspension a lower mass and a higher vibration isolation properties than the flywheel dynamical absorber with a mechanical transmission.

**Keywords:** dynamical vibration absorber, flywheel, hydraulic machine, hydraulic cylinder, vibration isolation properties, car.

# Проектирование ракет-носителей с кольцевыми соплами внешнего расширения

Русаков Н.А., Карташев А.Л., Карташева М.А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

г. Челябинск, Российская Федерация

[na\\_rusakov@mail.ru](mailto:na_rusakov@mail.ru), [al\\_kartashev@mail.ru](mailto:al_kartashev@mail.ru), [ma\\_kartasheva@mail.ru](mailto:ma_kartasheva@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы проектирования твердотопливных ракет-носителей с кольцевыми соплами. Использование сопел данного типа наиболее эффективно при проектировании ракет-носителей в условиях заданных габаритных ограничений. Использование кольцевых сопел более эффективно по сравнению с соплами Лавалья.

**Ключевые слова:** кольцевое сопло, твердотопливная ракета-носитель, сопло Лавалья, твердое топливо.

Проектирование является одним из начальных этапов создания современных летательных аппаратов. Непосредственный результат проектирования – проект (латинское *project us* – «брошенный вперед») – должен отражать общий замысел и план создания летательного аппарата, а также конкретные технические решения по его элементам, агрегатам, бортовым системам.

Проектирование – сложный творческий процесс поиска и нахождения решений, обеспечивающий создание технических объектов, комплексов и систем, удовлетворяющих заданным требованиям.

Необходима такая методология проектирования ЛА, при которой в наибольшей степени были бы исключены ошибки проектирования, погрешности недостаточной проработки отдельных узлов, агрегатов и систем, несоответствие целям новой разработки возможностей создаваемого ЛА и обслуживающих наземных и прочих систем при ограниченной продолжительности проектных работ. Безусловно, что таким требованиям может удовлетворить только методология комплексного проектирования ЛА с максимальной автоматизацией проектных работ, применением быстродействующей электронной вычислительной и моделирующей техники. Не менее важна для достижения поставленных целей строгая регламентация последовательности и содержания этапов проектирования, предусмотренная в нашей стране Единой системой конструкторской документации (ЕСКД).

Проектирование ЛА является дисциплиной, обобщающей закономерности проектных разработок баллистических ракет и ракет-носителей. В зависимости от назначения и места доставки полезной нагрузки транспортные летательные аппараты могут быть разделены на следующие классы:

- 1) баллистические ракеты (БР), доставляющие головные части с зарядами в пределах Земного шара;
- 2) ракеты-носители (РН), доставляющие космические аппараты, космические корабли и станции, а также разгонные блоки на околоземные орбиты и при необходимости, возвращающие их на поверхность Земли;
- 3) разгонные блоки (РБ), осуществляющие перевод космических аппаратов, космических кораблей и станций с

низких околоземных орбит на высокие орбиты или на траектории межпланетных перелетов.

Проектирование баллистических ракет является сложным и ответственным этапом их разработки, в процессе которого приходится решать взаимосвязанные задачи по ракете в целом и ее отдельным системам и элементам. Этот процесс предполагает систематизацию и обобщение накопленного опыта ракетостроения и разработку новых методов комплексного анализа ракеты, более полно учитывающих взаимовлияние отдельных технических решений.

Баллистическое проектирование делится на две задачи: прямую и обратную.

Рассмотрим эти задачи:

Прямая задача баллистического проектирования в общем случае формулируется так: при заданных максимальной дальности полета и массе полезной нагрузки  $m_{п.н}$  требуется определить характеристики ракеты, обеспечивающие минимальные затраты средств на поражение типовой цели.

Обратная задача может быть сформулирована следующим образом: при заданных ассигнованиях на создание нового ракетного комплекса и заданной массе полезной нагрузки  $m_{п.н}$  требуется установить параметры ракеты, обеспечивающие поражение цели на максимальной дальности. Часто вместо затрат на создание ракеты рассматривается стартовая масса ракеты  $m_0$  как величина, пропорциональная затратам при определенных допущениях. В ходе решения задач баллистического проектирования выбирают конструктивно-компоновочную схему ракеты, определяют основные характеристики топлива, удельные импульсы ступеней, выбирают проектные параметры, рассчитывают массовые характеристики ракеты, выбирают программу выведения. После баллистического расчета становятся известными тяговые и габаритные параметры ракеты. Проведя аналогичные расчеты для различных проектных параметров, можно найти параметры оптимального варианта ракеты, обеспечивающего либо минимальные затраты средств на поражение типовой цели (прямая задача), либо поражение цели на максимальной дальности (обратная задача).

В статье рассматриваются лишь приближенные методы решения задач баллистического проектирования, которые могут использоваться на стадии технических предложений (предэскизного проектирования).

Достоинствами этих методов по сравнению с точными являются малая трудоёмкость и наглядность.

При приближенном проектировании логическая модель решения задачи упрощается. В число исходных данных включаются  $L_{max}$  и  $m_{п.н}$  (при решении прямой задачи)

Таблица 1

Результаты расчета ракет с соплами Лавала

Характеристика	Топливо №1	Топливо №2	Топливо №3	Топливо №4
$V_k$ , м/с	5735,16	5811,44	5843,29	6206,98
$L$ , км	5337,9	5528,6	5608,23	6827,93

или  $m_0$  и  $m_{n.n}$  (при решении обратной задачи). Выходными данными являются соответственно  $m_{0min}$  и  $L_{max}$ .

В данной статье рассматриваются вопросы выбора оптимальной композиции топлива на примере баллистического расчета ракет-носителей с соплами Лавала и ракет-носителей с кольцевыми соплами внешнего расширения с укороченным центральным телом.

На современном уровне развития химии ракетных топлив выбор их сводится, как правило, к подбору оптимальной композиции из имеющихся компонентов топлива. Существенным при этом являются значения расчетного удельного импульса  $J_{уд}^p$  и плотности топлива  $\rho_T$ . При выборе оптимальной композиции сравнивают для различных топлив произведения  $J_{уд}^p \cdot \rho_T$ , пропорциональные значениям идеальной скорости  $V_{и}$  (скорости Циолковского). Топливо, для которого указанное произведение является максимальным, наиболее эффективно. Показатель ( $c$ ) определяет влияние плотности топлива на идеальную скорость. Для первых ступеней он равен единице, а для верхних – меньше единицы.

Характеристики твердых топлив (взяты из [1]):

Топлива	$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_{cm}$ , °К	$R_{cm}$ , Дж/кг·град	$k_{cm}$	$J_{уд.cm}^p$ , м/с	$u_{Г}(P_k)$ , мм/с
Нитроцеллюлоза – 51,5%; нитроглицерин – 43%; добавки – 5,5%	1622	3060	313	1,21	2400	$4,36 p_k^{0,69}$
Перхлорат аммония – 80%; полибутадиен – 20%	1720	2790	326	1,22	2300	$4,37 p_k^{0,40}$
Перхлорат аммония – 72%; полиэфир – 18%; Al – 10%	1770	3290	300	1,17	2440	$10,12 p_k^{0,12}$
Перхлорат аммония – 68%; полиуретан – 17%; Al – 15%	1800	3300	290	1,16	2460	$5,75 p_k^{0,40}$

При баллистическом расчете ракет-носителей с соплами Лавала получены максимальная дальность полета и конечная скорость, результаты представлены в табл. 1.

Некоторые сведения о кольцевых соплах.

Рассмотрим приближенный способ построения контура сопел с центральным телом. Для упрощения расчета допустим, что расширение потока в сопле происходит, как при плоском течении Прандтля-Майера. Поэтому при расчете расширения потока за кромкой А будем считать применимыми зависимости, полученные для плоского течения.

Расчет сопла с центральным телом с внешним расширением. Считаем, что нам известны топливо, температура  $T_2$  и давление в камере, а также степень расширения. Дозвуковую часть сопла проектируем так, чтобы на кромке сопла в точке А установилась критическая скорость, т.е.  $Ma = 1$ . Тогда ОА – поверхность критической скорости (рис. 1).

Из результатов расчетов видно, что использование кольцевых сопел эффективнее в сравнении с соплами Лавала. Для всех видов топлива показатели конечной скорости и полной дальности увеличились. Наиболее эффективно использование топлива №4 максимальная дальность полета увеличилась на 1242,54 км. ( $\approx 14\%$ ).

Из проведенных расчетов можно сделать вывод, что при проектировании ракет с соплами Лавала главную роль при выборе топлива играет удельный импульс, чем он выше, тем больше будет максимальная дальность полета ракеты, это подтверждается данными полученными по результатам расчетов.

Для кольцевых сопел немало важными факторами топлива являются плотность, температура горения и газовая постоянная, это также подтверждается результатами, для первых двух топлив эти показатели значительно меньше чем для вторых.

Исследование применения различных топливных составов в баллистических ракетах-носителях с кольцевыми соплами показали, что на стадии предэскизного проектирования необходимо проводить проектирование с учетом характеристик данного твердого топлива.

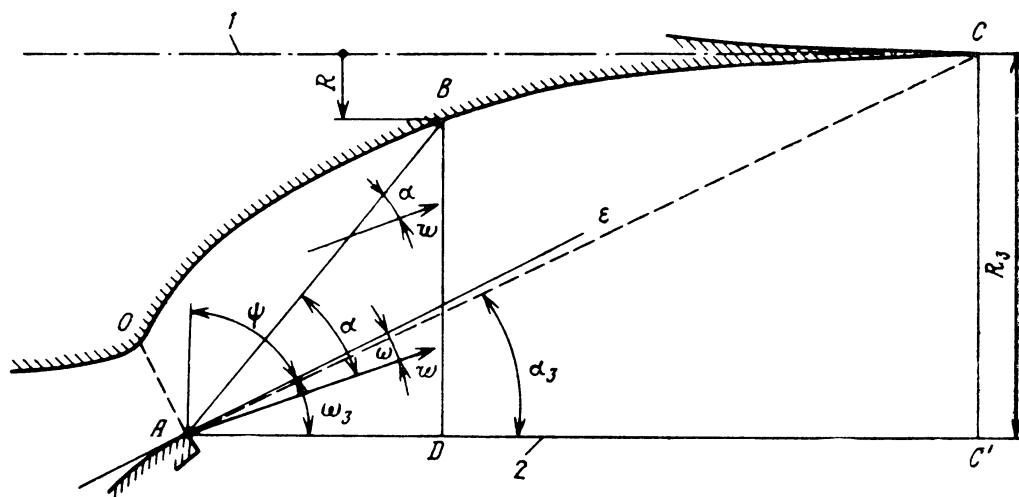


Рис. 1. Расчет контура сопла с центральным телом

Кольцевые сопла внешнего расширения мало изучены применительно к ракетам-носителям, поэтому данная тема вызывает интерес и является актуальной. Но при проектировании ракет-носителей с кольцевыми соплами возникает ряд проблем таких как, возможное увеличение массы ракет-носителей, трудности связанные с выбором топлива и подбора его характеристик. При этом всем, при должном уровне изучения данных проблем можно проектировать ракеты-носители с лучшими летно-техническими характеристиками по сравнению с ракетами с соплами Лавалья, при одинаковых габаритах, что позволит оставить стартовую установку (шахту) без изменений, что в свою очередь позволит существенно сэкономить время на проектировании новых и сократить финансовые издержки при проектировании новых ракет-носителей.

В связи с малой освещённостью проблемы выбора топлива при проектировании ракет-носителей с кольцевыми соплами внешнего расширения с укороченным центральным телом данная тема вызывает особый интерес. Правильный выбор топлива может сэкономить время проектирования на предэскизном проектировании ракет-носителей, в настоящее время существует необходимость более детального изучения кольцевых сопел, так как использование такого вида сопел откроет много новых возможностей для проектантов в улучшении ЛТХ для ракет-носителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Павлюк Ю.С. Баллистическое проектирование ракет: учебное пособие для вузов. – Челябинск: Изд. ЧГТУ, 1996. – 92 с.
2. Ерохин Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ. – М.: Машиностроение, 1991. – 559 с.
2. Павлюк Ю.С. Курсовая работа по проектированию баллистических ракет: учебное пособие / Ю. С. Павлюк, В.Д. Сакулин, П.Н. Усков. – Челябинск: ЮУрГУ, 2008. – 52 с.
3. Пакет прикладных программ расчета энерготяговых параметров / А.Л. Карташев, Е.Н. Волошин, А.А. Глазу-

нов и др. // Инструкция по эксплуатации. СОПОТ. – Миасс-Томск: КБМ, НИИ ПММ, 1989. – 30 с.

4. Карташев А.Л. Методика проектного расчета контура и основных параметров соплового блока / А.Л. Карташев, Н.А. Обухов, В.С. Шишкин и др. // СОПОТ. Научно-технический отчет. – Миасс: КБМ, 1987. – 295 с.

5. Карташев А.Л. Математическое моделирование течений в кольцевых соплах: монография / А.Л. Карташев, М.А. Карташева. – Челябинск: ЮУрГУ, 2011. – 158 с.

6. Пирумов У.Г. Течения газов в соплах / У.Г. Пирумов, Г.С. Росляков. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 396 с.

7. Пирумов У.Г. Газовая динамика сопел / У.Г. Пирумов, Г.С. Росляков. – М.: Наука, 1990. – 368 с.

8. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования. – М.: Машиностроение, 1968. – 398 с.

9. Шишков А.А. Газодинамика пороховых ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1974. – 156 с.

10. Диментова А.А. Таблицы газодинамических функций. Справочное пособие / А.А. Диментова, Ф.С. Рекстин, В.А. Рябов. – Москва: Машиностроение, 1996. – 140 с.

11. Сидельников Р.В. Расчет баллистических параметров траектории ЛА и исследования на ЭВМ: Учебное пособие / Р.В. Сидельников, Д.Ш. Зайнулин. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2003 г. – 46 с.

12. Алемасов В.Е. Теория ракетных двигателей: Учебник для студентов высших технических учебных заведений / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, П.П. Тишин. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.

13. Липанов А.М. Проектирование ракетных двигателей твердого топлива: Учебник для студентов вузов / А.М. Липанов, А.В. Алиев. – М.: Машиностроение, 1995. – 286 с.

14. Тимнат И. Ракетные двигатели на химическом топливе / И. Тимнат; пер. с англ. В.А. Вебера. – М.: Мир, 1990. – 328 с.

15. Баррер М. Ракетные двигатели / М. Баррер, А. Жомотт, Б.Ф. Вебек, Ж. Ванденкеркхове; пер. с англ. Б.И. Колтового. – М.: Оборонгиз, 1962. – 804 с.

## Designing of Solid-Propellant Rockets with Annular Nozzles

Rusakov N.A., Kartashev A.L., Kartasheva M.A.  
South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation

[na\\_rusakov@mail.ru](mailto:na_rusakov@mail.ru), [al\\_kartashev@mail.ru](mailto:al_kartashev@mail.ru), [ma\\_kartasheva@mail.ru](mailto:ma_kartasheva@mail.ru)

**Abstract.** The article considers designing of solid-propellant rockets with annular nozzles. Using a nozzle of this type is most effective when designing rockets the under conditions given dimensional limitations. Using the annular nozzle is more effective than a Laval nozzle.

**Keywords:** annular nozzle, solid fuel, Laval nozzle.



# Расчет и проектирование центробежной фрикционной муфты с клиновым преобразователем усилий

Амбарцумянц Р.В., Дели И.И.

Одесская национальная академия пищевых технологий

г. Одесса, Украина

[robert\\_v@ukr.net](mailto:robert_v@ukr.net), [docentik1985@i.ua](mailto:docentik1985@i.ua)

**Аннотация.** Механические устройства, как правило, состоят из источника движения, передаточного механизма, рабочей машины и соединительных механических муфт. Среди большого разнообразия механических муфт особое место занимают центробежные муфты, в которых передача движения между полумуфтами осуществляется центробежными силами инерции. Применение в машинах таких муфт облегчает их управление, позволяет разгонять механизмы и машины с большим моментом инерции, сохраняя при этом надежность и безопасность работы источника движения (асинхронные электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания и т. п.), повышает плавность пуска машины и др. Особое место среди центробежных муфт занимают муфты с преобразователями инерционных сил. Авторами работы предложены новые, более усовершенствованные конструкции таких муфт и в частности конструкция, принципиальная схема которой предоставлена в этой работе.

Данная работа посвящена проектированию центробежной фрикционной муфты с клиновым преобразователем усилий. Работа состоит из введения, где обоснована задача исследования с целью проектирования муфт. Во второй части составлена физическая модель исследуемого объекта и установлены основные геометрические параметры, подлежащие определению. Третья часть работы посвящена составлению математической модели задачи с учетом изгибной прочности отдельных деталей, износостойкости сопряженных поверхностей, а также массо-инерционных характеристик отдельных частей исследуемого объекта. Предложена также методика определения значения параметров, входящих в математическую модель поставленной задачи.

**Ключевые слова:** муфта, центробежная сила, геометрический параметр, физическая модель, математическая модель, удельное давление, масса, сила трения, центр масс.

## ВВЕДЕНИЕ

Центробежные фрикционные муфты ((ЦФМ) широко применяются в машинах, машинах-автоматах, центрифугах, гомогенизаторах и т.п. обладающих большим моментом инерции. Применение таких муфт предотвращает перегрузки двигателей в момент пуска, уменьшает динамические нагрузки в узлах и деталях машин и тем самым повышает надежность и долговечность их работы.

Наиболее перспективными с точки зрения уменьшения времени разгона рабочей машины являются ЦФМ с преобразователем усилий от центробежных сил. В работе [1] приведены принципиальная схема и методика расчета основных геометрических параметров ЦФМ с рычажным

преобразователем усилий. Однако, на ряду с положительными признаками такой муфты имеется один нежелательный недостаток, а именно сравнительно большие продольные размеры, предопределяемые размерами рычажного преобразователя усилий. Кроме того возникает сложность при сборке и монтаже муфты на месте. Это объясняется тем, что как отдельная сборочная единица, данная конструкция муфты не может реализовываться. Для исключения данных недостатков предложена новая конструкция ЦФМ, защищенная патентом Украины [2].

## ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На рис. 1 представлена полуконструктивная схема такой муфты в двух проекциях. Ведущая полумуфта состоит из входного вала 1 на котором установлены перпендикулярно к продольной оси вала 1 пальцы 5. Ведущий вал одним концом соединяется с валом двигателя, а другим – подвижно с ведущей полумуфтой. На пальцах 5 посажены грузики 2 с числом  $z$ , подпружиненные пружинами сжатия 4. Грузики 2 представляют собой секторы круга (см. рис. 1, б) с центральным углом  $\psi$ . Верхняя часть секторов 2 в поперечном сечении имеет вид трапеции с углом  $2\alpha$  между боковыми поверхностями трения. Пружины 4 установлены для предотвращения произвольного смещения грузов до вала 1 при остановленном источнике движения. Основными геометрическими размерами муфты являются:  $d_a, d_s$  – диаметры валов ведущей и ведомой полумуфты;  $d_{cp}$  – средний диаметр ведомой полумуфты;  $r_1, r_2$  – радиусы определяющие границы наклонной боковой поверхности грузиков;  $v$  – ширина основания трапеции.

Для разработки конструкции такой муфты необходимо знать диаметры  $d_a, d_s$  валов, массу грузиков  $m_z$  и их количество  $z$ , ширину  $v$  основания трапеции, диаметры пальцев  $d_n$ , на которые посажены грузики и высоту  $h_p$ , длину  $h_n$  пальцев без учета посадочной части в вале 1.

В качестве исходных данных должны быть заданы:

- приведенный на вал ведомой полумуфты приведенный момент инерции рабочей машины  $I_n$  ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ );
- время разгона  $t_p$  ведомой полумуфтой (сек.);
- частота вращения  $n_a$  или угловая скорость  $\omega_a$  ведущего вала муфты ( $\text{мин}^{-1}$  или  $\text{с}^{-1}$ ).



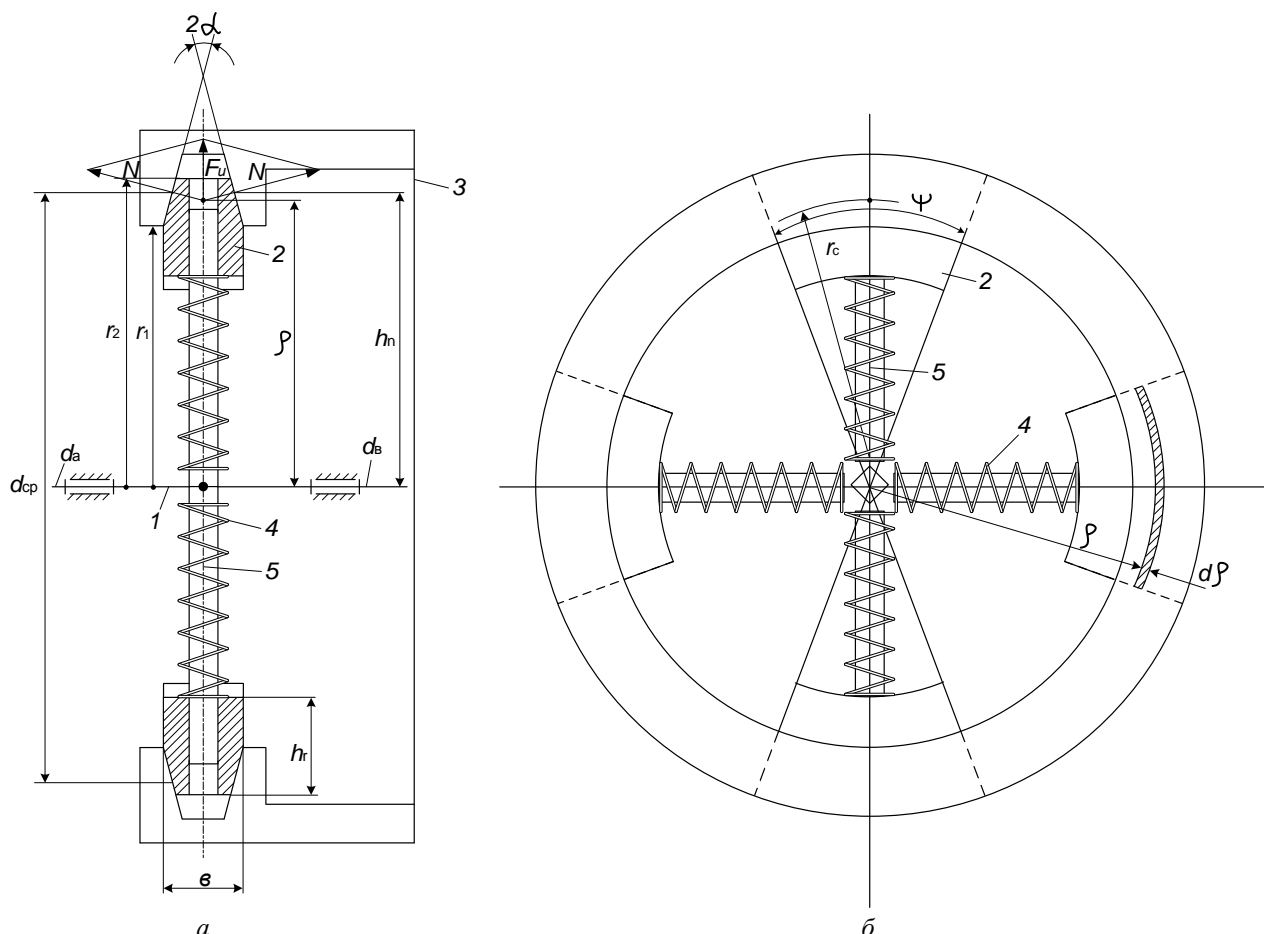


Рис. 1. Центробежная фрикционная муфта с клиновым преобразователем усилий в двух проекциях

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Поскольку в большинстве рабочих машин применяются асинхронные электродвигатели с коротко замкнутым ротором, в которых время пуска скоротечно по сравнению с временем разгона ЦФМ, то можно принять допущение

$$\omega_a = \frac{\pi n_a}{30} = const. \quad (1)$$

Как отмечилось ранее, ЦФМ применяются в машинах с большим моментом инерции вращающихся масс с постоянной угловой скоростью. Переменные моменты инерции, если таковы будут в таких машинах (вспомогательные устройства, позволяющие во время работы изменить значения некоторых кинематических и геометрических параметров), могут привести к переменности момента инерции не больше 1...2 % от общего момента инерции. Поэтому в последующих расчетах также можно принимать

$$I_n = const. \quad (2)$$

Считаем заданным также рабочий момент сопротивления на ведомом валу

$$T_g = T_g(t). \quad (3)$$

Для обеспечения необходимой прочности и износостойкости деталей муфты в дальнейших расчетах принимаем во внимание максимальное значение момента сопротивления

$$T_c = T_{gmax} = const. \quad (4)$$

При принятых допущениях максимальный момент сопротивления на валу ведомой полумуфты определим из выражения:

$$T_{max} = I_n \varepsilon_{max} + T_c, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{max}$  – максимальное значение углового ускорения ведомой полумуфты в период разгона.

Принимая во внимание, что время разгона на ведомой полумуфте на много больше времени разгона асинхронного двигателя, то можно рассмотреть динамику ведомой полумуфты как одномассовую вращающуюся систему с приведенным моментом инерции  $I_n$  и приведенным моментом сил  $M_n = M_{mp} - T_c$ , где  $M_{mp}$  – момент трения между грузиками и ведомой полумуфтой. Для определения момента трения воспользуемся методикой [3].

Находим площадь трения между одним грузиком и ведомой полумуфтой. Выделим на расстоянии  $\rho$  приращение  $d\rho$ . Тогда элементарная площадь  $dA = \psi \rho d\rho$ .

Интеграл данного выражения позволяет получить

$$\begin{aligned} \int_A dA &= \psi \int_{r_1}^{r_2} \rho d\rho = \frac{1}{2} \psi \rho^2 \Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{1}{2} \psi (r_2^2 - r_1^2) = \\ &= 0,5 \psi \frac{d_{cp}}{2} (r_2 - r_1). \end{aligned} \quad (6)$$

Принимая во внимание, что площадь контакта грузиков с ведомой полумуфтой двухсторонняя и наклонена относительно вертикали под углом  $\alpha$ , окончательно запишем

$$A = \frac{\psi(r_2^2 - r_1^2)}{\cos \alpha}. \quad (7)$$

Элементарное нормальное усилие от распределенной нагрузки на поверхности трения

$$dN = qdA, \quad (8)$$

где  $q$  – удельное давление на поверхности контакта.

Принимаем первую версию о постоянстве удельного давления  $q = const$  [3], то интегрируя выражение (8) получим

$$N = \int dN = q \int dA = q \frac{\psi(r_2^2 - r_1^2)}{\cos \alpha}. \quad (9)$$

Центробежная сила инерции, возникающая от массы одного грузика

$$F_u = m_c \omega_a^2 r_c, \quad (10)$$

$r_c$  – радиус центра масс грузика.

Если высота грузика  $h_c$ , то принимаем радиус  $r_c \approx r_2 - \frac{2}{3}h_c$ . Тогда выражение (10) примет вид

$$F_u = m_c \omega_a^2 \left( r_2 - \frac{2}{3}h_c \right).$$

Поскольку была принята вторая версия о распределенной нагрузке [3], то равнодействующую нагрузку от распределенной можно считать действующими в центре поверхности трения. Тогда, как следует из расчетной схемы (см. рис. 1, а)  $2N \sin \alpha = F_u$ . Отсюда

$$N = \frac{F_u}{2 \sin \alpha} = \frac{m_c \omega_a^2 \left( r_2 - \frac{2}{3}h_c \right)}{2 \sin \alpha}. \quad (12)$$

Для обеспечения необходимой износостойкости сопряженных поверхностей должно обеспечиваться неравенство  $q \leq [p]$ , где  $[p]$  – допустимое удельное давление для сопряженных тел [4]. Тогда на основании (9) и (12) получим

$$r_2^2 - r_1^2 \geq \frac{m_c \omega_a^2 \left( r_2 - \frac{2}{3}h_c \right) \operatorname{ctg} \alpha}{2z\psi[p]}. \quad (13)$$

Согласно закону Амонтона-Кулона для силы трения в клиновом ползуне получим

$$F_{mp} = 2fN = \frac{2fm_c \omega_a^2 \left( r_2 - \frac{2}{3}h_c \right)}{2 \sin \alpha}. \quad (14)$$

Силы трения создают на валу ведомой полумуфты вращающий момент

$$T_{mp} = zF_{mp} \frac{d_{cp}}{2} = \frac{zfm_c \omega_a^2 \left( r_2 - \frac{2}{3}h_c \right) d_{cp}}{\sin \alpha}. \quad (15)$$

Для обеспечения разгона полумуфты должно обеспечиваться неравенство

$$T_{mp} \geq T_{max}. \quad (16)$$

Следовательно, чтобы обеспечить необходимую прочность деталей рассматриваемой конструкции муфты все расчеты необходимо вести по максимальному значению момента трения.

Из выражения (5) следует, что для дальнейших расчетов требуется иметь значение максимального ускорения ведомой полумуфты при разгоне. Пружины сжатия можно проектировать исходя из условия равновесия сил тяжести грузиков таким образом, чтобы в момент пуска двигателя грузики почти не соприкасались бы с поверхностью клинового паза. Это позволит исключить возникновение жесткого удара в момент пуска и считать, что коэффициент трения покоя не появляется. В таком предположении можно считать, что угловая скорость ведомой полумуфты возрастает равномерно до достижения значения  $\omega_a$  и ее угловое ускорение можно определить выражением

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} = \frac{\omega_a}{t_p}. \quad (17)$$

Принимая во внимание неравенство (15) запишем

$$fz(r_1 + r_2)m_c \omega_a^2 \left( r_2 - \frac{2}{3}h_c \right) = I_n \frac{\omega_a}{t_p} + T_c. \quad (18)$$

Максимальное значение момента трения позволяет по известной нам методике [3] находить диаметры  $d_a$  и  $d_\theta$ . Пальцы, на которых установлены грузики, работают на деформацию изгиба. Диаметры грузиков определяем рассматривая их как консольную балку длиной

$$h_n \approx \frac{d_{cp}}{2} = \frac{r_1 + r_2}{2}. \text{ Имеем [5]}$$

$$\sigma_u = \frac{M_{uz}}{W_p} = \frac{2F_{mp}h_n}{\pi d_n^3 / 32} \leq [\sigma_u]. \quad (19)$$

На основании выражения (13) запишем

$$(r_2 - r_1) \frac{d_{cp}}{2} \geq \frac{m_c \omega_a^2 \left( r_2 - \frac{2}{3}h_c \right) \operatorname{ctg} \alpha}{2z\psi[p]}.$$

Отсюда, переходя на равенство, получим

$$d_{cp} = \frac{m_c \omega_a^2 \left( r_2 - \frac{2}{3}h_c \right) \operatorname{ctg} \alpha}{z\psi[p](r_2 - r_1)} \quad (20)$$

Выражение (18) с учетом (14) примет вид

$$\frac{32fm_c \omega_a^2 \left( r_2 - \frac{2}{3}h_c \right) [p] \cos \alpha}{\pi d_n^3 \psi (r_2 - r_1)} \leq [\sigma_u] \quad (21)$$

Таким образом для нахождения параметров, позволяющих конструировать ЦФМ с клиновым преобразователем усилий можно использовать систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{fzd_{cp}m_c \omega_a^2 \left( r_2 - \frac{2}{3}h_c \right)}{\sin \alpha} &= I_n \frac{\omega_a}{t_p} + T_c \\ \frac{32fm_c \omega_a^2 \left( r_2 - \frac{2}{3}h_c \right) [p] \cos \alpha}{\pi d_n^3 \psi (r_2 - r_1)} &\leq [\sigma_u] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Обозначим:  $\lambda = r_2/r_1$ , тогда  $d_{cp} = (1 + \lambda)r_1$  и выражение (20) примет вид

$$r_1^2 = \frac{2m_z \omega_a^2 (r_2 - \frac{2}{3}h_z)}{z\psi(\lambda^2 - 1)[p]} \operatorname{ctg} \alpha. \quad (23)$$

Как правило числом грузиков  $z$  можно задаваться. Тогда значением  $\psi \leq 2\pi/z$  можно задаваться по неравенству (22), так чтобы при сборке в нижнем крайнем положении секторов максимальный момент объединенных грузов обеспечивал неравенство  $d_{сек} \leq 2r_1$ . (рис. 2).

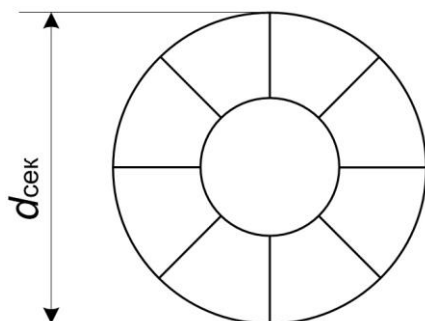


Рис. 2. Сектор в крайнем нижнем положении

Удельное давление для выбранных материалов является известной величиной. Значением  $\lambda$  задаемся в границах  $1,1 \leq \lambda \leq 1,35$ , а значением угла  $\alpha$  из условия исключая заклинивание тогда из (22) получим

$$r_1 = \sqrt{\frac{2m_z \omega_a^2 (r_2 - \frac{2}{3}h_z)}{z\psi(\lambda^2 - 1)[p]} \operatorname{ctg} \alpha}. \quad (24)$$

Соответственно

$$\left. \begin{aligned} d_{cp} &= (1 + \lambda)r \\ r_2 &= \lambda r_1 \end{aligned} \right\}. \quad (25)$$

В системе уравнений (21) остаются пять неизвестных величин:  $z, m_z, d_n, h_z, \psi$ . Исходя из конструктивных соображений, значением  $h_z$  следует задаваться согласно неравенству

$$h_z \geq r_2 - r_1 = r_1(\lambda - 1) \quad (26)$$

Тогда из первого уравнения системы (21) находим

$$m_z \frac{2(I_n \frac{\omega_a}{t_p} + T_c) \sin \alpha}{fz(1 + \lambda)r_1 \omega_a^2 (\lambda r_1 - \frac{2}{3}h_z)} = \frac{6(I_n \omega_a + T_c t_p) \sin \alpha}{fz(1 + \lambda)r_1 \omega_a^2 (3\lambda r_1 - 2h_z)} \quad (27)$$

Из второго уравнения системы (21) получим

$$\frac{32 f m_z \omega_a^2 (\lambda r_1 - \frac{2}{3}h_z) [p] \cos \alpha}{\pi d_n^3 \psi (\lambda - 1)} \leq [\sigma_u]$$

Отсюда

$$d_n \geq \sqrt[3]{\frac{32 f m_z \omega_a^2 (3\lambda r_1 - 2h_z) [p] \cos \alpha}{3\pi \psi (\lambda - 1) [\sigma_u]}}. \quad (28)$$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении можно сказать, что расчет ЦФМ с преобразователем усилий позволит спроектировать и изготовить такую конструкцию. Муфта, изображенная на рис.1 по конструкции, сборке и установке более упрощена по сравнению с другими ЦФМ с преобразователем усилий. Из теоретических расчетов видно, что функциональность и работоспособность муфты позволит повысить надежность и долговечность работы машин.

#### ПРИМЕР РАСЧЕТА

Задаемся исходными данными с конструктивной точки зрения:

$$I_n = 0,5 \text{ кгм}^2; t_p = 10 \text{ с}; n_a = 1000 \text{ об/мин}; T_c = 5 \text{ Нм};$$

$$\alpha = 15^\circ; \lambda = 1,2; f = 0,15; r_1 = 0,05 \text{ м}; [p] = 4 \text{ Мпа};$$

$$[\sigma] = 160 \text{ Мпа}; z = 4; h_z = 20 \text{ мм}.$$

Находим массу грузика по выражению (27)

$$\begin{aligned} m_z &= \frac{6(I_n \omega_a + T_c t_p) \sin \alpha}{fz(1 + \lambda)r_1 \omega_a^2 (3\lambda r_1 - 2h_z)} = \\ &= \frac{6(0,5 \cdot 104,7 + 5 \cdot 10) 0,2588}{0,15 \cdot 4(1 + 1,2) 0,05 \cdot 104,7^2 (3 \cdot 1,2 \cdot 0,05 - 2 \cdot 0,02)} = \\ &= 0,235 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Находим диаметр пальца по которому передвигается грузик за счет силы инерции по выражению (28)

$$\begin{aligned} d_n &\geq \sqrt[3]{\frac{32 f m_z \omega_a^2 (3\lambda r_1 - 2h_z) [p] \cos \alpha}{3\pi \psi (\lambda - 1) [\sigma_u]}} = \\ &\sqrt[3]{\frac{32 \cdot 0,15 \cdot 0,235 \cdot 104,7^2 \cdot}{3 \cdot 3,14 \cdot}} \\ &\sqrt[3]{\frac{(3 \cdot 1,2 \cdot 0,05 - 2 \cdot 0,02) 4 \cdot 0,9659}{\cdot 0,785(1,2 - 1) 160}} = \\ &= 3,1 \text{ мм} \end{aligned}$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Амбаруцмянц Р.В. Расчет основных геометрических размеров центробежной фрикционной муфты с преобразователем усилий / Р.В. Амбаруцмянц, И.И. Дели // Науковий журнал ВІСНИК Хмельницького національного університету. – 2012. – № 6. – С. 25-28.
2. Амбаруцмянц Р.В., Делі І.І. Відцентрова фрикційна муфта // Патент на корисну модель № 86699МПК. 2014. Бюл. №1.
3. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин: Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1969. – 84 с.
4. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебное пособие для вузов. Издательство третье. М.: Машиностроение, 1975. – 655 с.
5. Федосьев В.И. Сопротивление материалов. –М.: Гл. ред. Физико-математическое литературное издание Наука, 1970. – 544 с.

# Designing of a Centrifugal Friction Coupling with a Force Transformer

Ambartsumyants R.V., Deli I.I.

Odessa National Academy of Food Technologies

Odessa, Ukraine

[robert\\_v@ukr.net](mailto:robert_v@ukr.net), [docentik1985@i.ua](mailto:docentik1985@i.ua)

*Abstract.* Mechanical devices, as a rule, consist of the source of motion, transmission gear, working machine and connecting mechanical couplings. Among the large variety of mechanical couplings the special place is occupied by centrifugal couplings in that the transmission of motion between semi-couplings comes through by centrifugal forces of inertia. Application in the machines of such couplings facilitates their operation, allows to disperse mechanisms and machines with the large moment of inertia, saving reliability and safety of work of source of motion (asynchronous electric gears, combustion engines and so on) here, promotes the smoothness of starting of machine and other. The special place among centrifugal couplings is occupied by couplings with the transformers of inertia forces. The new, more improved constructions of these couplings are offered by the authors of this work and in particular the fundamental chart of the construction that is given in this work as well. The given work is devoted to planning of centrifugal friction coupling with the wedge transformer of efforts. The work consists of introduction,

where the general research task with the purpose of planning of coupling. In the second part the physical model of the prospected object is made and basic geometrical parameters, that are subjected to determination, are set. The third part of the work is devoted to drafting of mathematical model of task taking into account bending resistance of separate details, wearproofness of the attended surfaces, and also mass-inertial descriptions of separate parts of the studied object. Methodology of determination of value of the parameters included in a mathematical model of the set problem is offered as well.

*Keywords:* coupling, centrifugal force, geometrical parameter, physical model, mathematical model, specific pressure, mass, force of friction, barycenter.



# Термовакuumное нанесение прозрачных проводящих слоев на полупроводниковые электрод-инструменты для электрохимической обработки изделий машиностроения

Глебов В.В.

Донской государственный технический университет  
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация  
[glebovdon@mail.ru](mailto:glebovdon@mail.ru)

**Аннотация.** Работа представляет новый процесс для электрохимической гравюры металла без потребности в трафарете и фотолитографии. Исследованы особенности нанесения электропроводящих пленок на полупроводниковые электрод-инструменты для электрохимической обработки. Получены аналитические уравнения для определения необходимой толщины пленки. Рассмотрена методика нанесения пленок термическим испарением на вакуумной установке ВУП-4. Исследована технология проектирования и создания фотоактивного электрод-инструмента на основе структуры Cu/Si. Электрические и оптические свойства тонкой полупроводниковой пластины были также исследованы. Проанализированы результаты электрохимической обработки электрод-инструментами с различной толщиной электропроводящей пленки. В результате проведенных исследований получены теоретическое обоснование и метод изготовления, экспериментальные результаты и область применения полупроводникового электрод-инструмента для электрохимической обработки изделий машиностроения.

**Ключевые слова:** электрохимическая обработка, термовакuumное нанесение, полупроводники, прозрачные пленки, электрод-инструмент, электрохимическое маркирование

## ВВЕДЕНИЕ

Электрохимическая обработка (ЭХО) является одним из нетрадиционных методов обработки, основанном на анодном травлении и позволяющим достигнуть требуемой формы поверхности деталей из различных металлов, в том числе из высокопрочных, закаленных и жаропрочных сталей. ЭХО необходима для развития разнообразных отраслей промышленности, таких как машиностроение, аэрокосмическая, автомобильная, электронная и др. [1-5]

Кроме формообразования, отделка поверхности также играет важную роль для функциональных свойств деталей, таких как износостойкость, фрикционные свойства и др. Технология гравировочных процессов различными методами и для различных целей непрерывно совершенствуется [6-7]. Обрабатываемые процессы могут быть классифицированы согласно типу используемой в процессе энергии, в частности: механические, химические, электрохимические, электрические и лазерные процессы. В установках электроэрозионной обработки (ЭЭО) электрическая энергия переходит в тепловую энергию в плазменном канале во время искрового разряда. За счет тепловой энергии происходит плавление и испарение материала обрабатываемой детали.

[1, 8] Высокая температура также генерирует тепловое напряжение в обрабатываемой детали. Лазерная поверхностная обработка приводит к гомогенизации и обработке микроструктур, изменения в химическом составе, и преобразовании различных фаз [9-10].

При ЭХО нет никакого механического контакта с деталью, поэтому на поверхности детали не возникают механические или тепловые напряжения. Твердость металла практически не влияет на удельный съем материала, и ЭИ почти не изнашивается.

Электрохимическое маркирование (ЭХМ) является одним из эффективных методов маркирования токопроводящих поверхностей [11-12]. ЭХМ является также хорошим способом оценить способность листового металла к формованию. Для этого необходимо знать величину и распределение деформации в критических областях тиснения. ЭХМ сетки на поверхности идеально подходят для этой цели [13-14].

Типичные применяемые установки ЭХМ используют сплошной электрод-инструмент (ЭИ) и трафарет с отверстиями в виде маркируемого рисунка, при этом между ЭИ и маркируемой деталью нет протока электролита, процесс осуществляется только за счет смачивания электролитом пористой прокладкой. Это накладывает ограничения на глубину маркирования. Кроме того, такие трафареты позволяют нанести ограниченное число маркировок, требуют для печати специальных материалов и принтеров, либо применения фотолитографических методов. Реализовать преимущества ЭХМ в полной мере позволяют такие установки, в которых толщина межэлектродного зазора (МЭЗ) минимальна, одинакова по всей поверхности и обеспечивает условия для равномерного протекания электролита [15].

В фотоэлектрохимической ячейке для электрохимической размерной обработки (ЭХРО) один из электродов выполнен из полупроводникового материала, на который проецируется световое изображение. В зависимости от полярности прикладываемого напряжения, материала электродов, конструкции электрохимической ячейки и используемого электролита, изображение может формироваться вследствие гальванического осаждения ионов, анодного растворения электрода или в объеме электролита (фотоэлектрохромный эффект) [7, 16-18]. Удельная проводимость полупроводника на несколько порядков меньше, чем у металлов и электролитов, поэтому в планарных оптоэлектронных устройствах необходимо обес-

печить условия для равномерного токоподвода по всей площади поглотительной поверхности. Для этого на поверхность полупроводника наносят тонкий слой металлов или электропроводящих оксидов металлов. При выборе проводящего прозрачного покрытия для контакта с полупроводниковым материалом необходимо учитывать оптические и электрические параметры этой плёнки, а также свойства контакта плёнка – полупроводник [19-21].

Основная цель проведенного исследования состояла в том, чтобы развить новые технологические процессы, приводящие к очень эффективным оптическим покрытиям пластины полупроводника для применения в электрохимической гравюре и маркировке.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Очевидно, что увеличение толщины напыляемой пленки, с одной стороны, приводит к уменьшению поверхностного электрического сопротивления пленки, но, с другой стороны, приводит и к уменьшению прозрачности пленки. В [21] для определения необходимой толщины пленки предлагают использовать интегральный фактор критерия  $Q$ , определяемый как отношение нормализованного среднего коэффициента пропускания к нормализованному удельному сопротивлению. Однако, такая оптимизация, по нашему мнению, оправдана для солнечных элементов, светоизлучающих элементов, жидкокристаллических ячеек дисплеев и т.д., где необходимо добиваться интегральной эффективности фотоэлектрического преобразования всего элемента. В случае ЭИ для ЭХРО, в первую очередь, необходимо стремиться к эквипотенциальности поверхности, поскольку коэффициент пропускания, даже если и уменьшится, все равно будет однородным по всей поверхности. Уменьшение прозрачности покрытия для актиничного излучения, на которое приходится максимум спектральной фоточувствительности полупроводника, можно компенсировать за счет увеличения интенсивности освещения. Кроме этого, при правильном выборе толщины покрытия можно уменьшить потери света при отражении от поверхности полупроводника. Коэффициент отражения  $A$  определяется формулой Френеля:

$$A = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2, \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления.

Необходимо использовать сквозную нумерацию формул, теорем, лемм, следствий, определений и др.

Для кремния в диапазоне видимого света среднее значение  $n = 3.9$ , расчет по формуле (1) показывает, что потери света на отражение достигают 35%. Если волны, отражённые от внешней и внутренней поверхности тонкой плёнки находятся в противофазе, то в результате интерференции эти две волны взаимно ослабляются.

Наибольшее ослабление произойдет при равенстве амплитуд этих волн, которое происходит при условии  $n_0 = \sqrt{n}$ , где  $n_0$  – показатель преломления плёнки.

Дисперсия света в полупроводниках не позволяет полностью решить задачу устранения отражения. При выборе толщины просветляющей пленки исходят из того, чтобы уменьшить отражение тех волн, на которые приходится

максимальная спектральная фоточувствительность. Для диоксида олова, который часто используется в оптоэлектронных приборах [17, 21, 22],  $n_o$  в красном свете примерно равен 2, поэтому при толщине покрытия  $d$ , удовлетворяющей условию  $n_o d = \lambda/4$  удастся достичь значительного ослабления отражения. Соответствующий расчет для  $\lambda = 0,9$  мкм даёт значение  $d = 0,1$  мкм. Таким образом, толщина покрытия  $\text{SnO}_2$  должна быть кратной величине 0,1 мкм.

Для металлических плёнок всё обстоит сложнее из-за сильного поглощения света. Для затухающей волны интенсивность прошедшего света  $P$  на глубине  $d$  определяется по закону Бугера

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda} n \chi d\right), \quad (2)$$

где  $P_0$  – интенсивность падающей волны;  $\chi$  – коэффициент поглощения.

Например, при  $n\chi = 1$  в металле на пути, численно равном длине волны, интенсивность падающей волны уменьшается примерно в  $10^5$  раз. Для меди  $n = 0,62$ , а величина  $n\chi = 2,57$ , для алюминия  $n = 1,44$  и  $n\chi = 5,23$ . Оценим глубину проникновения излучения в медной плёнке для длины волны  $\lambda = 0,9$  мкм. Расчёт по формуле (2) даёт значение  $d \approx 0,028$  мкм = 28 нм. Поэтому металлические прозрачные плёнки в оптоэлектронных приборах имеют толщину порядка 10 нм, и не могут выполнять антиотражающие функции. Более того, учитывая, что сами плёнки обладают значительным коэффициентом отражения света, их дополнительно покрывают просветляющей диэлектрической плёнкой. Это антиотражающее покрытие одновременно выполняет защитные антикоррозионные функции.

Определим зависимость электрических параметров тонкой плёнки от её толщины. Для полупроводниковых планарных ЭИ появляется специфическая погрешность обработки, связанная с падением напряжения в плёнке проводника при удалении от токоподвода. При этом нарушается эквипотенциальность поверхности, что приводит к появлению градиента плотности тока в местах одинаковой освещённости. Оценим эту погрешность.

Рассмотрим полупроводниковую пластину толщиной  $d$  с радиусом поверхности  $r_1$  на которую нанесена тонкая плёнка толщиной  $h$  (рис. 1).

Токоподвод осуществляется по периметру плёнки (не показан). На пластину проецируется световое пятно с радиусом  $r_o$ . Из соображений симметрии очевидно, что максимальное падение напряжения будет в случае, если световой зонд попадает в центр пластины.

Для определения сопротивления плёнки выделим часть сектора, ограниченную углом  $d\varphi$  и окружностями с радиусами  $r$  и  $r+dr$ . Сопротивление этого участка сектора будет равно

$$dR(d\varphi, dr) = \frac{\rho dr}{rhd\varphi}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление плёнки.

Для сопротивления всего сектора, ограниченного  $d\varphi$  получим

$$dR(d\varphi) = \int_{r_0}^{r_1} \frac{\rho dr}{rhd\varphi} = \frac{\rho}{hd\varphi} \ln \frac{r_1}{r_0}, \quad (4)$$

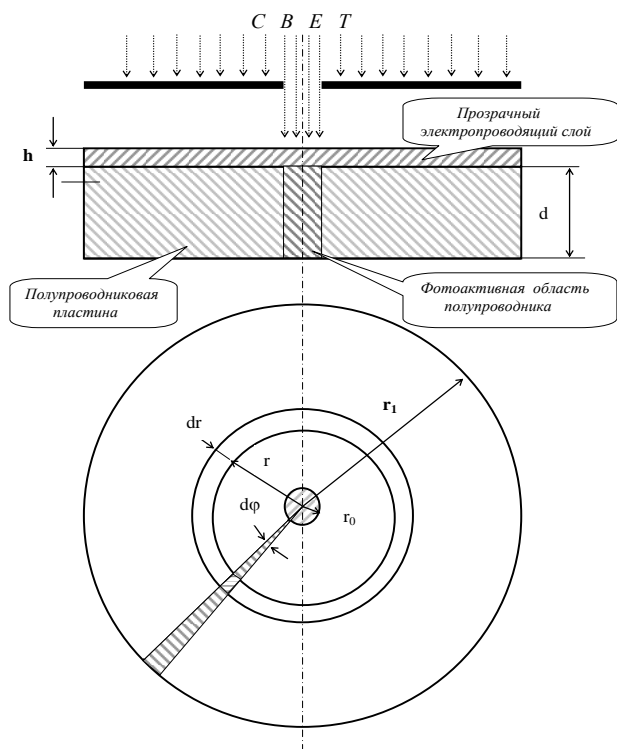


Рис. 1. Расчётная схема определения падения напряжения в проводящей прозрачной плёнке

Так как сектора соединены "параллельно", то для полного сопротивления плёнки на участке от токоподвода до светового пятна получим

$$\frac{I}{R} = \int_0^{2\pi} \frac{hd\varphi}{\rho \ln \frac{r_1}{r_0}} = \frac{2\pi h}{\rho \ln \frac{r_1}{r_0}},$$

отсюда

$$R = \frac{\rho \ln \frac{r_1}{r_0}}{2\pi h}, \quad (5)$$

Для оценки общего сопротивления тонкой плёнки и освещённого участка полупроводника получим

$$R_{\text{эк}} = \frac{\rho \ln \frac{r_1}{r_0}}{2\pi h} + \frac{\rho_{\text{тм}} d}{\pi r_0^2}, \quad (6)$$

где  $\rho_{\text{тм}}$  – удельное сопротивление полупроводника при освещении (световое удельное сопротивление).

Для падения напряжения в полупроводниковом электроде  $\Delta U$  получим

$$\Delta U = j\pi r_0^2 R_{\text{общ}} = j \left[ \frac{\rho r_0^2 \ln \frac{r_1}{r_0}}{2h} + \rho_{\text{ф}} d \right], \quad (7)$$

Отсюда видно, что максимальное падение напряжения  $\Delta U$  будет при условии

$$r_0 = \frac{r_1}{\exp 0,5} \approx 0,607 r_1, \quad (8)$$

при таком размере светового пятна будет максимальная погрешность обработки, обусловленная градиентом напряжения на поверхности плёнки. Относительная величина этой погрешности  $\varepsilon$  определяется выражением

$$\varepsilon \approx 0,092 \frac{\rho r_1^2}{\rho_{\text{ф}} h d}, \quad (9)$$

и это необходимо учитывать при определении толщины покрытия.

Так как генерация носителей заряда в полупроводнике при поглощении актиничного излучения убывает экспоненциально, то под величиной  $\rho_{\text{тм}}$  следует понимать её среднюю величину по толщине пластины. Для практических оценочных расчётов необходимо экспериментально определить зондовым методом величину  $\rho_{\text{ф}}$  для выбранной величины освещённости. С относительно хорошей точностью она равна

$$\rho_{\text{ф}} = \rho_0 \frac{I_{\text{темн}}}{I_{\text{ф}}},$$

где  $\rho_0$  – удельное темновое сопротивление полупроводника;  $\frac{I_{\text{темн}}}{I_{\text{ф}}}$  – отношение темнового тока к фототоку при

используемом напряжении (т.е. в области насыщения фототока).

Проведём оценку допустимой толщины медной плёнки, исходя из значения  $\varepsilon = 0,1$ . Типичные параметры полупроводниковых пластин в наших экспериментах были следующие:  $r_1 = 3$  см;  $d = 0,38$  мм;  $\frac{I_{\text{темн}}}{I_{\text{ф}}} = 180$ . Соответ-

ствующий расчёт по формуле (3) даёт значение  $h = 10$  нм.

Таким образом, с учётом оценочного характера проведённых расчётов, можно полагать, что для получения удовлетворительных результатов ЭХРО толщина металлической плёнки не должна превышать 10...20 нм.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для нанесения плёнки использовался метод термического напыления металла на вакуумной установке ВУП-4, которая позволяет регулировать толщину напыляемого слоя с помощью индикатора напыления, расположенного на пульте управления. Схема расположения датчика индикатора толщины в вакуумной камере и его основные элементы показаны на рис. 2. Метод измерения основан на пропорциональной зависимости между толщиной плёнки на контрольном стекле  $b$  и коэффициентом её оптического пропускания. Измерительная цепь индикатора собрана по мостовой схеме, в одно из плеч которой включен фоторезистор СФ2-1 (на основе сульфида кадмия). Перед началом напыления переменным резистором мостовой схемы устанавливалась необходимая толщина напыления. Измерительный прибор включен в цепь эмиттерных нагрузок согласующего балансного усилителя постоянного тока, который является второй диагональю моста. В процессе напыления световой поток через контрольное стекло уменьшается, сопротивление фоторезистора увеличивается, мост разбалансируется, и при отклонении стрелки измерительного прибора на величину, пропорциональную толщине напыляемого слоя, происходит замыкание цепи испарителя и процесс прекращается.

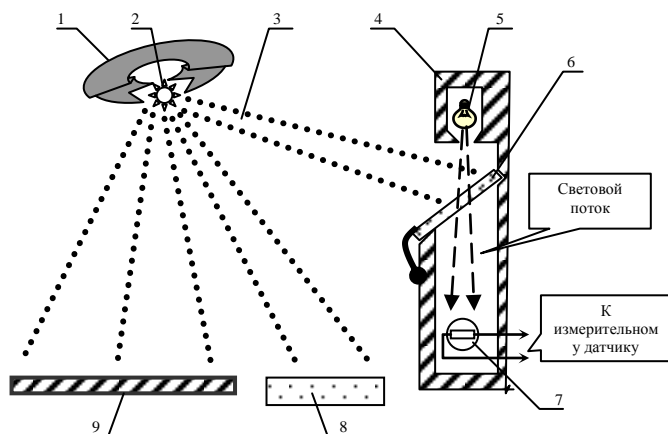


Рис. 2. Схема расположения датчика индикатора толщины, полупроводниковой пластины и «свидетеля» в вакуумной камере: 1 – нагревательное устройство; 2 – испаряемое вещество; 3 – поток испаряемых частиц; 4 – корпус измерительного датчика напыления; 5 – источник света; 6 – стеклянная пластина; 7 – фоторезистор

Градуировка индикатора напыления проводилась отдельно для каждого распыляемого вещества, вида испарителя и соответствующей геометрии распыления. В условиях изотропного испарения аналитический расчет толщины пленки  $h$  проводился по формуле

$$h = \frac{\Delta m \sin \Theta}{\gamma 4\pi R^2}, \quad (10)$$

где  $\Delta m$  – общий вес испаряемого вещества;  $\Theta$  – угол падения потока испаряющихся частиц на напыляемую поверхность;  $\gamma$  – плотность напыляемого материала;  $R$  – расстояние от испарителя до напыляемой поверхности.

Необходимо отметить, что толщина напыляемого слоя на стеклянной пластине 6 (рис. 2) не равна толщине напыляемого слоя на полупроводниковой подложке 7. Эти толщины пропорциональны, причем коэффициент пропорциональности зависит от геометрии облучения, а именно от расстояния соответствующих поверхностей до испаряемого материала и от углов наклона соответствующих поверхностей к потоку испаряемых частиц. Ещё более сложная зависимость между коэффициентами оптического пропускания соответствующих слоёв.

Учитывая это, для более точного измерения оптического пропускания и поверхностного сопротивления плёнки на полупроводниковой пластине в процессе напыления рядом с ней помещали «свидетеля» 8 (контрольную стеклянную подложку, рис. 3). «Свидетель» (рис. 3) представлял собой стеклянную пластину 1 с размещёнными на ней контактными площадками 2. Ширина контактных полосок  $b$  равна расстоянию между контактами 1. В этом случае сопротивление между контактными площадками  $R_{\square}$  равно удельному поверхностному сопротивлению (или сопротивлению на квадрат). При этом сопротивление  $R_{\square}$  осаждаемой тонкой плёнки 3 зависит только от толщины плёнки:

$$R_{\square} = \frac{\rho l}{bh} = \frac{\rho}{h},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление плёнки.

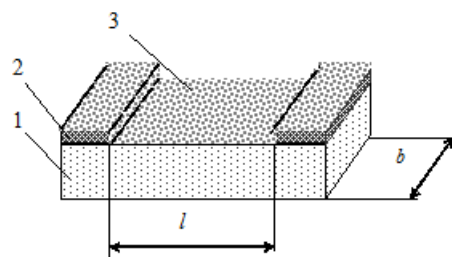


Рис. 3. «Свидетель» для электрооптических измерений: 1 – стеклянная пластина; 2 – контактная площадка; 3 – электропроводящая плёнка

В общем случае удельное сопротивление  $\rho$  не равно нормальному (табличному) удельному сопротивлению материала и зависит от условий формирования плёнки, поэтому погрешность измеряемой толщины этим методом невелика и составляет более 10 %. Наличие «свидетеля» в наших экспериментах позволяло определять коэффициент оптического пропускания плёнки и её поверхностное сопротивление. Для более точного определения толщины напыляемой пленки на лабораторных весах ВЛДП-100 г с ценой деления 0,05 мг определялась масса напыляемого вещества  $\Delta m$  на полупроводниковую пластину. Толщина пленки  $h$  определялась по формуле

$$h = \frac{\Delta m}{S\gamma},$$

где  $S$  – площадь поверхности пластины;  $\gamma$  – плотность напыляемого вещества.

Этой формулой можно пользоваться в том случае, если размеры напыляемой поверхности много меньше, чем расстояние от нагревателя до этой поверхности. В наших экспериментах радиус пластины  $r$  (без учёта площадки для токоподвода шириной 0,5 см) составлял 3,3 см, расстояние  $R$  до испарителя – 30 см (рисунок 3). Относительная неравномерность  $\varepsilon$  толщины напыляемой плёнки в центре и по краям пластины, определяемая по формуле (4), равна

$$\varepsilon = 1 - \frac{R^3}{(R^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (11)$$

Расчет по этой формуле дает значение относительной неравномерности толщины пленки меньше чем 2%, и эта погрешность меньше погрешности, обусловленной градиентом напряжения по поверхности полупроводника (10 %, формула (3)).

В таблице представлены расчётные значения толщины плёнки по результатам измерения массы осаждённой меди на кремниевые пластины диаметром 76 мм. При расчётах использовалось значение плотности «твёрдой» меди  $\gamma = 8,93 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Таблица

Расчёт толщины плёнки  $h$  по результатам измерения массы осаждённой меди  $\Delta m$  на кремниевые пластины диаметром 76 мм

$\Delta m$ , мг	0,25	0,40	0,75	1,05	1,55	2,55	3,05
$h$ , нм	6	10	19	26	38	63	75



График для определения толщины напыляемой плёнки  $h$  по показаниям  $N$  индикаторного прибора для рассматриваемого эксперимента показан на рис. 4. Аналогичные кривые строились для каждого напыляемого вещества отдельно. Для напыления использовались металлы марки ЧДА из Al, Cu, Ag, Ni, Cr и проводящие оксиды SnO<sub>2</sub>, CdO.



Рис. 4. График для определения толщины напыляемой плёнки  $h$  по показаниям  $N$  индикаторного прибора

Схема электрохимической ячейки для изучения технологических возможностей ЭИ на основе монокристаллического кремния с различными токопроводящими покрытиями представлена на рис. 5.

Для определения разрешающей способности ЭХРО через фотошаблон 6 градируемое изображение (мира) проецировалось на прозрачный проводящий слой 5, подключенный к отрицательному полюсу ИП. Положительный полюс ИП подсоединялся к обрабатываемой детали 1. Через зазор, образованный диэлектрическими прокладками 2, пропускался электролит. Распределение тока на рабочей поверхности полупроводника 3 определяется освещенностью соответствующих участков его нерабочей поверхности. Необходимое рабочее напряжение между электродами определялось на основании вольтамперных характеристик из условия насыщения фототока.

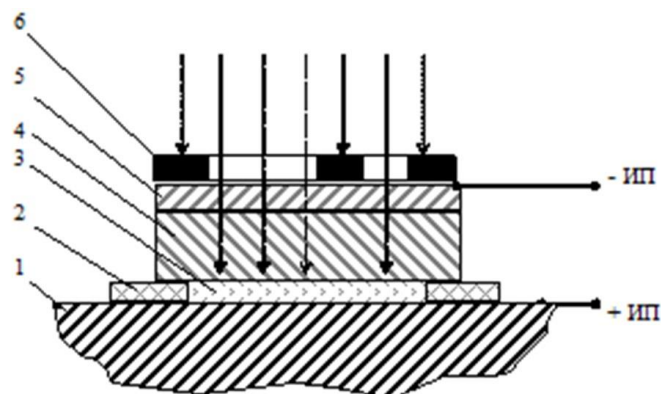


Рис. 5. Схема электрохимической ячейки для исследования ЭИ: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – диэлектрическая прокладка; 3 – МЭЗ, заполненный электролитом; 4 – полупроводниковая пластина; 5 – прозрачный проводящий слой; 6 – фототрафарет; стрелки указывают направление светового потока; ИП – источник питания

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что для электрохимической размерной обработки с использованием полупроводниковых электрод-инструментов прозрачные покрытия из металлов для медных пленок лучшие результаты обработки имеет ЭИ из монокристаллической кремниевой пластины толщиной 0,38 мм и диаметром 76 мм (р-типа, КДБ - 10), на поверхность которой в камере с давлением 10-4 Па ВУП-4 с подогревом пластины до 500° С была нанесена плёнка толщиной 15 нм. Коэффициент пропускания света медной пленки в оптическом диапазоне составлял 45-55 %, а электрическое поверхностное сопротивление составляло 2,1 Ом/□.

Полученные электрод-инструменты могут использоваться для микротекстурирования поверхности, электрохимического маркирования, изготовления каналов для смазки трибосопряженных поверхностей и т.д.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rajurkar K.P. Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining / K.P. Rajurkar, M.M. Sundaram, A.P. Malshe // *Procedia CIRP*. – 2013. – № 6. – С. 13 – 26.
2. Acharya B.R. Multi-objective Optimization of Electrochemical Machining of Hardened Steel Using NSGAI / B.R. Acharya, Ch.P. Mohanty, S.S. Mahapatra // *Procedia Engineering*. – 2013. – V. 51. – P. 554-560
3. Глебов В.В. Особенности электрохимической обработки деталей из магнитных сплавов / В.В. Глебов, Ю.В. Присяжнюк, Л.А. Каплин // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2012. – № 5. – С. 140-142.
4. Datta M. Fundamental aspects and applications of electrochemical microfabrication / M. Datta, D. Landolt // *Electrochimica Acta*. – 2000. – V. 45. – P. 2535-2558.
5. Глебов В.В. О проблеме бокового подтравливания при химическом и электрохимическом гравировании / В.В. Глебов // *Фундаментальные исследования*. – 2011. – № 8. – С. 623-626.
6. Глебов В.В. Шероховатость и точность при электрохимической обработке деталей из магнитных сплавов / В.В. Глебов, С.В. Кирсанов, Ю.В. Присяжнюк // *Казанская наука*. – 2011. – № 2. – С. 31-33.
7. Kukoz F.I. Method of electrochemical marking / F.I. Kukoz, V.V. Glebov, S.V. Kirsanov, V.V. Konovalenko // *Surface engineering and applied electrochemistry*. – 1995. – № 5. – P. 67-68.
8. Lijo P. Response Surface Modelling of Micro Holes in Electrochemical Discharge Machining Process / P. Lijo, S. H. Somashekhar // *Procedia Engineering*. – 2013. – V. 64. – P. 1395-1404.
9. Pieretti E.F. Surface characterisation of ASTM F139 stainless steel marked by laser and mechanical techniques / E.F. Pieretti, I. Costa // *Electrochimica Acta*. – 2013. – V. 114. – P. 838– 843.
10. Shin H.S. Electrochemical etching using laser masking for multilayered structures on stainless steel / H.S. Shin, M.S. Park, C.N. Chu // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2010. – V. 59. – P. 585-588.
11. Kirsanov S.V. Application of electrochemical marking methods in machine building / S.V. Kirsanov, V. V. Glebov // *Surface engineering and applied electrochemistry*. – 2004. – №5. – P. 1-3.

12. Глебов В.В. Исследование режимов высокоскоростного анодного растворения деталей из магнитных сплавов / В.В. Глебов // Инженерный вестник Дона. – 2015. - №2, ч.2. [www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2966](http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2966).

13. Shippell J.Jr. Electro-chemical marking of circular strain grids / J.Jr. Shippell // Experimental Techniques. – 1978. - V. 3. - Is. 5. – P. 1–4.

14. E.-S. Lee. A Study on Electrochemical Micromachining for Fabrication of Microgrooves in an Air-Lubricated Hydrodynamic Bearing / E.-S. Lee, J.-W. Park, Y.-H. Moon // Int J Adv Manuf Technol. – 2002. –V. 20. –P. 720–726.

15. Kirsanov S.V. Using the methods of electrochemical labeling in machine building / S.V. Kirsanov, V.V. Glebov // Elektronnaya Obrabotka Materialov. – 2004. –V. 5. –P. 4-6.

16. Kukoz Ph.I. The possibility of amplifying the density of technological current in the photoactive electrode instrument / Ph.I. Kukoz, S.V. Kirsanov, V.V. Glebov // Elektronnaya Obrabotka Materialov. – 2000. – V. 4. –P. 4-6.

17. Kukoz F.I. A method for producing a photographic image with the use of a semiconductor electrode / F.I. Kukoz, V.V. Glebov, S.V. Kirsanov, V.V. Konovalenko // Russian Journal of Electrochemistry. – 1996. – V. 32 (9). – P. 1060-1061.

18. Глебов В.В. Фотоэлектрохимическая обработка деталей полупроводниковыми катод-инструментами в NaCl

и NaNO<sub>3</sub> электролите / В.В. Глебов, С.В. Кирсанов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2007. - № 3. – С. 71 - 73.

19. Crespiho1 F.N., Electrochemistry of Layer-by-Layer Films: a review / F.N. Crespiho1, V. Zucolotto, Jr.O.N. Oliveira, F.C. Nart // International Journal of electrochemical science. – 2006. – V. 1(5). – P. 194-214.

20. Глебов В.В. Изготовление печатных плат последовательно-щелевым методом электрохимического травления / В.В. Глебов, Ю.В. Присяжнюк // Современные проблемы науки и образования. – 2011. - №4. URL: [www.science-education.ru/98-4758](http://www.science-education.ru/98-4758).

21. Dikumar A.I. Photoelectric structures based on nanoporous p-InP / A.I. Dikumar, L.I. Bruk, E.V. Monaco, D.A. Sherban, A.V. Simashkevich, I.M. Tiginyanu // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2008. – V. 44(1). – P. 1–5.

22. Kavei G. The effects of surface roughness and nanostructure on the properties of indium tin oxide (ITO) designated for novel optoelectronic devices fabrication / Kavei G., Gheidari A.M. // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – V. 208(1-3). – P. 514-519.

# Thermal Vacuum Deposition of Transparent Conductive Layers on Semiconductor Tool Electrodes for Electrochemical Machining of Engineering Products

Glebov V.V.

Don State Technical University  
Rostov, Russian Federation  
[glebovdon@mail.ru](mailto:glebovdon@mail.ru)

**Abstract.** This paper proposes a novel process for electrochemical engraving of metal without a need for stencil and photolithography. Features of receptions of electrodeposition films on a semiconductor tool electrodes for electrochemical machining are investigated. The analytical equations for definition of a necessary thickness of a film are gained. The technique of drawing of films by thermal transpiration on vacuum plant VUP-4 is observed. The technology of making and designing the photo-active electrode tool, based on Cu/Si structure, is studied. The electrical and optical properties of a semiconductor thin plate have been investigated. Results of electrochemical machining by electrode

tools with various thickness of an electrodeposition film are analysed. The theory and method of making, experimental results and an application of the semiconductor tool electrode are presented in this paper..

**Keywords:** electrochemical machining; vacuum thermal deposition; semiconductor; transparent film; electrode tool; electrochemical marking.

# Сравнительный анализ моделирования процессов движения электромобиля «НГТУ – Электро» в программах MATLAB Simulink и AVL Cruise

Илимбетов Р.Ю., Возмилов А.Г., Попов В.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

г. Челябинск, Российская Федерация

[ilimbay@yandex.ru](mailto:ilimbay@yandex.ru), [vozmiag44@rambler.ru](mailto:vozmiag44@rambler.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрены факторы загрязнения окружающей среды автомобильным транспортом, решение которой поддерживается Правительством РФ. Представлены перспективы перехода от традиционных автомобилей с ДВС и гибридных на электромобили. Изложено актуальное состояние продаж легких коммерческих автомобилей на рынке России. Рассмотрены возможные перспективы компьютерного моделирования в автомобильной отрасли. Приведено описание программ MATLAB Simulink и AVL Cruise, используемых при моделировании движения электромобиля на базе ГАЗель. Программы позволяют вносить технические характеристики автомобилей, выбирать ездовые циклы, вносить изменения в существующие конструкции узлов и агрегатов, моделировать процесс движения автомобиля. Представлены сравнительные результаты моделирования электромобиля ГАЗель по ездовому циклу, интенсивности разгона, по механическим характеристикам тягового электродвигателя. В выводах даны пояснения по результатам сравнительного моделирования в программах MATLAB Simulink и AVL Cruise.

**Ключевые слова:** окружающая среда, выбросы, электромобиль, моделирование.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сложилась такая ситуация, что автомобильный транспорт оказывает значительное отрицательное воздействие на окружающую среду и соответственно на человека. Таким образом, вопрос охраны окружающей среды оказывает непосредственное влияние на развитие автомобильной промышленности в мире).

## АКТУАЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В нашей стране по данным Министерства Природных Ресурсов и Экологии РФ 42 % загрязнения атмосферы приходится на выбросы автотранспорта, а в крупных городах (Москва, Санкт-Петербург) до 80-90 % [1].

Распоряжением Правительства РФ от 27.12.2010 г. №2446 утверждена государственная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на транспорте периодом до 2020 года». Согласно данному постановлению, доля легковых автомобилей с гибридной силовой установкой и электромобилей среди продаваемых новых автомобилей на территории РФ должно быть не менее 1,4% в 2012 г. (35 000 шт. в год) и к 2020 г. увеличиться до 4,6% (115 000 шт. в год) [2].

С конца XX века наметилась тенденция перехода от традиционного автомобиля с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) к гибриднему автомобилю. Следует отметить, что широкое применение гибридных автомобилей принципиально не решает, а лишь смягчает проблему потребления топлива индивидуальными транспортными средствами и выбросами CO<sub>2</sub>. Поэтому такой тип силовой установки рассматривается как временный, промежуточный этап на пути создания и развития производства электромобилей [3-6].

В настоящее время активно разрабатываются и внедряются в массовое производство автомобили на водородном топливе, топливных элементах, а так же электромобили. Согласно данным исследований ОАО «МОЭСК» за 2012 год представленные на рис. 1 видно, что максимальное количество выбросов CO<sub>2</sub> приходится на автомобили с ДВС (более 150 г/100 км) и самое минимальное приходится на электромобили, что на 70 % меньше по сравнению с бензиновыми ДВС [7-9].

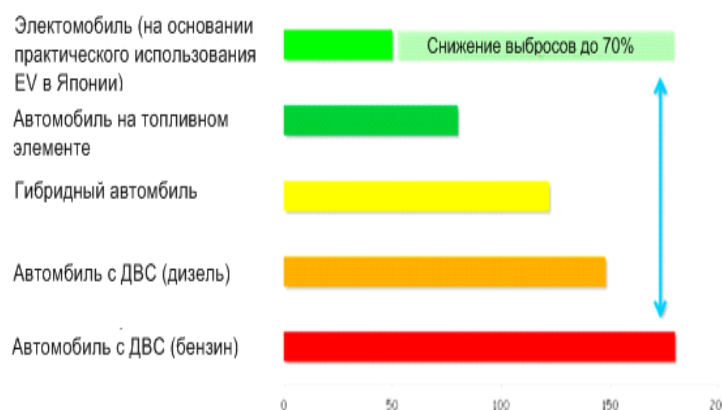


Рис. 1. Выбросы CO<sub>2</sub> г/100 км для легковых автомобилей

Экологические показатели электротранспорта с учетом выбросов вредных веществ в окружающую среду (по данным МГТУ «МАМИ») были сведены в «табл. 1».

Анализ табл. 1 показывает, что электромобиль в среднем на 50 % чище и на 80 % энергоэффективнее своих аналогов с двигателем внутреннего сгорания.

Таблица 1

Сравнение по показателям выбросов отработавших газов автомобилей с ДВС и электромобиля [10]

Сравнительные показатели	Электромобиль Mitsubishi I-MIEV (13,5кВтч/100км)	Mitsubishi Colt 1,1л (75 л.с)	Chevrolet Spark, 1л (68 л.с)	Toyota Camry 3,5л (277л.с), Euro-4
Выбросы CO <sub>2</sub> , г/100 км	9,06	20,2 (+22%)	16,9 (+28%)	37,5 (+23%)
Выбросы NO <sub>x</sub> , г/100 км	9,52	18,0 (+125%)	18,1 (+126%)	26,8 (+235)
Выбросы CO <sub>2</sub> , г/100 км	0	181,2 (+81%)	182,4 (+82%)	253,1 (+153%)
Расход кг у.т./100 км	4,65	19,5 (+87%)	19,8 (+87%)	36,7 (+87)
Расход энергии Вт·ч на км	135	904,2 (+41%)	917 (+41%)	1705,0 (+41%)

Таким образом, анализ показывает, что одним из актуальных направлений развития автомобильного транспорта является создание электромобилей, которые наиболее максимально удовлетворяют требованиям транспортных средств для населенных пунктов.

По выпуску легких коммерческих автомобилей, Россия является одним из ведущих автопроизводителей. На рис. 2 предоставлена диаграмма, характеризующая состояние автомобильного рынка в России в 2011 [11].

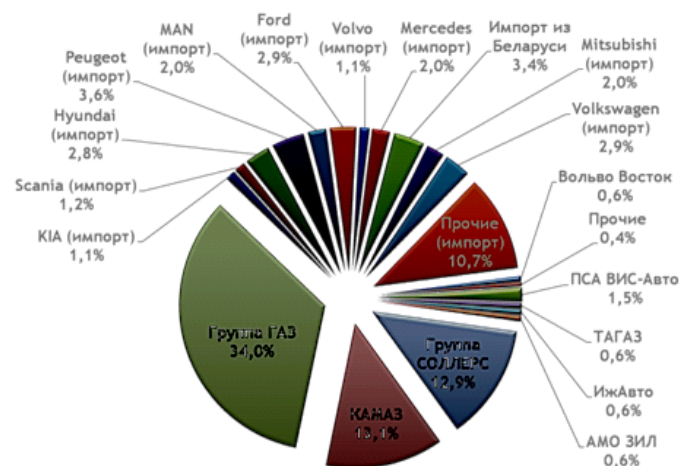


Рис. 2. Рынок коммерческого транспорта в России

Согласно данной диаграмме автомобили марки ГАЗ занимает лидирующую позицию на Российском рынке. Основными автомобилями, выпускаемыми Группой ГАЗ, как известно, является модели «ГАЗель», которых по итогам 2007 года было продано более 170 тыс. автомобилей этой марки, что составило около 95 % от реализации Группы «ГАЗ» [12].

ОБЗОР ВЫБРАННЫХ ПРОГРАММ

В настоящее время при проектировании автомобильного транспорта широко используется компьютерное моделирование, которое позволяет «заглянуть» в будущее возможных результатов проектируемых механизмов и машин. Для проектирования современных автомобилей, их узлов и агрегатов наиболее подходящими программами являются: MATLAB Simulink и AVL Cruise [13, 14].

Программный продукт MATLAB Simulink с применением модуля SimPowerSystems содержит готовые модели многих компонентов, используемых в трансформаторах, двигателях и библиотеки специфичных моделей. С помощью данного модуля программы, возможно, реализовывать следующие возможности: моделирование электро-энергетических систем; моделирование индивидуальных компонентов; возможности симуляции [15-17]. При этом он имеет свои недостатки такие как отсутствие отдельных модулей механических элементов с последующим моделированием.

Программный комплекс AVL является узкоспециализированным, он направлен на решение задач в области автомобилестроения. Комплекс способен просчитать по отдельности все узлы и агрегаты автомобиля, их взаимодействие и систему управления рис. 4. Располагает полной библиотекой узлов автомобиля для моделирования: легковых и грузовых автомобилей, автобусов, мотоциклов, гибридных и электромобилей [18-20].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для моделирования и сравнения полученных результатов в программах MATLAB Simulink и AVL Cruise был взят электромобиль «НГТУ-Электро» на основе марки автомобиля ГАЗель.

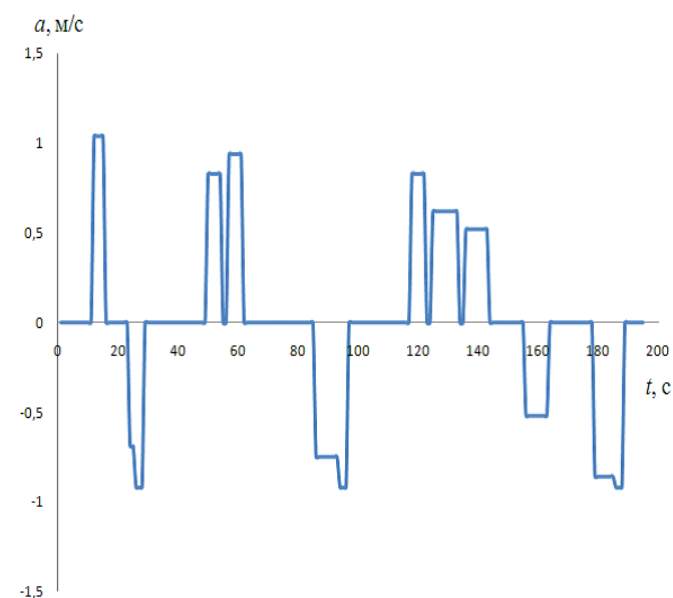
Для оценки энергетических затрат (энергетической эффективности) электромобиля целесообразно проводить моделирование движения в городских условиях цикла UDC для легковых и легких коммерческих автомобилей полной массой до 3,5 т. рис. 5 [8, 9, 13].



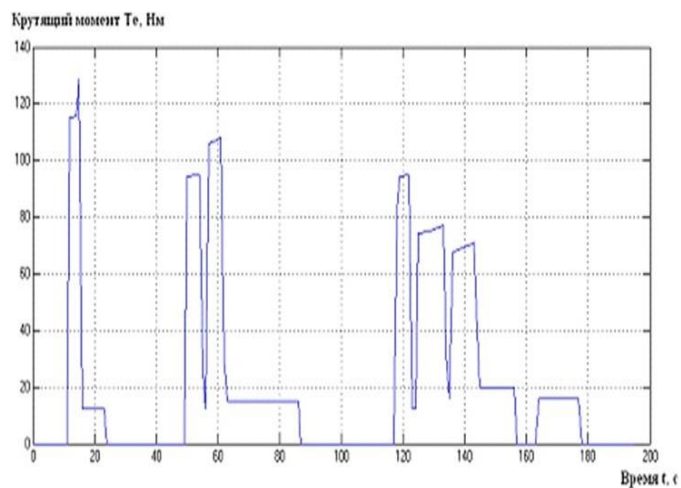
Рис. 5. График простого европейского городского цикла UDC

На рис. 6-8 показаны сравнительные результаты имитационного моделирования движения автомобиля с электроприводом в условиях городского цикла UDC. Из рис. 6 видно, что при моделировании процессов движения электромобиля интенсивность разгона и торможения в городском цикле UDC совпадают. Оценить потери энергии позволяет мощность и крутящий момент на валу электродвигателя, необходимые для движения в городском цикле рис. 7, 8.

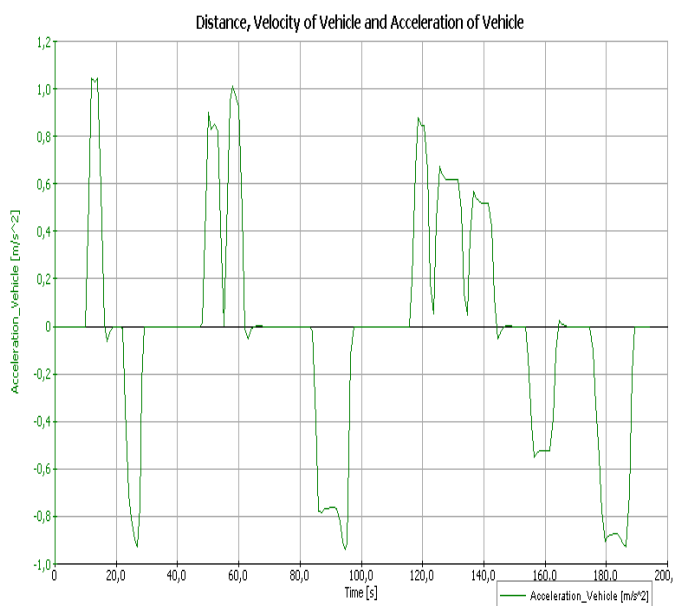




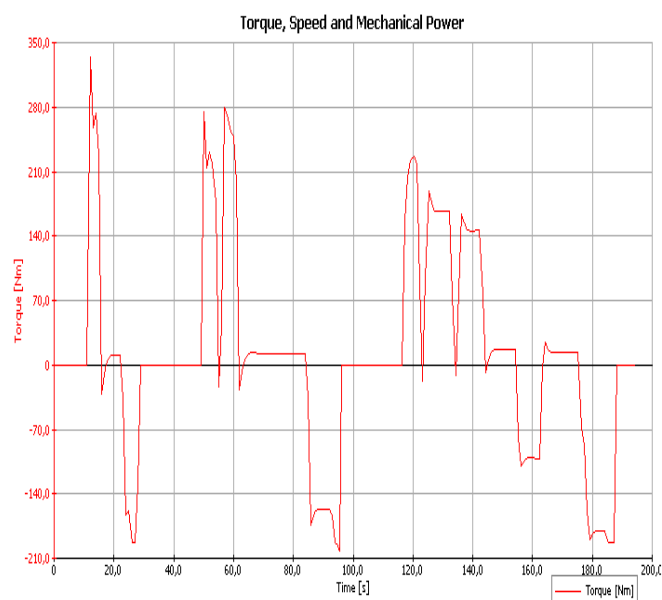
a



a



б



б

Рис. 6. Интенсивность разгона в городском цикле:

a – в программе MATLAB Simulink;

б – в программе AVL Cruise

По форме кривой крутящего момента рис. 7, мы наблюдаем совпадения графиков моделирования, так же видно, что при моделировании в программе AVL Cruise присутствует отрицательная величина. Это указывает на то, что при снижении скорости движения электромобиля ГАЗель, электродвигатель переходит в режим генератора торможения для зарядки высоковольтной аккумуляторной батареи. Однако значение момента на валу электродвигателя в программе AVL Cruise и MATLAB Simulink различаются не более чем на 50 %. Это связано, прежде всего, с разными методами расчета и инерционных масс в представленных программах моделирования.

Рис. 7. Характер изменения крутящего момента

на валу электродвигателя:

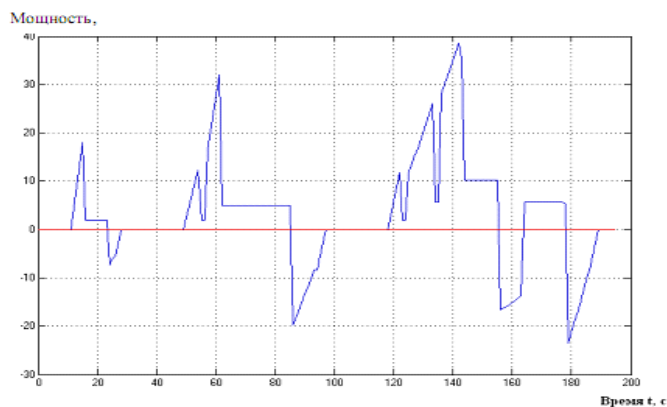
a – в программе MATLAB Simulink;

б – в программе AVL Cruise

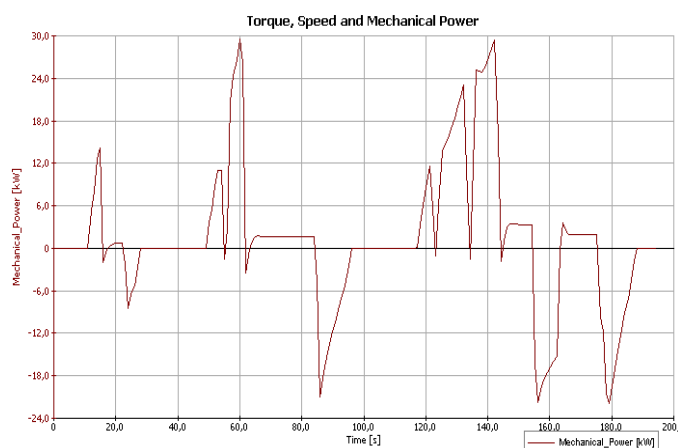
Результаты моделирования зависимости изменения мощности на валу электродвигателя от времени движения показали нам, что полученные значения кривых в программах MATLAB Simulink и AVL Cruise, имеют полное совпадение рис. 8.

В табл. 2 представлены сравнительные результаты моделирования движения электромобиля на основе марки автомобиля ГАЗель в программе MATLAB Simulink и AVL Cruise.

Анализируя данные табл. 2 видно, что при равных исходных данных электромобиля ГАЗель, программы MATLAB Simulink и AVL Cruise в процессе компьютерного моделирования показывают аналогичные результаты пройденного пути транспортным средством на одной зарядке высоковольтной батареи.



а



б

Рис. 8. Зависимость мощности на валу электродвигателя: а – в программе MATLAB Simulink [1]; б – в Cruise

Таблица 2

Сравнительные результаты моделирования движения электромобиля в программе MATLAB Simulink и AVL Cruise

Технические параметры	Программа MATLAB Simulink	Программа AVL Cruise
Полная масса, кг	3500	
Масса шасси (включая водителя), не более	2200	
Тип электродвигателя	синхронный с постоянными магнитами	
Электродвигатель	UQM PowerPhase 200 SPM286-149-2	
Максимальная (пиковая) мощность (двигатель / генератор), кВт	200	
Максимальный (пиковый) крутящий момент, Нм	850	
Максимальная частота вращения, об/мин	5700	
Номинальное входное напряжение постоянного тока, В	250...425	250
Напряжение постоянного тока для обеспечения максимальной мощности, В	360...425	360
Минимальное рабочее напряжение постоянного тока, В	240	240
Аккумуляторная батарея	WinstonBattery, Литий-железо-фосфатные	
Главная передача	Передаточное число -5,125	
Шины	225/75R16 110R	
Полученные результаты моделирования		
Пробег на одной зарядке в городских условиях движения при полной загрузке электромобиля, км	145	145

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Компьютерное моделирование движения электромобиля ГАЗель в городских условиях (в цикле UDC) показало, что полученные результаты в программах MATLAB Simulink и AVL Cruise имеют одинаковые значения по мощности на валу электродвигателя, и главное по пройденному пути на одной зарядке высоковольтной батареи.

Однако имеются и расхождения в процессе моделирования крутящего момента на валу тягового электродвигателя (UQM Power Phase 200) с разницей не более 50%. Основной причиной этого является разные методики математического расчета эмпирических моделей инерционных масс транспортного средства в представленных программах.

Таким образом, любое компьютерное моделирование как математический инструмент позволяет оптимизировать процесс поиска новых технических идей, в том числе и в области машиностроения. Однако сравнивая результаты моделирования двух компьютерных программ MATLAB Simulink и AVL Cruise на примере электромобиля ГАЗель, мы наблюдаем, что существуют результаты, как полного совпадения, так и частичного. То есть, в будущем нам необходимо провести сравнительные теоретические и практические исследования для оптимизации компьютерного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левитин И.Е. Транспорт и экология: государственный подход // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 6 (37). – С. 4-5.
2. ГАРАНТ «Информационно – правовой портал» – URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/5507034/> (дата обращения 23.09.2015).
3. Илимбетов Р.Ю. Применение электромеханической трансмиссии в грузовых автомобилях с целью улучшения экологических показателей / Р.Ю. Илимбетов, Е.В. Соломин, А.М. Астапенко, А.В. Баканов // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 5-1(125). – С. 88-93.
4. Кукарских Л.А. Влияние автотранспортного комплекса на экологию и состояние общественного здоровья // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2008. – Т. 4, № 4. – С. 56-60.
5. Shenghui C. The development and future outlook of HEV // Механика машин, механизмов и материалов. – 2008. – № 2(3). – С. 42-47.
6. Раков В.А. Оценка развития мирового автопарка гибридных автомобилей // Автотранспортное предприятие. – 2012. – № 8. – С. 27-30
7. Государственный контракт № 14.740.11.0403 от 20.09.2010 г. в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы. Отчет о научно – исследовательской работе по теме: создание шасси экологически безопасных городских электромобилей с перспективными источниками и накопителями энергии шифр «2010-1.1-217-140-012».
8. Hamada K. Evolution of Hybrid Vehicle Electric System and its Support Technologies // Toyota Motor Corporation, 2007.
9. Сысоева С. Топливная экономия, эффективность, экология – атрибуты новых автомобилей, двигателей и

систем // Компоненты и технологии. – 2009. – № 95. – С. 29-36.

10. «МОЭСК» развенчивает мифы об электромобилях – URL:<http://gisee.ru/articles/experience/38678/> (дата обращения 22.09.2015).

11. Хлус А.А. Современное состояние и перспективы развития Российского автомобильного рынка // Российский внешнеэкономический вестник. – 2015. – № 6. – С. 100-111.

12. Группа «ГАЗ»: диверсифицированный автопроизводитель – URL: [http://data.investfunds.ru/stocks\\_comments/3689/2008-03-13\\_GAZ.pdf](http://data.investfunds.ru/stocks_comments/3689/2008-03-13_GAZ.pdf) (дата обращения 23.09.2015).

13. Илимбетов Р.Ю. Компьютерное моделирование электромеханической трансмиссии грузового автомобиля Урал – 4320 / Р.Ю. Илимбетов В.В. Дернов // Наука ЮУрГУ: матер.66-й науч. конф. секция технических наук. – Челябинск, 2014. – С. 241-247.

14. Илимбетов Р.Ю. Компьютерное моделирование процессов движения легкового автомобиля с последовательной комбинированной энергетической установки /

Илимбетов Р.Ю., Попов В.В., Баканов А.В., Кирпичникова И.В. // Вестник ЧГАА. – 2014. – Том 70. – С. 71-77.

15. Описание программы MATLAB Simulink с модулем SimPowerSystems – URL: <http://matlab.ru/products/simpowersystems> (дата обращения 23.09.2015).

16. Sim Power Systems – URL: [http://matlab.ru/products/simpowersystems/simpowersystems\\_rus.pdf](http://matlab.ru/products/simpowersystems/simpowersystems_rus.pdf) (дата обращения 23.09.2015).

17. Electrical Power Systems Simulation – URL: <http://www.mathworks.com/products/simpower/> (23.09.2015).

18. AVL CRUISE 2014.0 – URL: <http://rutracker.org/forum/viewtopic.php?t=4867044> (дата обращения 23.09.2015)

19. Программное обеспечение для моделирования силовых агрегатов: Ноу-хау AVL в увеличении доли исследовательских работ на ранних стадиях проектирования – URL: [http://www.aps-c.ru/publications/AVL\\_simulation\\_technologies\\_with\\_FM.pdf](http://www.aps-c.ru/publications/AVL_simulation_technologies_with_FM.pdf) (дата обращения 23.09.2015).

20. AVL CRUISE 2013 – URL: [http://ebookey.org/AVL-CRUISE-2013-Build-1100-32bit-64bit\\_2343378.html](http://ebookey.org/AVL-CRUISE-2013-Build-1100-32bit-64bit_2343378.html) (дата обращения 23.09.2015).

# Comparative Analysis of “NGTU – Electro” Electric Car Movement Processes Modeling in MATLAB Simulink and AVL Cruise Software

Ilimbetov R.Yu., Vozmilov A.G., Popov V.V.  
South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[ilimbay@yandex.ru](mailto:ilimbay@yandex.ru), [vozmiag44@rambler.ru](mailto:vozmiag44@rambler.ru)

*Abstract.* The paper discusses the factors of environmental pollution, outlook of transition from hybrid cars to electric vehicles. We presented the description of software used in modeling of electric vehicle movement. We discussed the obtained results of modeling of electric vehicle movement in MATLAB Simulink and AVLCruise software.

*Keywords:* environment, emissions, electric vehicle, modeling.

# Новые возможности производства металлопроката на современном металлургическом комбинате

Шеркунов В.Г., Дубинский Ф.С., Загуменнов О.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[sherkunovvg@susu.ac.ru](mailto:sherkunovvg@susu.ac.ru)

**Аннотация.** В настоящее время обеспечение грузовых и пассажирских перевозок в соответствии с потребностями различных отраслей промышленности обеспечивает стабильность и интенсивность развития экономики любого государства. Жесткие климатические условия в России, а так же скорости передвижения подвижных составов до 250 км/ч формируют повышенные требования к железнодорожной технике и к железнодорожным рельсам, в частности. Российская Федерация занимает третье место в мире по объему потребления транспортного проката, уступая США и Китаю.

**Ключевые слова:** рельсобалочное производство, технологическая схема, сортовая прокатка, гидросбив окислы, закаливание, оператор прокатного стана, управление.

В 70-80 годы прошлого века Россия занимала лидирующие позиции в области развития технологии производства железнодорожных рельсов. К середине 90-х годов первенство в данной области было утрачено. На данный момент для обеспечения высокоскоростных магистралей дорогостоящие рельсы длиной 100 м приобретаются на заводах VoestAlpine (Австрия) и Nippon steel (Япония). Цена за тонну импортных рельсов превышает возможную цену российских поставщиков.

Современные и перспективные требования российских железных дорог к рельсам непосредственно вытекают из существующих и перспективных условий их эксплуатации и стратегии развития железнодорожного транспорта. Уже первый этап стратегии развития железнодорожного транспорта предусматривает коренную модернизацию производственной базы основных поставщиков отрасли и снятие ограничений в пропускных провозных способностях для того, чтобы обеспечить растущий спрос на грузовые и пассажирские перевозки. Приоритетами для ОАО «РЖД» являются развитие инфраструктуры и обеспечение безопасности движения.

Развитие и совершенствование рельсобалочного производства Российских производителей осуществлялось постепенно в несколько этапов. В 2010 году на предприятиях ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» (ОАО «НКМК») и ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» (ОАО «НТМК»), входящих в состав Евраз Холдинга, был проведен первый этап реконструкции рельсобалочных цехов, заключающийся в установке в термоотделениях объемной закалки новых линий отделки. В перечень установленного оборудования вошли современные правильные агрегаты, линии неразрушающего

контроля, сверлильно-отрезные станки. В 2012 году на ОАО «НКМК» был демонтирован действующий стан и началось строительство нового прокатного стана фирмы «SMS Meer». Параллельно на ПАО «Челябинский металлургический комбинат» (ПАО «ЧМК») было возобновлено строительство и в 2013 году пущен рельсобалочный стан производства компании «Danieli». Рельсобалочный стан ПАО «ЧМК» производит качественные железнодорожные рельсы длиной до 100 метров с применением передовых технологий прокатки, заковки, отделки и контроля качества.

Современная технологическая схема производства рельсов показана на рис. 1. Данная схема производства высококачественных рельсов является типовой для современных заводов во всем мире.

Технология рельсобалочных станов различных поставщиков и разработчиков оборудования включает в себя следующие этапы и агрегаты:

1. Нагрев заготовок в методических нагревательных печах. Большинство предприятий, выпускающих рельсовую продукцию, оснащены печами с шагающими балками. Техническое исполнение данных агрегатов позволяет вести равномерный нагрев металла. Качественный нагрев стали перед прокаткой позволяет получить равномерные свойства по всему сечению профиля, а так же требуемое качество поверхности;
2. Устройства гидросбива окислы установлены после нагревательной печи, а также на сторонах входа и выхода непрерывной группы клетей УГР (ультрагибкий реверсивный стан) и на входе в чистовую клеть. Внедрение такой технологии обеспечивает хорошее качество удаления печной, а также вторичной окислы и хорошее качество поверхности проката;
3. Разработан ряд современных процессов прокатки рельсов и балок, например процесс PSP (Profile Sizing Process) с применением компактных универсальных групп клетей SCC (Standart Core Concept) и отдельно стоящей чистовой клетки (рис.2). Подобная концепция устройства клетей широко применяется на современных рельсобалочных станах в Австрии, КНР, США, Индии, Турции.

Использование PSP процесса позволяет достичь. Во-первых, высокое качество выпускаемой продукции с соблюдением строгих допусков размеров благодаря высокой жесткости и устойчивости клетей и гидравлической системе регулировки.

Во-вторых, высокую эффективность производства.



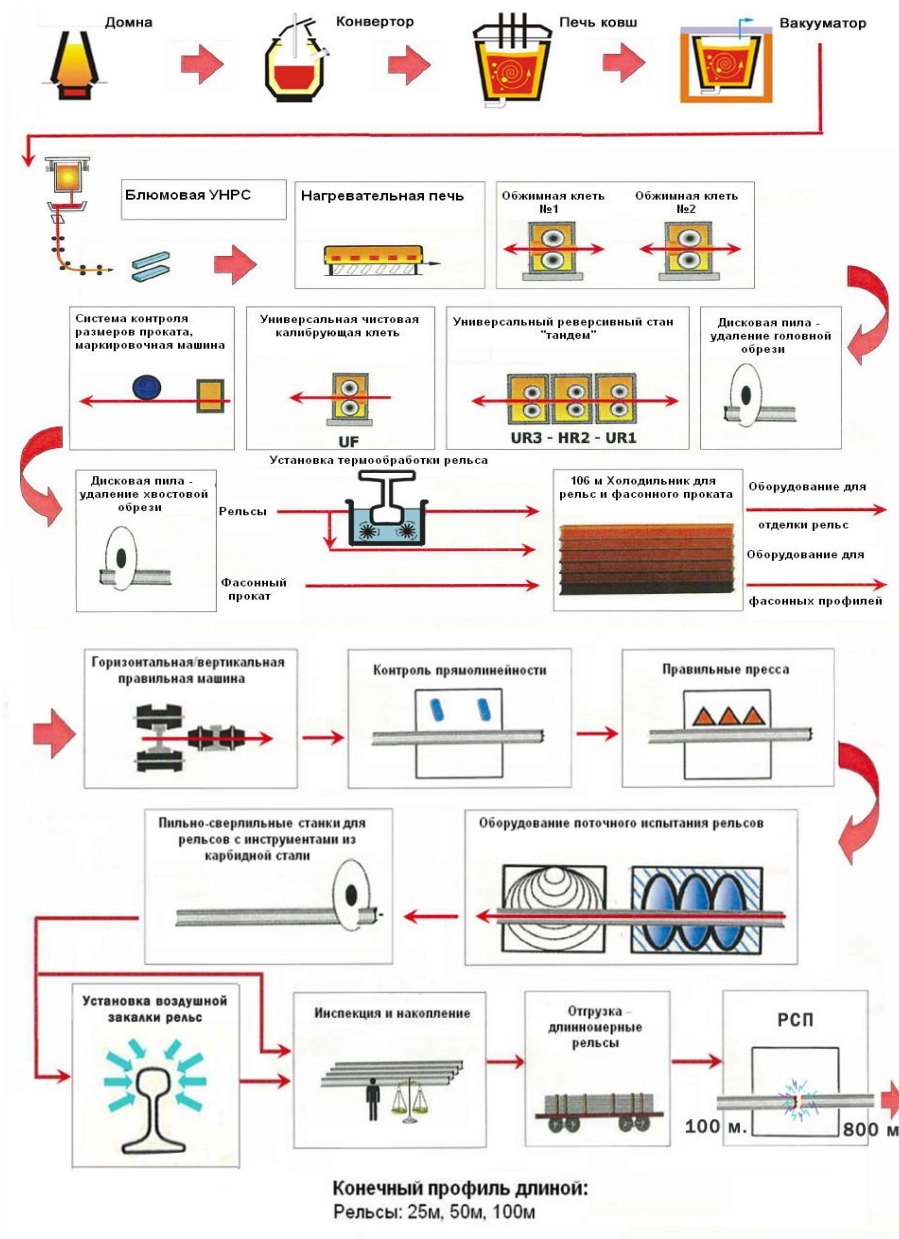


Рис. 1. Схема технологического процесса производства рельсов

В третьих, возможность производства мелких партий заказов благодаря короткому времени смены программы прокатки.

В состав универсального рельсобалочного стана входят реверсивная обжимная клет (обжимной стан ОС); непрерывная группа клет УГР, состоящая из двух универсальных четырёхвалковых реверсивных клет (УК1 и УК2) и вспомогательной двухвалковой реверсивной клетки (ВК); чистовая универсальная калибрующая (ЧК) клет (рис. 2).

В зависимости от схемы прокатки клет группы УГР и чистовая клет могут работать как в четырёхвалковом режиме, так и в горизонтальном двухвалковом. Универсальные клет позволяют получать балки и швеллеры с параллельными гранями полок и осуществлять прямое обжатие головки рельса, формируя тем самым необходимую мелкозернистую структуру, улучшая качество поверхности и гарантируя получение необходимой формы.

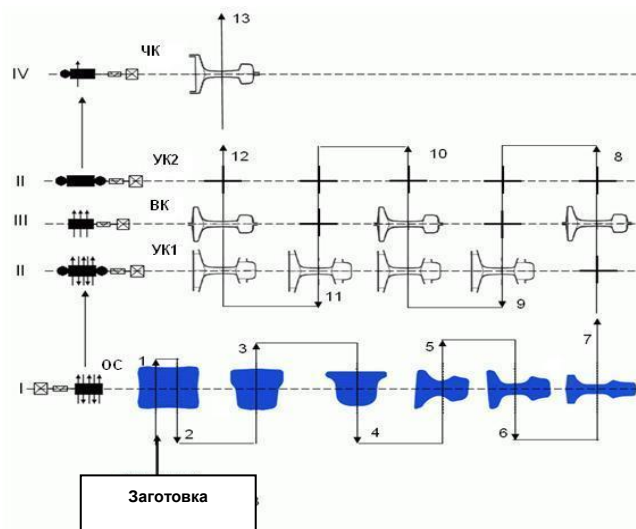


Рис. 2. Схема прокатки рельсов по способу PSP

Кроме того, прокатка в универсальных клетях обеспечивает одновременную равномерную деформацию всего профиля четырьмя валками, снижение напряжений в поперечном сечении рельса благодаря симметричной деформации, более высокую точность рельсового профиля из-за раздельной регулировки горизонтальных и вертикальных валков. При проектировании калибровки валков могут быть использованы рекомендации полученные в работе.

В четвертых, для получения требуемых свойств рельсового проката все производственные линии комплектуются установками дифференцируемого термического упрочнения. Достоинством этой технологии по сравнению с объёмной закалкой является получение высокой прямолинейности рельсов, благоприятных остаточных напряжений и дифференцированной прочности по сечению рельса.

Наиболее распространенной технологией закалки, применяемой на заводах США, Японии, а так же российских предприятиях, является закалка головки рельса воздухом. Принцип данного способа термического упрочнения заключается в подачи струй воздуха на головку рельса из расчета удаления паровой рубашки с поверхности металла и передачи требуемой охлаждающей способности среды. Проведен сравнительный анализ закалки рельсовой стали с использованием различных охлаждающих сред: водных растворов полимера, сжатого воздуха и водовоздушной смеси. Наилучшую закалочную способность обеспечили водные растворы полимеров и водовоздушные смеси, наименьшую – сжатый воздух.

В настоящее время наилучшие эксплуатационные характеристики рельсов были получены на металле, прошедшем закалку в полимерной среде на заводе VoestAlpine (Австрия).

Принцип закалки рельсов на данном оборудовании заключается в погружении головки профиля в циркулирующий полимер определенной температуры и концентрации. При этом осуществляется интенсивный отвод

тепла из шейки и подошвы рельса, что в совокупности обеспечивает требуемую скорость охлаждения головки и рельса в целом.

В пятых, одними из важнейших качественных показателей рельсов, влияющих на срок службы, являются прямолинейность и уровень остаточных напряжений в шейке профиля. Для получения требуемой прямолинейности на современных рельсовых предприятиях используются многовалковые правильных комплексы. Количество правящих роликов на горизонтальных правильных машинах может достигать 12 единиц. В сравнении с шестивалковыми машинами, широко применяемыми на российских предприятиях до недавнего времени, на современных РПМ возможно применение режимов мягкой правки, обеспечивающих низкий уровень остаточных напряжений в шейке рельса.

#### Выводы

Проведение реконструкции рельсобалочного цеха на предприятии ОАО «Евраз ЗСМК» (объединенные Новокузнецкий и Западносибирский металлургические комбинаты), а так же строительство и пуск рельсобалочного стана на ПАО «ЧМК» положило начало нового этапа развития производства транспортного металла в России.

Внедрение современных технологий и оборудования позволяет освоить производство высококачественных фасонных профилей и рельсов различного назначения в длине до 100 м, не уступающих продукции ведущих мировых производителей.

Пуск в эксплуатацию рельсобалочных станков позволит инициировать развитие смежных отраслей промышленности России, обеспечить Российские железные дороги и предприятия стройиндустрии металлопродукцией высокого качества по конкурентным ценам, а также снизить их зависимость от импортных поставок и конъюнктурных колебаний на международных рынках.

## New Features of the Rolled Metal Production on the Modern Iron and Steel Works

Sherkunov V.G., Dubinskii F.S., Zagumennov O.V.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian Federation

[sherkunovvg@susu.ac.ru](mailto:sherkunovvg@susu.ac.ru)

**Abstract.** At the present time to carrier freight and passenger transport to meet the needs of various industries ensures the stability and intensity of the economic development of any country. Hard climatic conditions in Russia, as well as the speed of movement of rolling stock to 250 km / h to form the increased requirements for railway equipment and railway tracks, in particular. The Russian Federation ranks third in the world in terms of consumption of vehicle rental, behind the US and China.

**Keywords:** rail and structural steel production, process flow diagram, bar rolling, descale sprays, hardening of the rail steel, the operator of a rolling mill, management.

# Влияние условий охлаждения на напряженно-деформированное состояние головки цилиндра форсированного дизеля\*

Романов В.А., Лазарев Е.А., Хозенюк Н.А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[r.v@live.ru](mailto:r.v@live.ru)

**Аннотация.** Построена расчетная модель для сравнительных оценок теплового баланса, теплового и напряженно-деформированного состояния головки и гильзы цилиндра, учитывающая перераспределение потоков охлаждающей жидкости между головкой цилиндра и блок-картером форсированного дизеля. Выполнены расчетные эксперименты. Показан компромиссный характер проектирования системы охлаждения дизеля: улучшение условий охлаждения головки цилиндров сопровождается ухудшением теплового состояния блок-картера и гильзы цилиндра вплоть до закипания охлаждающей жидкости в картерной части рубашки охлаждения.

**Ключевые слова:** дизель головка цилиндров; блок-картер; гильза; система охлаждения; перераспределение потоков охлаждающей жидкости; метод конечных элементов температуры; тепловые механические напряжения

## ВВЕДЕНИЕ

Увеличивающиеся при форсировании дизеля нагрузки на головку цилиндра (тепловые, механические, гидро- и газодинамические) способны привести к короблению огневой поверхности, появлению трещин в межклапанных перемычках, нарушению герметичности клапанов газораспределения, раскрытию газового стыка и другим факторам, свидетельствующим о потере ее работоспособности.

Трудности расчетной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния (ТНДС) головки цилиндра на стадии проектирования обусловлены необходимостью моделирования взаимозависимых нестационарных термодинамических процессов движения рабочих газов, охлаждающей жидкости, теплообмена с внешней средой, силового и контактного взаимодействия с сопряженными элементами блок-картера дизеля. Существующие методы решают задачу моделирования ТНДС головки цилиндра с различной, но всякий раз ограниченной полнотой и нуждаются в совершенствовании.

## ОБЗОР

Современные подходы к расчетной оценке полей температур, деформаций и напряжений головки цилиндра, как правило, ограничиваются стационарной трехмерной постановкой задач теплопроводности и механики деформируемого твердого тела, базируются на численном методе конечных элементов, реализованном либо в авторских, либо в одном из коммерческих программных комплексов. Точность и адекватность такой расчетной модели напрямую зависят от способов задания и достоверности граничных условий (ГУ).

Граничные условия задачи теплопроводности на поверхностях огневого днища, внутренних поверхностях впускных и выпускных каналов включают средние по времени коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{res}$  и результирующую температуру газа  $T_{gres}$ , определенные по рекомендациям работы [1]. Коэффициент теплоотдачи от рабочих газов определяется с использованием работы [2], а его распределение по огневой поверхности головки цилиндра – уравнения З. Славинского. Граничные условия в контактной зоне клапанов с седлами оцениваются с учетом рекомендаций работы [3]. ГУ теплообмена в полостях жидкостного охлаждения головки цилиндров задаются в виде среднего по времени коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{cres}$  и средней результирующей температуры охлаждающей жидкости  $T_{cres}$  [4].

Граничные условия задачи упругости [5, 6] по поверхности огневого днища включают максимальное давление  $P_{max}$  газа в цилиндре при сгорании топлива. Давление газов на внутренние стенки впускных и выпускных каналов в головке определяется соответственно с учетом параметров наддувочного воздуха и отработавших газов. Давление охлаждающей жидкости (ОЖ) на внутренние поверхности полостей охлаждения оценивается по параметрам циркуляционного насоса. Нагрузки от затяжки гаек силовых шпилек прикладываются в виде распределенной силы к площадке контакта шайбы с поверхностью головки цилиндра.

Существуют также работы, основанные на моделировании нестационарных процессов переноса количества движения, энергии, массы, концентрации и турбулентного сгорания в цилиндре двигателя [18, 19]. Результатом моделирования являются значения скоростей и температур во всех точках камеры сгорания и локальных тепловых потоков в стенки камеры, благодаря чему достигается уточнение граничных условий локального теплообмена и определение коэффициентов теплоотдачи при определении теплового состояния поршня. Однако в указанных работах не анализируется теплонпряженное состояние головки цилиндра.

Достоверность расчетного анализа повышается при сравнении результатов расчетного моделирования температурного состояния головки цилиндров с результатами термометрии и уточнением граничных условий решением тестовых задач [7, 8]. Использование данного подхода целесообразно при проверке конкретной конструкции головки цилиндра. Однако использование таких подходов при проектировании и поиске наиболее эффективных конструктивных решений не всегда представляется возможным и экономически целесообразным.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант 2014-14-579-0109). Соглашение № 14.577.21.0102, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57714X0102.



### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы состоит в построении расчетной модели для сравнительных оценок ТНДС головки цилиндра дизельного двигателя при относительно небольших изменениях в объекте исследования и ориентирована на сопропровождение процесса проектирования новой техники и снижение сроков ее разработки.

Отличительной особенностью предложенной расчетной модели головки цилиндра является оценка количественных параметров теплообмена решением связанной задачи движения газовых потоков и потоков охлаждающей жидкости с последующим определением трехмерных температурных полей головки, гильзы цилиндра, картера дизеля, и импортирование этих результатов в анализ деформированного состояния.

Близкие постановки задачи использованы в работах [9, 10, 15-17], но авторами [9] рассматривается метод численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена только в полостях охлаждения головки цилиндров форсированного дизеля, а в работе [10] предлагается методика математического моделирования согласованных граничных условий для расчета температурных полей, полей деформаций и напряжений только элементов цилиндропоршневой группы (головка цилиндра – клапаны) дизеля. В статьях [15, 16] основное внимание сосредоточено на термонапряженном состоянии блок-картера дизеля и его влиянии на работоспособность коренных подшипников. Авторами работы [17] был проведен расчет теплового состояния крышки цилиндра и клапанов двигателя 12ЧН15/18 и без внимания оставлены вопросы ТНДС.

### МОДЕЛЬ

Модель базируется на системе упрощающих допущений, наиболее существенными из которых являются следующие: геометрическая модель представлена соответствующим одному из цилиндров (рис. 1) фрагментом шестицилиндрового V-образного дизеля размерности 15/16; рассматривается тепловое состояние головки цилиндра, на фоне которого при работе двигателя происходит циклирование: игнорируется тактовый характер вентиляции камеры сгорания, источник тепловыделения занимает фиксированный объем во внутрицилиндровом пространстве; анализ достоинств и недостатков конструктивного исполнения объекта исследования выполняется на основании сравнения решений стационарной тепловой и квазистатической силовой задач.

Для расчетного прогнозирования распределения температур, тепловых и механических напряжений в головке цилиндра использован метод конечных элементов, реализованный в пакете прикладных программ Ansys v16.2. Численное моделирование выполнено на шестипроцессорной рабочей станции с 64 Гб оперативной памяти.

Использована междисциплинарная технология FSI (One way Fluid-Structure Interaction analysis), в рамках которой собственно конструкционному расчету механики деформируемого твердого тела (Structural Analysis) предшествует решение задачи механики жидкости и газа CFD (Computational Fluid Dynamics). На этапе решения CFD задачи геометрическая модель объекта исследования была разделена на четыре домена (рис.1): два твердотельных домена (один из которых включает поршень и шатун в сборе, фрагмент

блок-картера, гильзу; второй – головку цилиндра, фрагменты корпуса газораспределительного механизма, впускного и выпускного коллекторов); газовый домен, представляющий пространственную область, занимаемую рабочими газами при движении из впускного коллектора головки цилиндров в цилиндр и далее в выпускной коллектор (использован только в CFD модели); домен охлаждающей жидкости, сформированный из сообщающихся пространственных областей, занимаемых охлаждающей жидкостью в головке цилиндров, во фрагментах блок-картера, впускного и выпускного коллекторов (использован только в CFD модели).

Алгоритм решения FSI задач, реализованный в пакете Ansys для задач теплообмена и определения параметров потоков жидкости и газа, предполагает использование недеформируемой Эйлеровой сетки конечных элементов (КЭ) с последующей передачей температурных полей на деформируемую Лагранжеву сетку для расчета ТНДС. Параметры КЭ моделей приведены в табл. 1. Области потоковых доменов, соприкасающиеся с твердотельными доменами (пристеночные зоны) разбивались пятью слоями призматических элементов, остальные области разбивались тетраэдрами с характерным размером 1 мм.

Мощность источника тепловыделения определена на основе оценки необратимых полных тепловых потерь дизеля. Расход охлаждающей жидкости через одну головку цилиндра оценивался по производительности циркуляционного насоса. Расход воздуха определен расчетом рабочего цикла дизеля.

Для твердотельного домена головки цилиндра использованы свойства алюминиевого сплава АМХ-605, а для блок-картера – высокопрочного чугуна ВЧ50. Для твердотельных доменов принята модель сплошного, однородного, изотропного материала. При выборе характерного размера конечного элемента сетки для конструкционного расчета учтена структурная неоднородность материала картера (ВЧ-50) [13, 14]. Для жидкостного домена использованы модели одно- и двухфазной среды (Homogeneous Binary Mixture), соответствующей термодинамическим свойствам воды и пара [20].

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение ТНДС выполнено для двух уровней теплоотвода от двигателя (табл. 2), и двух вариантов исполнения рубашки охлаждения (РО). Отличия вариантов исполнения РО сводились к открытому или закрытому состоянию каналов, соединяющих полости охлаждения головки и впускного коллектора (рис. 2). Тепловые потоки  $Q$  в доменах расчетной модели (в долях от суммарных тепловых потерь) (рис. 3) для рассмотренных расчетных случаев приведены на рис. 4. Осреднение температуры по объединенным поверхностям, сформированным по критерию выполнения сходных теплофизических функций, позволяет выявить выраженную зависимость нагрева разных частей модели от формирования потока ОЖ в рубашке охлаждения (рис. 5).

Отличия в формировании потоков охлаждающей жидкости для вариантов РО при интенсивном теплоотводе приведены на рис. 6 (интенсивность линий тока пропорциональна расходу жидкости через соответствующую пространственную область рубашки). Открытие сообщения полостей охлаждающей жидкости между впускным



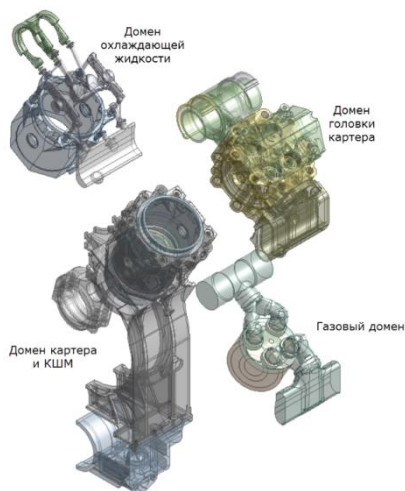


Рис. 1. Элементы расчетной модели одноцилиндрового дизеля

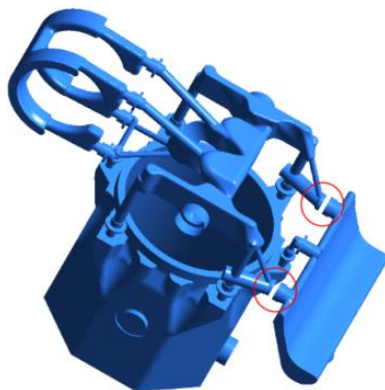


Рис. 2. Расположение соединительных каналов рубашки охлаждения

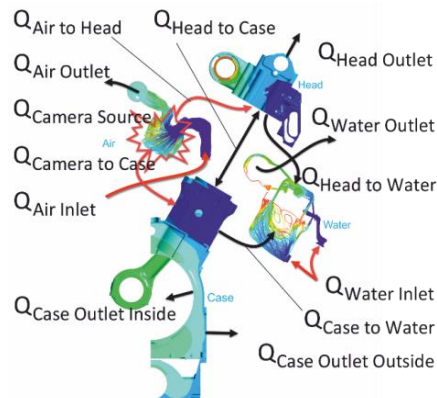


Рис. 3. Обозначение тепловых потоков между составными частями расчетной модели

Таблица 1

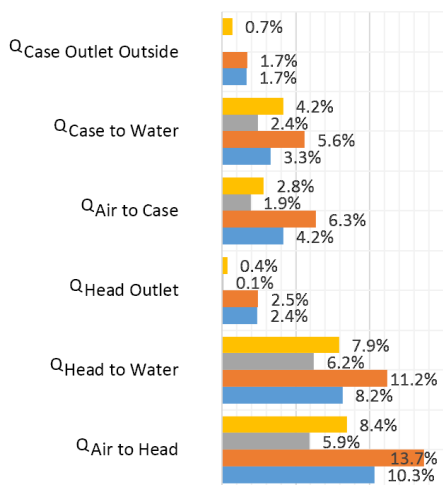
Характеристика модели

Суммарное количество	Computational Fluid Dynamics	Structural Analysis
элементов	8,78 млн	6,2 млн
узлов	> 2 млн	> 9 млн

Таблица 2

Характеристика вариантов расчета

Теплоотвод	Расход ОЖ, кг/с	Температура, С		
		ОЖ на входе	вне картера	в картере
Интенсивный	2	80	20	100
Затрудненный	0,2	95	120	220



- Затрудненный теплоотвод от двигателя. Каналы в головку "Закрыты"
- Затрудненный теплоотвод от двигателя. Каналы в головку "Открыты"
- Интенсивный теплоотвод от двигателя. Каналы в головку "Закрыты"
- Интенсивный теплоотвод от двигателя. Каналы в головку "Открыты"

Рис. 4. Тепловой баланс в доменах головки цилиндра и блок-картера на разных режимах



- Затрудненный теплоотвод от двигателя. Каналы в головку "Закрыты"
- Затрудненный теплоотвод от двигателя. Каналы в головку "Открыты"
- Интенсивный теплоотвод от двигателя. Каналы в головку "Закрыты"
- Интенсивный теплоотвод от двигателя. Каналы в головку "Открыты"

Рис. 5. Осредненные температуры (в С°) основных поверхностей CFD модели

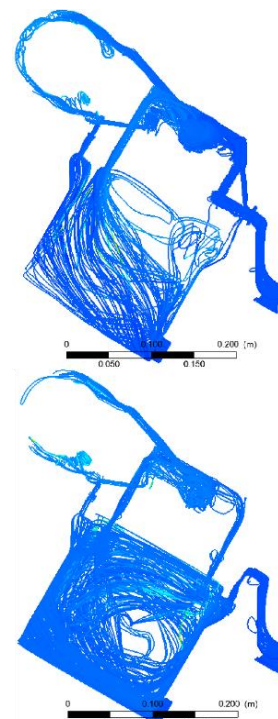


Рис. 6. Варианты потоков охлаждающей жидкости в рубашке охлаждения: вверху – каналы впускного коллектора в головку

коллектором и головкой цилиндра интенсифицируют ее движение через головку. При этом в блок-картере со стороны впускного коллектора формируется застойная зона.

При затрудненном теплоотводе от дизеля при «открытых» каналах ОЖ в головку наблюдается закипание охлаждающей жидкости в блок-картере (рис. 7). Вариант «закрытых» каналов в головке позволяет интенсифицировать движение ОЖ в блок-картере и практически избежать закипания ОЖ (табл. 3).

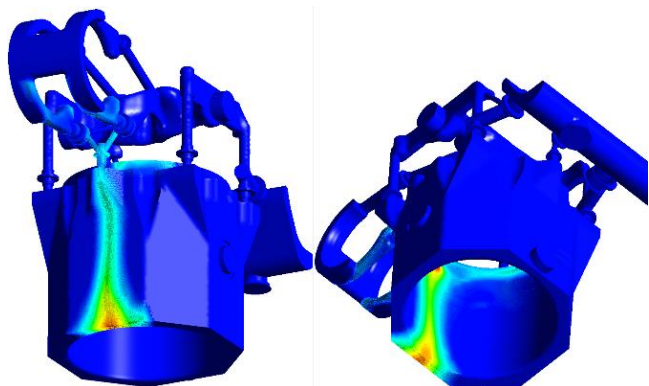


Рис. 7. Локализация зон закипания ОЖ в картерной части рубашки охлаждения

Таблица 3

Доля закипающей жидкости в объеме рубашки охлаждения

Состояние теплоотвода	Первый вариант РО	Второй вариант РО
Интенсивный	0	0
Затрудненный	0,134%	0,00102%

По результатам выполненных расчетов в головке цилиндра наибольшие напряжения наблюдаются в зонах окна в выпускной коллектор, ребра выточки в головке под фланец гильзы и седла выпускного клапана (рис. 8 а, б, в).

Блокирование сообщения охлаждающих полостей во впускном коллекторе и головке цилиндра интенсифицирует движение жидкости в картере, снижая температуру в наиболее нагретых точках гильзы более чем на 80 °С. При этом уменьшение расхода охлаждающей жидкости через головку цилиндра отражается на повышении температуры ее локальных зон до 50 °С.

Вклад теплового нагружения в полные механические напряжения головки цилиндра оказывается основным (рис. 8). Максимальные тепловые напряжения в головке наблюдаются при пониженной температуре в моторном отсеке, максимальной производительности водяной помпы и «закрытых» входных каналах ОЖ в головку цилиндра.

Интересно, что режиму максимальных тепловых напряжений также соответствуют максимальные тепловые потоки как от камеры сгорания к головке, так и от головки к ОЖ (рис. 4), однако средняя температура наружной поверхности головки на режиме с максимальными тепловыми напряжениями оказывается существенно (на 40 °С) ниже, чем при затрудненном теплоотводе.

При затрудненном теплоотводе (см. рис. 8) наибольшие значения тепловых напряжений головки оказываются заметно ниже, чем при интенсивном: для наиболее нагруженной тепловыми напряжениями зоны окна в выпускной коллектор – почти в 5 раз, для кромки камеры сгорания – в 5,3 раза, для кромки седла выпускного коллектора – в 1,7 раза.

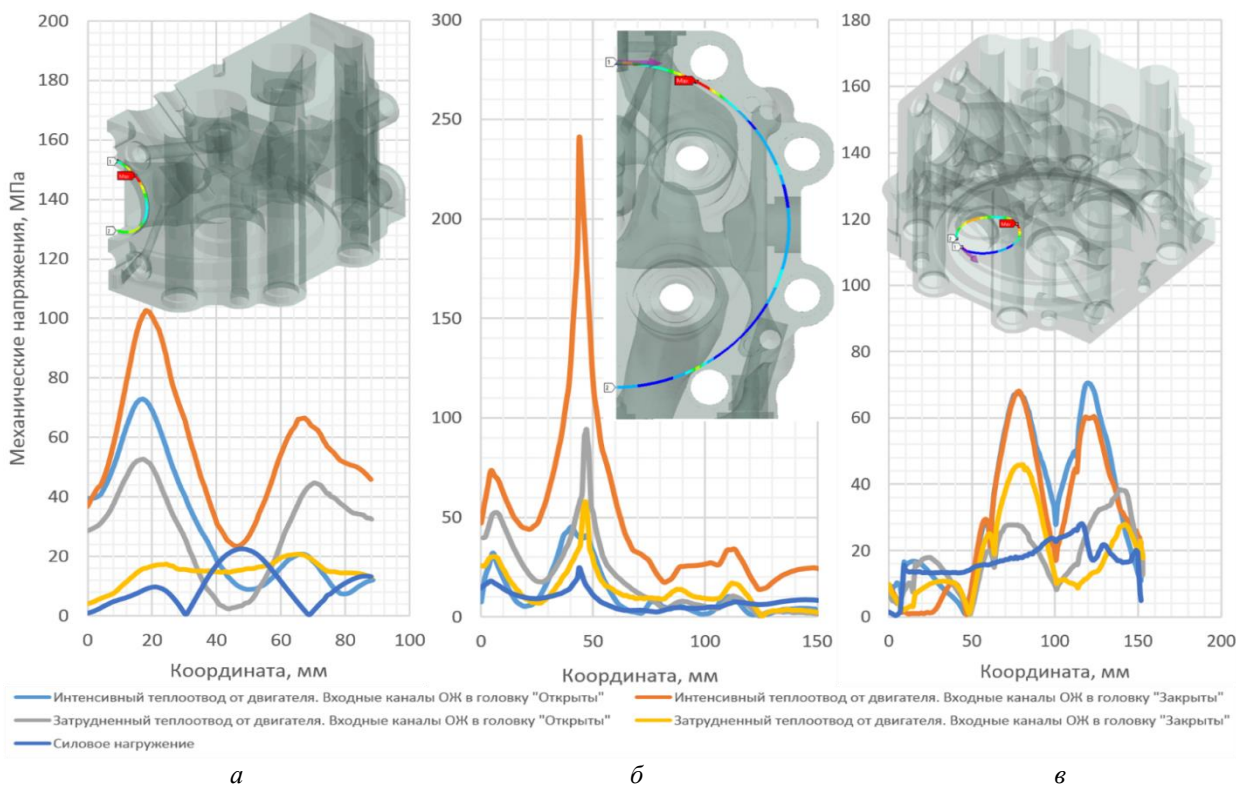


Рис. 8. Эквивалентные напряжения в элементах головки цилиндра дизеля: а – кромка окна в выпускной коллектор; б – ребро полости камеры сгорания; в – кромка посадочной поверхности седла выпускного клапана

Качественно этот результат был предсказуем: тепловые напряжения тем выше, чем выше градиенты температур. Однако, установленный расчетом факт столь значительной зависимости уровней максимальных значений тепловых напряжений в головке от условий теплоотвода показывает крайне высокую степень чувствительности напряженно-деформированного состояния головки цилиндра не только к вопросам геометрической формы рубашки охлаждения (пространственной локализации области занимаемой охлаждающей жидкостью, площади поверхности рубашки охлаждения), но и к вопросам формирования полей скоростей движения охлаждающей жидкости, обеспечения сбалансированного расхода охлаждающей жидкости между головочной и картерной частью рубашки охлаждения.

Перераспределение расхода охлаждающей жидкости в пользу головки при открытых входных каналах ОЖ в головку позволяет существенно снизить тепловые напряжения в ней (рис. 8, а). Однако, одновременное понижение расхода ОЖ через картерную часть рубашки охлаждения приводит к снижению эффективности охлаждения гильзы (рис. 9). Результатом снижения эффективности охлаждения гильзы является увеличение опасности закипания охлаждающей жидкости в картерной части рубашки охлаждения. Один из рассмотренных вариантов расчета приводит к такому закипанию (см. рис. 7).

Рис. 10 иллюстрирует, в какой степени тепловые перемещения (изменение цилиндрической формы внутренней поверхности) гильзы связаны с рассмотренными особенностями работы системы охлаждения. В случае закипания охлаждающей жидкости в картерной части рубашки охла-

ждения разница во взаимных смещениях диаметрально противоположных точек по высоте гильзы цилиндра увеличивается в 4,5 раза

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование FSI технологии для расчетного анализа системы охлаждения дизеля позволило количественно оценить зависимость напряженного состояния головки цилиндра дизеля от условий работы системы охлаждения:

- при фиксированном уровне мощности дизеля в зависимости от условий охлаждения двигателя максимальные механические напряжения в головке цилиндра могут отличаться до 5 раз;
- перераспределение потоков охлаждающей жидкости в пользу головки цилиндра сопровождается ухудшением теплового состояния блок-картера и гильзы цилиндра вплоть до закипания охлаждающей жидкости в картерной части рубашки охлаждения;
- разница во взаимных смещениях диаметрально противоположных точек по высоте гильзы цилиндра при закипании ОЖ в полости охлаждения блок-картера (связанная с возникающей при этом выраженной неравномерностью охлаждения гильзы) может увеличиваться до 4,5 раз по отношению к случаю отсутствия закипания охлаждающей жидкости.

Показан компромиссный характер проектирования системы охлаждения дизеля, проиллюстрирована возможность и целесообразность применения технологии междисциплинарного анализа при разработке образцов новой техники.

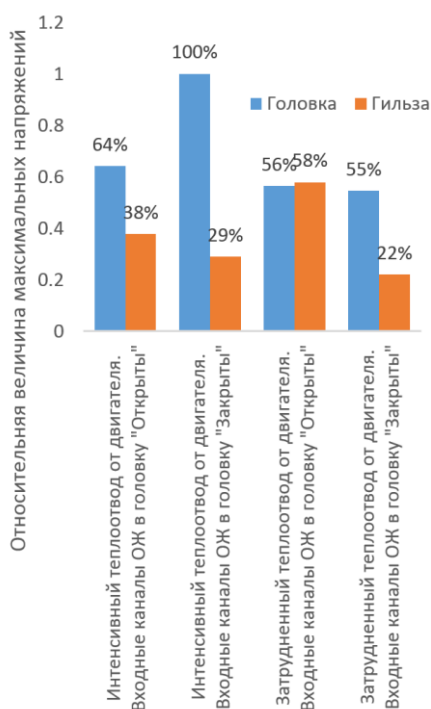


Рис. 9. Сопоставление тепловых напряжений в головке цилиндра и в гильзе

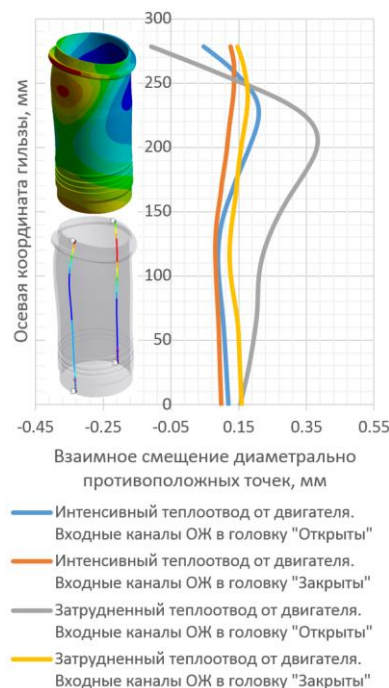


Рис. 10. Тепловые смещения противоположных точек внутренней поверхности гильзы в плоскости перпендикулярной к оси коленчатого вала



ЛИТЕРАТУРА

1. Костин А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 222 с.
2. Woschni G. Eine Methode zur Vorausberechnung der Änderung des Brennverlaufs mittelschnellaufender Dieselmotoren bei geänderten Betriebsbedingungen / G. Woschni, F. Anisitis // MTZ. – 1973. – №34.
3. Розенблит Г.Б. Теплопередача в дизелях. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.
4. Галышев Ю.В. Задание граничных условий теплообмена в рабочих полостях головки цилиндра четырехтактного двигателя внутреннего сгорания / Ю.В. Галышев, А.Ю. Шабанов, А.Б. Зайцев, М.Н. Немчикова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – № 2 (195). – С. 58-64.
5. Шабанов А.Ю. Новый метод расчета граничных условий теплового нагружения головки блока цилиндров поршневого двигателя / А.Ю. Шабанов, А.Б. Зайцев, М.А. Машкур // Двигателестроение. – 2005. – № 1. – С. 5-9.
6. Авраменко А.Н. Математическая модель теплонапряженного состояния крышки цилиндра // Двигатели внутреннего сгорания. Научно-технический журнал. – 2006. – № 2. – С. 18-28.
7. Шеховцев А.Ф. Разработка конечноэлементной модели теплонапряженного и деформированного состояния головки цилиндров быстроходного дизеля / А.Ф. Шеховцев, А.В. Тринев, А.Н. Авраменко // Двигатели внутреннего сгорания. Научно-технический журнал. – 2007. – № 1. – С. 20-30.
8. Гоц А.Н. Моделирование теплонапряженного состояния головки цилиндров тракторного дизеля / А.Н. Гоц, М.П. Прыгунов // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 10. – С. 19-23.
9. Абызов О.В. Численное исследование гидродинамики и теплообмена в полостях охлаждения головки цилиндров дизеля / О.В. Абызов, Ю.В. Галышев, А.Ю. Шабанов // Двигателестроение. – 2014. – № 2. – С. 8-10.
10. Чайнов Н.Д. Расчет согласованных стационарных полей температур узла крышка цилиндра-клапаны двигателя внутреннего сгорания / Н.Д. Чайнов, С.Ю. Руссинковский // Двигателестроение. – 2014. – № 2. – С. 3-7.
11. Чайнов Н.Д. Численное моделирование движения жидкости в полости охлаждения крышки цилиндра среднеоборотного дизеля / Н.Д. Чайнов, Л.Л. Мягков, Н.С. Маластовский // Грузовик. – 2015. – 5. – С. 4-8.
12. Гришин Д.К. Математическое моделирование теплового состояния головки высокооборотного малоразмерного дизеля с непосредственным впрыскиванием / Д.К. Гришин, П.Р. Вальехо Мальдонадо, Н.Д. Чайнов, В.А. Лодня // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – 8. – С. 28-30.
13. Романов В.А. Расчетная оценка тепловых напряжений картера дизельного двигателя промышленного трактора / В.А. Романов // Наука ЮУрГУ: материалы 63-й научной конференции. Секция естественных наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2011. – С. 61-65.
14. Романов В.А. Расчетная оценка нагруженности картера дизельного двигателя промышленного трактора / В.А. Романов, В.С. Мурзин, С.Б. Сапожников, Н.А. Хозенюк // Сборник научных трудов международной конференции Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – С.71-75.
15. Романов В.А. Оценка работоспособности коренных подшипников двигателя внутреннего сгорания с учетом теплового деформирования элементов блок-картера / В.А. Романов, Н.А. Хозенюк // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – №3. – С. 23-26
16. Rozhdestvensky Y. Modeling of the main bearings of a multi-supporting crankshaft of the internal combustion engine / Y. Rozhdestvensky, N. Khozeniuk, A. Mylnikov, I. Levanov, V. Romanov // 5th World Tribology Congress, WTC 2013. – 2013. – P. 1825-1828.
17. Онищенко Д.О. Моделирование теплового состояния крышки цилиндра и клапанов дизеля / Д.О. Онищенко, С.А. Панкратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2013. – № 4. – С. 94-108.
18. Кавтарадзе Р.З. Моделирование процессов в системе «впускной коллектор-цилиндр» авиационного поршневого двигателя с распределенным впрыскиванием топлива / Р.З. Кавтарадзе, А.А. Зеленцов, Д.О. Онищенко, Л.А. Финкельберг, А.Н. Костюченков // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 3-15.
19. Финкельберг Л.А. Расчетно-экспериментальная оценка надежности цилиндропоршневой и кривошипно-шатунной групп авиационного поршневого двигателя // Двигатель. – 2014. – № 6(96). – С. 2-7.
20. Wagner W., Kruse A. The Industrial Standard IAPWS-IF97: Properties of Water and Steam, Springer, Berlin. 1998.



# **Influence of Cooling Conditions on the Stress-Strain State of the Cylinder Head for the Forced Diesel**

Romanov V.A., Lazarev E.A., Khozeniuk N.A.  
South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[r.v@live.ru](mailto:r.v@live.ru)

*Abstract.* There was built model for comparative assessments of the heat balance, heat and stress-strain state for the head and cylinder liner of forced diesel engine, which takes into account the redistribution of the quenching fluid between the cylinder head and crankcase. Computational experiments were performed. The trade-off approach of the design for the cooling system of a diesel engine was shown: improving the cooling of the cylinder head is accompanied by a deterioration of the thermal state of the crankcase and the cylinder liner.

*Keywords:* diesel engine, cylinder head; crankcase; cylinder liner; cooling system; redistribution of coolant; FEA; thermal stress

# Применение радиальной ковки и прокатки-ковки при производстве заготовок и профилей из специальных сплавов

Коваль Г.И.

Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[koval.gi@mail.ru](mailto:koval.gi@mail.ru)

Закарлюкин С.И.

ООО Научно-производственное предприятие  
«МЕТЧИВ»  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[metchiv@mail.ru](mailto:metchiv@mail.ru)

**Аннотация.** Представлены результаты разработки запатентованных новых технологических и конструкторских решений применительно к радиально-ковочным машинам и прокатно-ковочным станам. Отмечены достоинства радиально-ковочных машин при получении заготовок и профилей переменного по длине сечения из специальных сплавов. Показаны конкурентные преимущества по стоимости оборудования и эксплуатационным затратам прокатно-ковочных станов по отношению к радиально-ковочным машинам при получении заготовок и профилей постоянного по длине сечения из специальных сплавов.

**Ключевые слова:** радиально-ковочные машины, прокатно-ковочные станы, новые способы радиальнойковки и шаговой прокатки, пластическая деформация специальных сталей и сплавов.

При пластической деформации слитков и заготовок из специальных сплавов в зависимости от размеров поперечного сечения, особенностей обрабатываемых материалов в основном применяют прессование, ковку и прокатку.

Значительным прогрессом в обработке давлением слитков и заготовок специальных сплавов явилось применение радиальнойковки, суть которой заключается в одновременной или попарной деформации заготовки четырьмя бойками, совершающими возвратно-поступательное перемещение в направлении перпендикулярном осиковки. При этом деформируемая заготовка удерживается по осиковки одним или одновременно двумя манипуляторами, перемещается ими вдоль осиковки и, в случае необходимости, поворачивается вокруг этой оси непрерывно или циклически.

В последнее время австрийской фирмой GFM разработан ряд новых модификаций радиально-ковочных машин типа SKK и RF.

ООО НПП «МЕТЧИВ» (г. Челябинск) ввела в эксплуатацию радиально-ковочную машину SKK-14, имеющую широкие технологические возможности и предназначенную для получения сплошных и полых сортовых профилей постоянного и переменного по длине сечения путем горячей и холодной пластической деформации.

Основные технические данные РКМ SKK-14:

- максимальный диаметр заготовки, мм – 150;
- максимальный исходный размер квадрата, прямоугольника с закругленными кромками, мм – 110;
- минимальный диаметр исходной заготовки, мм – 50;
- минимальный диаметр готовой поковки, мм – 30;
- максимальная длина готовой поковки, мм – 6000;

- максимальное усилиековки, кН – 2000;
- число ходов бойков в минуту – 800;
- число бойков, шт – 4;
- ход бойка, мм – 10;
- диапазон радиальной регулировки бойка, мм – 90;
- мощность привода ковочного блока, кВт – 200;
- число зажимных головок-манипуляторов, шт – 2;
- скорость перемещения зажимной головки манипулятора, мм/с – 5...500.

Ограниченное технологическое обеспечение введенной в эксплуатацию РКМ SKK-14, отсутствие в ее составе вспомогательного оборудования, включающего участки нагрева металла перед деформацией, его охлаждения послековки со средствами механизации работ на этих участках потребовало решения комплекса технологических вопросов, выполнения конструкторских и проектных разработок.

ООО НПП «МЕТЧИВ» при активном творческом участии Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) в процессе освоения технологииковки круглых, квадратных, прямоугольных и шестигранных сортовых профилей постоянного и переменного по длине сечения из специальных сплавов черных и цветных металлов разработан комплекс новых технических решений по технологии радиальнойковки, технологическому инструменту и оснастке. Одновременно выполнен ряд конструкторских разработок по созданию вспомогательного оборудования участков нагрева, охлаждения и транспортировки металла, а также проектных работ с оригинальной компоновкой разработанного оборудования с ковочным блоком, манипуляторами и нагревательными устройствами.

В состав выполненных разработок входят:

- новые способы радиальнойковки шестигранных профилей [1-3];
- новый способ радиальнойковки, обеспечивающий одновременно с ковкой правку готовых профилей [4];
- новая технология получения полосовых профилей, обеспечивающая варьирование поперечной деформацией при получении полос разной ширины;
- рекомендации по скоростным режимам манипуляторов, обеспечивающие управление осевыми усилиями в деформируемой заготовке;
- новый способ радиальнойковки полых шестигранных профилей для изготовления гаек;
- новый способ радиальнойковки заготовок для изготовления болтов с шестигранной головкой;
- универсальная технология радиальнойковки винтовых профилей;

- рабочий инструмент (бойки) для всего диапазонаковки круглых, полосовых, квадратных и шестигранных профилей, обеспечивающего расширение сортамента, повышение производительности и качества готовых профилей;

- конструкции направляющих люнетов для трех вариантов технологического применения, обеспечивающие центрирование деформируемой вращающейся и возвратно-поступательно перемещающейся заготовки вдоль осиковки [5];

- разработка конструкторской документации на транспортный участок, включающий универсальный упор-сбрасыватель, трайбаппарат, поворотные рольганги;

- разработка конструкторской документации на участок поштучной подачи заготовок к индукционному нагревательному устройству, включающий устройства для гравитационной однорядной раскладки заготовок и поштучной перекладки их на приемный рольганг с трайбаппаратом индукционного нагревательного устройства.

- разработка и реализация проектной документации на новую универсальную компоновку оборудования технологического комплекса, особенностью которого является использование одновременно двух нагревательных устройств: методической печи для нагрева короткомерных слитков и заготовок по специальному температурному режиму и устройства для индукционного нагрева и подогрева длинномерных заготовок по произвольному технологическому режиму [6].

На все выполненные разработки получены патенты РФ или поданы заявки на изобретения.

Выполненные разработки в настоящее время используются ООО НПП «МЕТЧИВ» при производстве заготовок и готовых профилей постоянного и переменного по длине сечения из специальных сталей и сплавов черных и цветных металлов, включая машиностроительные, жаропрочные, жаростойкие, инструментальные, коррозионно-стойкие и т.п.

Однако, как показал многолетний опыт, использование автоматизированных радиально-ковочных машин более эффективно при ковке профилей переменного по длине сечения.

Для решения задач обработки давлением слитков и заготовок из специальных металлов и сплавов с получением заготовок и готовых профилей постоянного по длине сечения более простыми, производительными способами и оборудованием в ЮУрГУ разработаны прокатные станы с качающимися валками, названные прокатно-ковочными станами, реализующими принцип шаговой прокатки. Станы обеспечивают высокую вытяжку за проход при четырехсторонней деформации.

На основе результатов многолетних исследований технологии шаговой прокатки, проведения опытно-конструкторских разработок создан ряд промышленных прокатно-ковочных станов [7], технические данные которых приведены ниже в табл. 1. Конструкция прокатно-ковочных станов, методы их расчета и технология прокатки с их использованием постоянно совершенствуются [8-10].

В связи со сложившимися в последнее время экономическими условиями прокатно-ковочные станы могут найти более широкое промышленное применение и составить конкуренцию радиально-ковочным машинам по стоимости оборудования и эксплуатационным затратам.

Таблица 1

Технические данные прокатно-ковочных станов

Тип стана	СШ 175	СШ 200	СШ 280	ПК 600
Размеры исходной заготовки, мм:				
• поперечное сечение:				
– круг диаметром	до 60	до 70	до 90	до 200
– квадрат со стороной	до 40	до 50	до 70	до 160
• длина	до 500	до 1000	до 1500	до 2000
Минимальные размеры получаемых профилей, мм:				
• поперечное сечение:				
– круг диаметром	20	30	35	80
– квадрат со стороной	20	30	35	80
– шестигранник	20	30	-	-
Число валков	3, 4	3, 4	4	4
Число ходов клетки в минуту	60...70	60...70	60-80	40...60
Длина готового профиля за один ход клетки, мм	30	35	50	100
Габариты стана, мм:				
– длина	7650	8150	1600	12910
– ширина	2250	2250	5000	8420
– высота	1450	1450	1800	2700
Масса оборудования, т	10	12	32	100
Установленная мощность электродвигателей, кВт	75	125	350	1700

## ЛИТЕРАТУРА

1. Закарлюкин С.И., Коваль Г.И. Способ радиальнойковки // Патент России № 2538132. 2015. Бюл. №1.
2. Закарлюкин С.И., Коваль Г.И., Закарлюкина Е.А. Способ радиальнойковки шестигранных профилей // Патент России № 2541238. 2015. Бюл. №4.
3. Закарлюкин С.И., Коваль Г.И. Способ радиальнойковки шестигранных профилей // Патент России № 2538129. 2015. Бюл. №1.
4. Закарлюкин С.И., Коваль Г.И. Способ радиальнойковки шестигранных профилей // Патент России № 2538130. 2015. Бюл. №1.
5. Коваль Г.И., Закарлюкин С.И., Каримова Т.Г. Центрователь // Патент России № 2562587. 2015. Бюл. №25.
6. Закарлюкин С.И. Технологический комплекс производства сплошных и полых поковок постоянного и переменного по длине сечения из специальных металлов и сплавов / С.И. Закарлюкин, Г.И. Коваль, Е.А. Закарлюкина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2014. – Т. 14, №1. – С. 73-78.
7. Коваль Г.И. Применение прокатно-ковочных станов для получения сортового проката из специальных сплавов черных и цветных металлов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – №7. – С. 33-36.
8. Коваль Г.И., Каримова Т.Г. Способ шаговой прокатки // Патент России № 2521764. 2014. Бюл. №19.
9. Коваль Г.И. Расчет параметров валков прокатно-ковочных станов / Г.И. Коваль, Т.Г. Каримова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – №6. – С. 26-29.
10. Коваль Г.И. Исследование кинематики рычажных механизмов привода валков станов шаговой прокатки / Г.И. Коваль, Т.Г. Каримова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13, №1. – С. 155-159.

# Use of Radial Forging and Rolled Forging in the Production of Billets and Profiles, Made of Special Alloys

Koval G.I.

South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[koval.gi@mail.ru](mailto:koval.gi@mail.ru)

Zakarlyukin S.I.

Research-and-Production Enterprise «METCHIV»  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[metchiv@mail.ru](mailto:metchiv@mail.ru)

*Abstract.* The article presents the results of the development of patented new technologies and design solutions applied to the radial forging machine, and rolled forging mills. Advantages of radial forging machine when receiving workpieces and profiles of cross-section, variable along the length, made of special alloys are noted. Competitive advantages are shown for equipment and operating costs of rolled forging mills in relation to the radial

forging machine when receiving of blanks and profiles of constant section along the length made of special alloys.

*Keywords:* radial forging machines, rolled forging mills, the new ways of radial forging and step-by-step rolling, the plastic deformation of special steels and alloys.



# Особенности нагружения элементов механизма преобразования движения бескривошипной поршневой машины-двигателя

Шароглазов Б.А., Гофман А.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[G389@mail.ru](mailto:G389@mail.ru), [goffmann@mail.ru](mailto:goffmann@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности (условия) нагружения БПМ с двухпериодной беговой дорожкой, вынесенной за пределы основных элементов цилиндро-поршневой группы. Рассматриваются условия нагружения ЦПГ в сравнении с соответствующими условиями нагружения двигателя с КШМ, анализируются характеристики протекания и численные значения сил, действующих в механизме преобразования движения БПМ. Показывается (методом численного моделирования процессы, протекающие в КС таких машин), что численное значение напряжений, действующих в названном механизме не превышает допустимого значения применительно к условиям реализации цикла со значением  $p_i$  на уровне 0,64 МПа. Делается заключение о целесообразности проведения научно-исследовательских, конструкторских и экспериментальных работ по такого типа машинам.

**Ключевые слова:** двухтактный цикл, бескривошипный двигатель, механизм преобразования движения, беговая дорожка, крутящий момент, действующие нагрузки.

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня в случаях, когда по каким-либо соображениям возникают требования об ограничении массы, габаритов и литража тепловых машин (двигателей), всё больше внимания уделяется двухтактному рабочему циклу, см. например [1], и двигателям с повышенной цикличностью.

Это обстоятельство устойчиво и хорошо прописано в конструктивных схемах значительного числа машин: Revetec [2], Duke Engine [3], Dynacam engine (Axial Vector Engine) [4], двигатель Баландина [5, 6], роторный Ванкеля [7].

Этой задачей на протяжении значительного отрезка времени занимаются преподаватели и сотрудники кафедры Двигателей внутреннего сгорания «ДВС» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), см. в частности [8-11]. К одним из результатов работы относится конструктивная схема бескривошипной поршневой тепловой машины-двигателя (БПМ) (рис. 1), работающий по двухтактному циклу. Как следует из названия, двигатель не содержит кривошипно-шатунного механизма (КШМ): возвратно-поступательное движение поршня непосредственно преобразуется во вращательное движение грузового вала.

## ОПИСАНИЕ БПМ

Поршень выполнен осесимметричным и соединён с механизмом преобразования движения штоком 2. Верхняя головка штока закреплена в подшипнике, установленном на внутренней поверхности днища поршня, а нижняя

часть штока жёстко соединена с кареткой 3 механизма преобразования движения. В каретке расположена ось 4, на цапфах которой расположены подшипники качения, опирающиеся на беговую дорожку механизма преобразования движения. Одна из поверхностей беговой дорожки выполнена на нижней торцевой поверхности верхней части цилиндрической вставки 6 корпуса, а другая – на верхней торцевой поверхности нижней части цилиндрической вставки корпуса. Ступенчатый выходной вал (грузовой вал) связан с поршнем через каретку механизма преобразования движения (МПД). Верхняя часть грузового вала выполнена в виде двухрождковой вилки. Каретка 3 имеет возможность перемещаться вдоль паза, образованного рождками вилки вала.

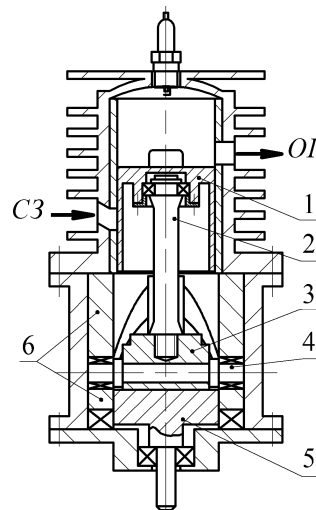


Рис. 1. Схема бескривошипного двухтактного двигателя с вращающимся грузовым валом: 1 – поршень; 2 – шток; 3 – каретка механизма преобразования движения; 4 – ось каретки; 5 – выходной (грузовой) вал; 6 – вставки

Выполнение поршня осесимметричной формы и соединение его через упорный подшипник посредством штока с кареткой механизма преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращательное движение грузового вала обеспечивает в период реализации РЦ снижение тепловых и механических деформаций поршня. Грузовой вал воспринимает и передаёт только вращение. Кроме уже названных преимуществ рассматриваемой конструктивной схемы, такая ТМ обладает и рядом других. Например, поршень машины не подвергается дей-

ствию так называемой нормальной силы, характерной для двигателей с КШМ. Вектор этой силы (в ДВС с КШМ) направлен перпендикулярно поверхности цилиндра. И так как линия действия этого вектора в течение цикла меняет знак, в двигателях с КШМ имеют место колебания (перекладка поршня) между стенками цилиндра в плоскости, проходящий через ось стержня шатуна и перпендикулярной, оси коленчатого вала. Это обстоятельство повышает затраты (в двигателях с КШМ) на преодоление трения поршня о стенки цилиндра.

Осесимметричная конструкция поршня (цилиндрический профиль направляющей части, отсутствие бобышек для установки пальца) позволяет использовать более простую технологию его изготовления. Симметричность конструкции, при прочих равных условиях, приводит к уменьшению уровня тепловых и механических нагрузок, снижению габаритов и массы.

### Принцип действия БПМ

Для сопоставительной оценки на рис. 2 приведена типовая схема двигателя с КШМ и сил, нагружающих его основные элементы.

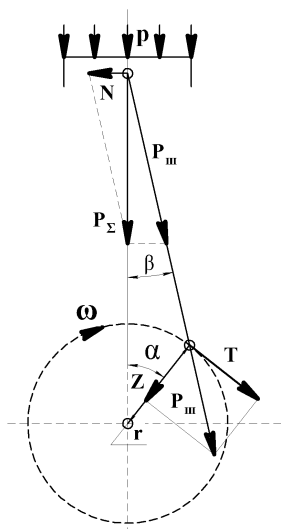


Рис. 2. Схема двигателя с КШМ и сил, нагружающих его элементы:  $p$  – давление газов;  $N$  – нормальная сила;  $P_{\Sigma} = P_e + P_j$  (алгебраическая сумма);  $P_j$  – сила инерции возвратно-поступательно движущихся масс;  $P_{ш}$  – сила, действующая вдоль шатуна;  $T$  – тангенциальная сила.

В двигателе с КШМ возвратно-поступательное движение поршня преобразуется во вращательное коленчатого вала вследствие воздействия силы  $T$  на кривошипную (шатунную) шейку коленчатого вала. Это, в свою очередь, требует наличия качающегося (и одновременно возвратно-поступательно движущегося) шатуна.

В БПМ формирование вращательного движения грузового вала (каретки) обеспечивается тем обстоятельством, что воспринимание кареткой силы, действующей вдоль оси штока, передаётся на ролики (подшипники), установленные на цапфах её оси, что побуждает их (ролики) перемещаться (катится) по волнообразной (например, синусоидальной) поверхности беговой дорожки, образуемой криволинейными торцевыми поверхностями втулок (вставка б), установленных в корпусе БПМ. А так как беговая

дорожка замкнутая, то это обстоятельство обеспечивает вращение каретки (и, соответственно, грузового вала).

Сказанное, применительно к БПМ с двухпериодной беговой дорожкой, можно пояснить приводимой схемой, рис. 3. На схеме показан профиль (развёртка) беговой дорожки (точнее – развёртка боковой поверхности втулки, на торце которой расположена дорожка), схема каретки с установленными на цапфах оси каретки (ось на рисунке не показана) роликами, контактирующими с дорожкой. Она (схема) в полной мере соответствует конструктивной схеме БПМ: если схему свернуть (совместить ВМТ, отвечающую положению  $\alpha = 360$  град., с линией ВМТ, соответствующей  $\alpha = 0$  град.), получим цилиндр, по боковой поверхности которого, по линии беговой дорожки, катятся ролики, каретка, вследствие этого вращается и, одновременно, совершает возвратно поступательное движение. Схема относится к периоду цикла, соответствующего начальной фазе протекания сгорания и начальной фазе рабочего хода. Применительно к этому периоду (началу названной фазы) на схеме отмечены силы, действующие в механизме преобразования движения.

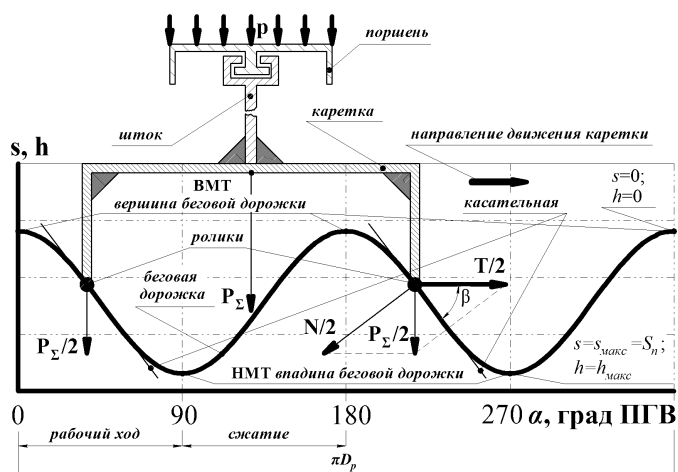


Рис. 3. Принципиальная схема БПМ (двигателя, показанного применительно к конструктивной схеме, приведённой на рис. 1) и сил, действующих в механизме преобразования движения:  $s$  – перемещение поршня ( $S_{\max}$  соответствует положению поршня в НМТ,  $\alpha = 90$  град. ПГВ);  $N$  – сила, действующая по нормали к опорной поверхности беговой дорожки;  $D_p$  – средний диаметр втулки, на которой выполнена беговая дорожка.

Анализ приведённых на рис. 1-3 схем позволяет отметить важную особенность рассматриваемой схемы БПМ. Она в том, что в такой схеме поршневой машины поршень и шток нагружены усилиями, действующими только в вертикальной плоскости. Это даёт основания для упрощения их конструктивных схем: поршень, как и шток может быть выполнен осесимметричным, с укороченной направляющей частью. Это, в свою очередь, создаёт условия для улучшения тепломеханических характеристик механизма преобразования движения.

### Крутящий момент в БПМ

Из анализа схемы движения с КШМ (рис. 2) очень легко вытекает механизм формирования крутящего момента

( $M = T \cdot r$ ;  $T$  – сила, называемая тангенциальной,  $r$  – радиус кривошипа). В БПМ формирование крутящего момента несколько сложнее: сила  $P_{\Sigma}$  распределяется на два потока, каждый из которых нагружает соответствующие ролики механизма преобразования движения. В каждой из  $P_{\Sigma}/2$  можно выделить две составляющие:  $N/2$  – нормальную, действующую перпендикулярно опорной поверхности беговой дорожки, и  $T/2$  (по аналогии с силой  $T$ , действующей в КШМ, назовём её тангенциальной), линия действия которой перпендикулярна осям поршня и штока МПД, см. рис. 3. Эти силы ( $T/2$ ) обеспечивают вращение каретки и грузового вала двигателя: создают индикаторный вращающий момент  $M = T/2 \cdot D_r/2 \cdot 2 = T/2 \cdot D_r$

Определение названных сил ( $P_{\Sigma}, T, N$ ), и соответствующих численных значений моментов  $M$ , требуют детализированного расчёта параметров рабочего цикла машины. Методология решения этой задачи (расчёт текущих параметров цикла) применительно к кривошипно-шатунным механизмам подробно освещены в технической литературе, см. например [12-17]. Есть работы, в которых рассматриваются методы расчёта бескривошипных и бесшатунных машин, например [5, 18-20]. К одной из них относится недавно опубликованная работа авторов [10]. В ней достаточно подробно излагается метод определения текущих параметров рабочего тела и показателей цикла бескривошипной поршневой тепловой машины (двигателя) с двухпериодной беговой дорожкой.

Названное обстоятельство позволяет в рамках данной работы не излагать особенностей определения текущих параметров рабочего цикла, но в большей степени обратить внимание читателя на особенности определения параметров и нагрузок, действующих в МПД бескривошипной машины.

Таким образом, будем полагать, что характер перемещения  $s$  поршня бескривошипного двигателя с двухпериодной синусоидальной беговой дорожкой следует зависимости

$$s = \frac{S_n}{2} \cdot (1 - \cos 2\alpha), \quad (1)$$

в которой  $S_n$  – полное перемещение (ход) поршня,  $\alpha$  – текущий угол поворота грузового вала, сочленённого с кареткой МПД, см. рис. 1. В качестве начальной точки изменения  $\alpha$  принимается значение  $\alpha$ , соответствующее положению поршня в НМТ ( $\alpha = 90$  град. ПГВ;  $s = s_{\max} = S_n$ ) см. рис. 3. Характер изменения  $s$  на рисунке отмечены интервалом.

Так как значению  $\alpha = 90$  град. ПГВ соответствует положению поршня в НМТ ( $s = S_n$ ), то ролики МПД (в этот момент) находятся во впадинах беговой дорожки. А характер их перемещения  $h$  по вертикали определяет характер движения поршня. Иными словами, для  $h$  справедливо (1):

$$h = \frac{S_n}{2} \cdot (1 - \cos 2\alpha). \quad (2)$$

Как уже было отмечено, для любого (произвольного по  $\alpha$ ) момента цикла могут быть известны текущие параметры состояния рабочего тела в цилиндре (в частности давление  $P_T$  как функция  $\alpha$ ), то оказывается возможным с использованием (1) и (2), определить численные значения сил, действующих в МПД. В частности, сил  $P_r, P_j, P_{\Sigma}, T, N$ .

Силы  $T$  и  $N$  ( $T/2$  и  $N/2$ , отмеченные на рис. 3) могут быть определены графоаналитическим методом, что вы-

текает непосредственно из схемы рисунка (и что достаточно трудоёмко), либо аналитически. И здесь основная задача состоит в нахождении численного значения угла  $\beta$ , ограниченного касательной к линии  $h$ , проведённой в точке приложения  $P_{\Sigma}$ , соответствующей определённому  $\alpha$ , и горизонтальной, проходящей через эту точку.

Эту задачу можно разрешить аналитически, опираясь на  $h=f(\alpha)$ , из (2) следует:

$$\frac{dh}{d\alpha} = \frac{S_n}{2} \cdot (2 \sin 2\alpha) d\alpha. \quad (3)$$

В записанном (3)  $dh$  выполняет роль масштабного фактора, связывающего размерность перемещения ( $S_n$ ) и угла поворота грузового вала (каретки). Он (этот фактор, масштабный коэффициент) можно определить. Полное перемещение поршня  $S_n$  совершается в течение угловой фазы поворота каретки МПД на  $\pi/2$ ; этой фазе соответствует проекция пути, пройденного роликами МПД на горизонтальную плоскость, в линейной оценке равная  $\frac{\pi D_r}{4}$ . Следовательно, численное значение масштабного фактора в (3) составляет  $(\pi/2)/(\pi D_r/4) = 2/D_r$ . И тогда (3) переписывается:

$$\frac{dh}{d\alpha} = tg\beta = \left[ 2 \cdot \frac{S_n}{D_r} \cdot \sin 2\alpha \right]. \quad (4)$$

Отсюда интересующий нас угол  $\beta$  определится как

$$\beta = \arctg \left[ \frac{2 \cdot S_n}{D_r} \cdot \sin 2\alpha \right]. \quad (5)$$

Таким образом, оказывается возможным (с использованием  $s$ ) аналитическое определение сил  $T/2, N/2$  и суммарного индикаторного крутящего момента двигателя:

$$\frac{T}{2} = P_{\Sigma}/2 \cdot tg\beta, \quad N/2 = \frac{P_{\Sigma}/2}{\cos\beta}, \quad M = T \cdot r.$$

#### РАСЧЕТ ДЕЙСТВУЮЩИХ НАГРУЗОК В БПМ

Рассмотрим пример использования описанных средств для численной оценки параметров, характеризующих нагрузки бескривошипного двигателя применительно к возможным реальным условиям использования. Пусть известны основные конструктивные параметры машины, определённые типовым расчётом: диаметр цилиндра  $D$ , полный ход поршня, степень сжатия  $\epsilon$ , параметры, характеризующие режим нагрузки (коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , частота вращения и др.). Численные значения этих параметров составляют (для нашего примера),  $D = 58$  мм;  $S_n = 60$  мм;  $\epsilon = 7,5$ ;  $\alpha = 0,87$ ;  $n = 2250$  мин<sup>-1</sup>. Расчётом получена « $p$ - $\alpha$ » индикаторная диаграмма цикла, рис. 4. На этом же рисунке приведён характер протекания хода  $s$ , скорости  $v$  и ускорения  $j$  поршня.

Результаты теплового расчёта (в частности  $D, S_n$ , максимальное  $p$  давление цикла) позволяет сделать предварительную оценку нагрузок МПД (например,  $P_{r, \max}, P_{j, \max}, P_{\Sigma, \max}$ ), произвести выбор материалов (поршня, штока, каретки МПД и её оси), выполнить эскизное проектирование основных деталей (определить их размеры и массу). Для рассматриваемого примера (с учётом данных, приведённых на рис. 4) результаты таких предварительных действий отображены в табл. 1.

Содержание рис. 4 и параметры, приведены в табл. 1, позволяют установить характер изменения  $P_r, P_j, P_{\Sigma}, T, N, \beta, M$  в течении цикла, рис. 5. Полученные результаты расчёта дали возможность (с использованием известных методов [21-23]) численно выявить напряжения, действующие в основных элементах МПД, табл. 2.

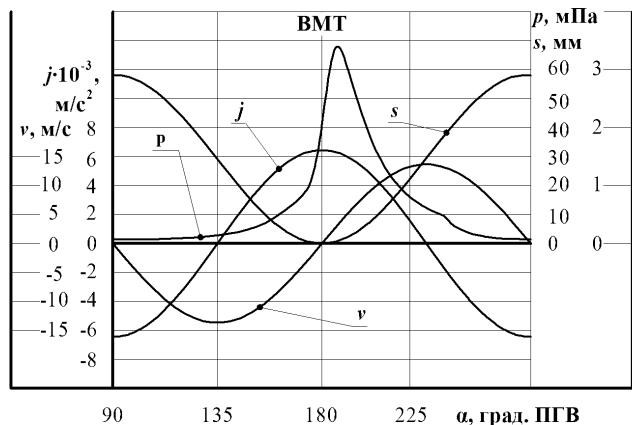


Рис. 4. Характер протекания кинематических параметров в цикле бескривошипного двухтактного двигателя с двух-периодной беговой дорожкой, применительно к условиям полного перемещения поршня ( $S_n = 58$  мм) и продолжительности цикла ( $t_u = 0,013$  с).

Таблица 1  
Смоделированные массы деталей

Тип механизма	Масса детали, г						$m_{\Sigma}$
	поршень	Поршневой палец	Шток/шатун	каретка	ось	ролики	
БПМ	214,44	—	64,5	145,33	53,55	2*14,15	506,1
КШМ	224,48	30,74	87,4	—	—	—	295,1

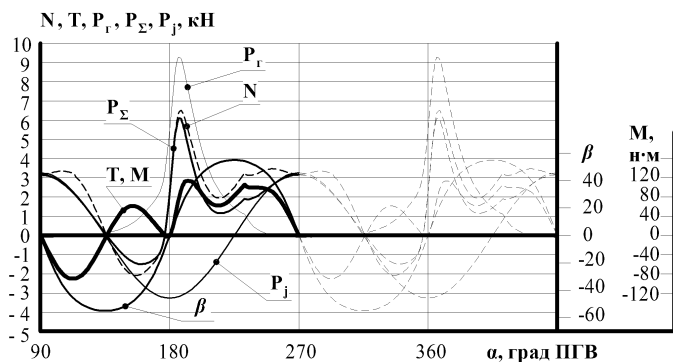


Рис. 5 Силы и момент, нагружающие МПД БПМ

Таблица 2  
Численные значения напряжений, действующих в МПД

Наименование детали	Вид нагружения	Значение напряжения, МПа	Материал	Предел текучести материала, МПа
поршень	Изгиб днища	25,937	АЛ-8	170
шток	сжатие	71,4	40Х	1100 (закалка с охлаждением в масле, 48 HRC)
ось каретки	изгиб	259,21		
беговая дорожка	контактное сжатие	959,4		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведённый материал позволяет сделать заключение о том, что в бескривошипном поршневом двигателе условия работы ряда наиболее важных деталей (например,

поршня, гильзы цилиндров, штока МПД), оказываются более благоприятными (применительно к сходственным режимам нагружения), чем в двигателях с кривошипно-шатунным механизмом. И ещё раз отметим одно из важных достоинств такого типа двигателей: отсутствие нормальных (боковых) сил, действующих на стенки гильзы и поршня, полная уравновешенность (в случае оппозитного расположения поршней или цилиндров), отсутствие колчатого вала.

ЛИТЕРАТУРА

- Innovations@renault 2014 behind-the-scenes of innovation at Renault (дата обращения 01.09.2015).
- [www.revetec.com](http://www.revetec.com) (дата обращения 01.09.2015).
- <http://www.dukeengines.com> (дата обращения 01.09.2015).
- <http://www.engineeringtv.com/video/AVEC-Axial-Vector-Engine> (дата обращения 01.09.2015).
- Баландин С.С. Бесшатунные двигатели внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1982. – 368 с.
- Чистяков В.К. Динамика поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1989.
- Wankel F. Rotary piston machines. – ILIFFE BOOKS LTD, 1965.
- Шароглазов Б.А., Пономарёв А.В., Иванов Г.И. Бесшатунный двигатель внутреннего сгорания // Патент России № 2054978 С1, 6 F01 В 9/6, F02 В 75/32. 1999. Бюл. № 10.
- Шароглазов Б.А., Терехов С.Ю., Колбин И.И. Бескривошипная поршневая тепловая машина-двигатель // Патент России №2460890 С1, F02В 75/26, F02В 75/32, F01В 9/0. 2012. Бюл. № 25.
- 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. – 70 с.
- Шароглазов Б.А. Поршневая тепловая машина для преобразования энергии и производства работы на транспорте / Б.А. Шароглазов, А.В. Гофман // Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение. – 2014. – Т. 14, № 1. – С. 7.
- Wiebe I.I. Brennverlauf und Kreisprozeß von Verbrennungsmotoren. – Berlin: Vebverlagstechnik, 1970. – 275 p.
- Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 720 с.
- Дьяченко Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания. – Л.: Машиностроение, 1974. – 552 с.
- Вырубов Д.Н. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
- Шароглазов Б.А. Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчёт процессов. / Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 525 с.
- Шароглазов Б.А. Автоматизированная оценка численных значений исходных параметров при моделировании процессов в поршневых двигателях / Б.А. Шароглазов



О.Г. Машков, П.Б. Вакенгут // Вестник ЮУрГУ. – 2013. – № 1 (13).

18. Башта Т.М. Объёмные насосы и гидравлические двигатели гидросистем: учеб. для вузов. – М.: Машиностроение, 1974. – 606 с.

19. Логов Л.М. Бескривошипные многоцилиндровые насосы. – М.: Машгиз, 1963.

20. Rudi A. Lang. Basic principles and components of fluid technology. Mannesmann Rexroth GmbH.

21. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. Наука, 1970. – 544 с.

22. Решетов Д.Н. Детали машин: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.

23. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1979. – 696 с.

# Features Loading Elements Motion Conversion Crankless Piston Machine-Engine

Sharoglazov B.A., Gofman A. V.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian Federation

[G389@mail.ru](mailto:G389@mail.ru), [goffmann@mail.ru](mailto:goffmann@mail.ru)

*Abstract.* The article features (terms) with the two-period loading CPM treadmill, placed outside the main elements of the cylinder group. CPG considered loading conditions compared to the corresponding loading conditions to crank the engine, the flow characteristics are analyzed and the numerical values of the forces acting in the motion conversion CPM. It is shown (by numerical simulation of processes occurring in the COP of these machines) that the numerical value of the stresses acting in the said mechanism does not exceed the permissible value in relation

to the conditions of implementation of the cycle with the value of  $p_i$  at 0.64 MPa. The conclusion on the feasibility of the research, design and experimental work on this type of machine.

*Keywords:* a two-stroke cycle, engine crankless, the motion conversion mechanism, the treadmill, the torque, load action.

# Обоснование параметров и режимов работы устройства тепловой комфортности оператора мобильной машины

Глемба К.В., Аверьянов Ю.И.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),  
Южно-Уральский государственный аграрный университет  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[glemba77@mail.ru](mailto:glemba77@mail.ru)

**Аннотация.** Воздействие тепла и холода на организм человека приводит к снижению его защитных сил и резервных возможностей. Производительность труда специалистов операторского профиля снижается на 25-55 % при возрастании температуры окружающей среды до 28-31 °С. Доказано, что между температурным режимом и работоспособностью человека существует высокий уровень корреляции. Процесс формирования теплового состояния организма человека-оператора в кабинах мобильных машин автотракторной техники остается недостаточно изученным. На основе теоретических исследований были определены основные факторы, влияющие на процесс формирования теплового состояния организма человека, обоснованы схема и конструктивные параметры предлагаемого локального терморегулирующего устройства. Существует зависимость мощности теплового потока от толщины одежды оператора, от расстояния тела человека-оператора до локального устройства и т.п. При исследовании получены экспериментальные зависимости между показателем теплового состояния (теплоощущением) человека-оператора, параметрами микроклимата в кабинах мобильных машин и режимами работы устройства. Экспериментальные исследования проводились в климатической камере, созданной на базе унифицированной кабины. Экспериментально определено значение плотности мощности теплового потока. Оно составило 486 Вт, что позволит оптимально рассчитать конструктивные и режимные параметры предлагаемого устройства.

**Ключевые слова:** оператор мобильных машин; термокомфортность; кондукция; терморегуляция; теплоощущения; микроклимат; мощность теплового потока.

## ВВЕДЕНИЕ

Уровень условий и безопасности труда на рабочем месте операторов автотракторной техники (АТ) во многом определяет ее спрос и конкурентноспособность на рынке. Повышение мощности и усложнение систем управления современными мобильными машинами (ММ) вызывают необходимость поиска новых решений в создании комфортных условий труда человека-оператора. Характер и степень снижения работоспособности человека определяются тепловым состоянием его организма и его тепловым содержанием. Ученые утверждают, что при теплосодержании в организме 128 кДж/кг высокая работоспособность сохраняется в течение 6 ч и снижается на 10-20 %, но при повышении её до 129-131 кДж/кг работоспособность уменьшается за то же время на 30-45 %. В охлаждающем микроклимате причиной снижения работоспособности может быть увеличение массы одежды. Так, при

увеличении массы одежды с 4,3 до 6,5 кг повышаются энергозатраты на 18 % для выполнения одной и той же работы. Воздействие тепла на организм человека в условиях нагревающего микроклимата приводит к снижению его защитных сил и резервных возможностей. Холод же оказывает влияние на деятельность сердечно-сосудистой системы, артериальное давление, развивается вегетососудистая дистония, обостряются хронические заболевания. Производительность труда специалистов операторского профиля снижается на 25-55 % при возрастании температуры окружающей среды до 28-31 °С. При этом, чем ниже квалификация работников, тем значительно снижается производительность [1-6].

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Влиянию микроклимата на состояние здоровья операторов в кабинах ММ посвящено значительное количество исследований. Термокомфортность человека является одним из основных факторов, характеризующих условия производственной среды, самочувствие и здоровье, степень удовлетворенности трудом и работоспособность. Доказано, что между температурным режимом и работоспособностью человека существует высокий уровень корреляции. Установлено, что у людей, выполняющих работу средней тяжести с энергозатратами 313 Вт (40 мин. работа, 20 мин. отдых) в условиях нагревающего микроклимата происходит выраженное снижение работоспособности, особенно при термическом воздействии. Решение задач обеспечения термокомфортного состояния человека-оператора в кабинах ММ является достаточно сложной проблемой. Устройства искусственного микроклимата должны отвечать требованиям простоты конструкции, невысокой стоимости изготовления, возможности обслуживания персоналом низкой квалификации, они должны обеспечивать расчетные условия при постоянно меняющихся режимах работы машин. Частичное снижение температуры воздуха в кабине за счет естественной вентиляции ведет к увеличению скорости движения воздуха и накоплению в ней пыли. В настоящее время многочисленными экспериментальными исследованиями установлено однозначно отрицательное влияние неблагоприятных микроклиматических условий на производительность труда человека [7-25].

Изучению процесса формирования теплового состояния организма человека в условиях промышленных помещений посвящен ряд работ. Однако процесс формиро-

вания теплового состояния организма человека-оператора в помещениях малого замкнутого объема, таких, например, как кабины ММ остается недостаточно изученным. Это затрудняет не только контроль теплового состояния (термокомфортности) человека в кабине ММ и оценку эффективности средств нормализации микроклимата при их выборе, испытании и эксплуатации, но и разработку новых способов и средств обеспечения термокомфортного состояния человека-оператора [5-6].

За последнее время на основе принципов теории управления был разработан ряд моделей регуляции температуры человека. В этих моделях тело человека представляется в виде геометрических сегментов, каждый из которых подразделяется на ряд слоев и компартментов. Для описания пассивной системы терморегуляции используются уравнения теплового баланса каждого компартмента с учетом энергообмена поверхности кожи с окружающей средой. На основе установленных опорных температур для каждого компартмента в системе формируются управляющие сигналы, позволяющие изменять физиологические реакции в процессе воздействия различных факторов среды, физической нагрузки и тепловой защиты. Наиболее широкое признание среди моделей системы терморегуляции человека получила модель J.A.J. Stolwijk, предназначенная для исследования терморегуляторных реакций организма в области положительных температур. Эта модель оказалась наиболее приемлемой для интервала температур окружающего воздуха 25-48 °С. Модель имеет сложную систему формирования сигналов управления и их распределения с учетом отклонения значений температуры каждого компартмента от опорного уровня. Исследователи получили важную информацию при использовании математического моделирования для описания теплового режима организма. Так, А.Р. Gagge и соавторы используя две компартментальные модели разработали индекс эффективной температуры, нашедший применение в практике оценки физиологического напряжения организма при воздействии теплового фактора среды. В процессе анализа математических моделей, описывающих процесс формирования теплового состояния организма человека, установлено, что некоторые авторы не учитывают или пренебрегают составляющей теплового баланса – теплопроводностью, то есть кондукцией. Целенаправленное кондуктивное воздействие на определенные участки поверхности тела человека позволит облегчить процесс теплообмена организма с внешней средой при определенных условиях нагревающего или охлаждающего микроклимата. До настоящего времени остается нерешенным вопрос об уровнях и режимах теплового воздействия на организм человека, при котором не происходит перенапряжения механизмов терморегуляции организма и не формируется локальный тепловой дискомфорт. Кондуктивный теплообмен организма человека с контактирующими поверхностями и средствами обеспечения термокомфортности организма человека заслуживает серьезного изучения [1-6, 12-14, 23-25].

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика экспериментальных исследований включала в себя: измерение параметров микроклиматических условий внешней среды и в кабинах ММ АТ, опрос человека-оператора о его тепловом состоянии, т.е. о тепловом

ощущении. Кроме того, фиксировались дата, время, и место проведения исследований, вид выполняемой работы, возраст и одежда человека-оператора, состояние погоды (облачность и солнечная радиация).

Задачи экспериментальных исследований предусматривали получение экспериментальных зависимостей: между показателем теплового состояния (теплоощущением) человека-оператора и параметрами микроклимата в кабинах ММ АТ, обоснование показателей теплового состояния организма (теплосодержания и теплоощущения) человека-оператора с учетом параметров и режимов работы локального терморегулирующего устройства (ЛТУ) в кабине ММ.

Полевые исследования проводились при погодных условиях, характерных для теплого и переходного периода года в регионах Южного Урала и Северного Казахстана. Температура наружного воздуха составляла от 10-31 °С, относительная влажность воздуха – 20-80%, скорость ветра – 0,5-6,0 м/с, облачность – не выше одного-двух баллов. Измерение параметров микроклимата в кабинах АТ проводилось при выполнении ими технологических процессов при загрузке их двигателей на 70 % ( $\pm 15$  %) от номинальной величины. Для исследования подбирались группы людей от 5 до 10 человек в возрасте 20-40 лет, не адаптированных к специфическим условиям труда оператора ММ, выполняющих работы средней тяжести, одетых в летнюю одежду с термическим сопротивлением 0,5-0,6 clo (1 clo = 0,155 м<sup>2</sup>К/Вт) и ознакомленных с модифицированной шкалой балльных оценок тепловых ощущений, характеризующих тепловое состояние оператора. Исследования проводились в течение рабочего времени, параметры микроклимата в кабине ММ измерялись в момент оценки человеком-оператором одного из сформировавшихся у него тепловых ощущений. Замеры параметров микроклимата в кабине ММ проводились в трех точках: у ног, на уровне груди и в зоне дыхания. Повторность замеров – 25-кратная [3-6].

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве критериев оптимизации, отражающих комфортное тепловое состояние организма, были выбраны теплосодержание и теплоощущение человека-оператора, которые могут быть оценены критерием комплексной оценки комфортности условий микроклимата. На основе теоретических исследований были определены основные факторы, влияющие на процесс формирования теплового состояния организма человека, обоснованы схема (рис. 1) и конструктивные параметры ЛТУ – диаметр и шаг трубок (рис. 2). Критериями оценки теплового состояния человека-оператора являлись его теплосодержание  $q_{\text{ч}}$  и теплоощущение  $S_{\text{ч}}$ , характеризующиеся параметрами микроклимата в кабине ММ, а также параметрами и режимами работы ЛТУ. С целью характеристики зон комфортности предлагается ввести понятие критериев комфортности, числовые значения которых можно определить из следующих выражений [1, 2]:

$$k_{ks} = k_s (S_{\text{чФ}} - S_{\text{чН}}) / S_{\text{чН}}, \quad (1)$$

$$k_{kq} = k_q (q_{\text{чФ}} - q_{\text{чН}}) / q_{\text{чН}}, \quad (2)$$

где  $k_{ks}$ ,  $k_{kq}$  – критерии комфортности микроклимата соот-

ветственно за счет оценки теплового ощущения и теплового содержания человека, усл. ед.;  $k_s, k_q$  – нормирующие коэффициенты теплового ощущения и теплового содержания человека, учитывающие перевод величин в условные единицы;  $S_{чф}, S_{чн}$  – фактическая и нормативная величины показателя теплового ощущения человека, балл;  $q_{чф}, q_{чн}$  – фактическая и нормативная величины показателя удельного теплового содержания человека, кДж/кг.

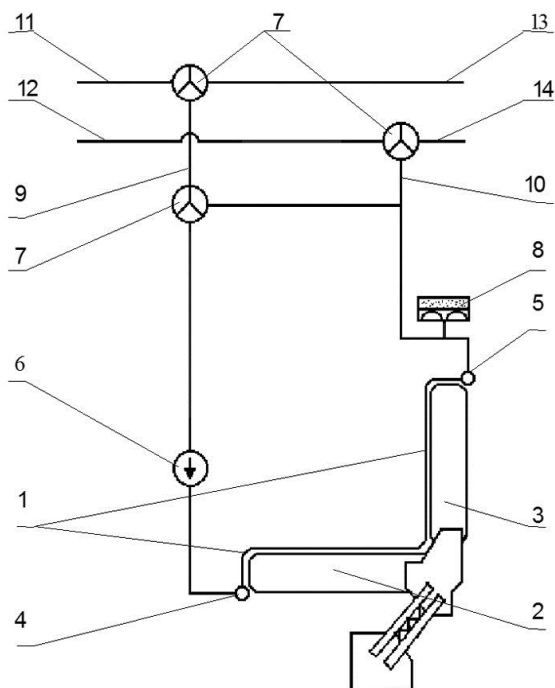


Рис. 1. Схема экспериментального образца локального терморегулирующего устройства: 1 – съемный чехол; 2 – подушка; 3 – спинка; 4, 5 – соответственно коллектор входа и выхода; 6 – насос; 7 – регулятор расхода жидкости; 8 – гидроаккумулятор; 9, 10 – гибкие трубки; 11, 12, 13, 14 – соответственно трубки выхода и входа теплоагрегата и хладоагрегата

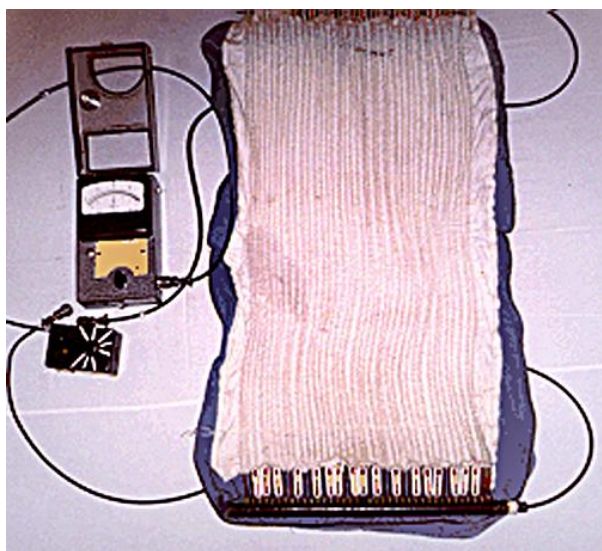


Рис. 2. Локальное терморегулирующее устройство

Экспериментальные исследования проводились в климатической камере, созданной на базе унифицированной кабины ММ АТ [3-6]. В течение всего времени эксперимента параметры микроклимата в климатической камере поддерживались на заданном уровне при закрытых дверях и окнах, и составляли: температура воздуха  $32 \pm 0,5$  °С, относительная влажность воздуха 40-60 % и скорость движения воздуха 0,2-0,4 м/с. Параметры и режимы работы ЛТУ изменялись с учетом методики планирования эксперимента, расход жидкости при её работе не изменялся и составлял 120 л/ч.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективность работы устройства по критерию комфортности, с учетом теплоощущения, зависит от субъективного восприятия условий микроклимата. Существует зависимость мощности теплового потока от таких величин, как зазор между телом человека-оператора и ЛТУ, толщина одежды оператора и т.п. Поэтому необходимо экспериментальное обоснование параметров микроклимата по условию минимальности его абсолютного значения критериев комфортности: режимного – температуры  $t_{ж}$ , °С жидкости и конструктивного – суммарной длины  $L$ , м трубок ЛТУ. Получены зависимости, связывающие эти параметры с такими величинами, как необходимая мощность теплового потока, температура жидкости, ее расход и т.д. (рис. 3). Таким образом, при изменении температуры жидкости в пределах 16-24 °С необходимая суммарная длина трубок будет находиться в пределах 18-23 м.

Наибольший интерес представляет зависимость изменения плотности мощности теплового потока от скорости повышения температуры тела человека (рис. 4), т. к. эта скорость определяет степень комфортности, обеспечиваемую предлагаемым ЛТУ.

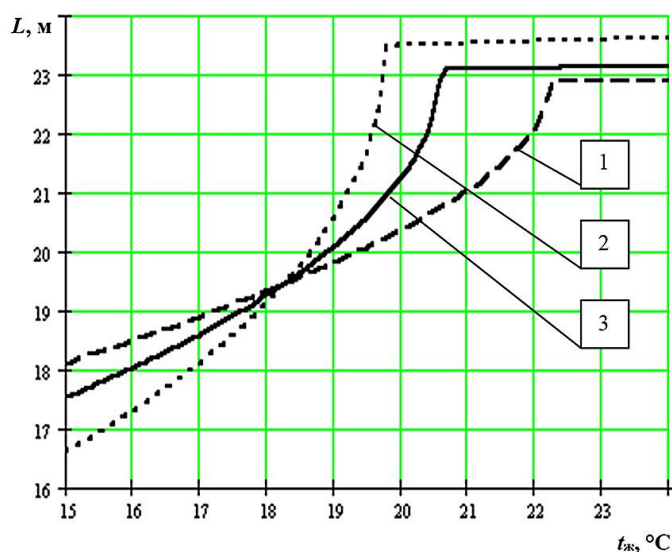


Рис. 3. Зависимости необходимой суммарной длины трубок от температуры жидкости по условию минимальности критериев комфортности: 1 – теплосодержание; 2 – теплоощущение; 3 – интегральный критерий



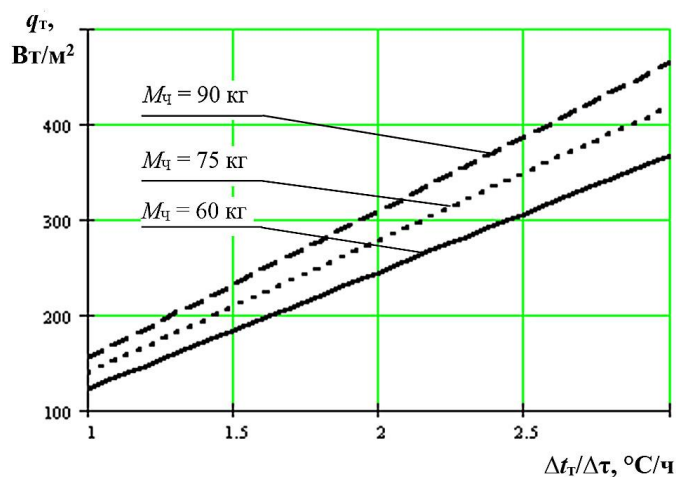


Рис. 4. Зависимость плотности мощности теплового потока  $q_T$  от скорости повышения температуры тела  $\Delta t_T/\Delta \tau$ : для среднего роста человека  $H_ч = 1,75$  м, при его массе  $M_ч$

Независимо от массы или роста человека плотность мощности теплового потока существенно возрастает при увеличении скорости повышения температуры тела человека:  $150 \text{ Вт/м}^2$  на  $1^\circ\text{C}$  увеличения скорости повышения температуры. При средних значениях массы тела и роста человека ( $70 \text{ кг}$  и  $1,7 \text{ м}$ ), а также нормативном значении скорости повышения температуры тела ( $2^\circ\text{C}$  в час), потребная средняя плотность мощности теплового потока составляет  $268 \text{ Вт/м}^2$ . По значениям плотности мощности теплового потока легко определить полную мощность теплового потока ко всей поверхности тела человека, необходимую для обеспечения заданной (комфортной) скорости повышения температуры, путем умножения плотности мощности теплового потока на площадь поверхности тела человека. В связи с этим графические зависимости для полной мощности теплового потока не приводятся. Однако, значение полной мощности теплового потока при нормативных значениях параметров было рассчитано и составило  $486 \text{ Вт}$ . Это значение плотности мощности теплового потока необходимо для дальнейших расчетов как конструктивных, так и режимных параметров ЛТУ.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оснащение кабины ММ ЛТУ имеет следующие преимущества по сравнению с серийной кабиной, имеющей только обычные системы кондиционирования или вентиляции:

- использование в кабинах ММ ЛТУ позволяет более эффективно снижать избыточное теплосодержание человека-оператора;
- использование в ЛТУ в качестве теплоносителя жидкости (воды) позволяет обеспечить максимальный теплообмен с поверхности тела человека за счет того, что вода имеет коэффициент теплопередачи от тела человека к ней примерно в  $200$  раз больше, чем воздух; затраты энергии на циркуляцию воды почти в  $3500$  раз меньше, чем на циркуляцию воздуха;
- улучшение условий труда за счет использования ЛТУ предполагает рост выработки продукции в единицу рабочего времени без чрезмерного напряжения функциональных систем организма человека; экономию рабочего вре-

мени за счет уменьшения его потерь из-за временной нетрудоспособности; увеличение объема производимой продукции за счет уменьшения непродуктивных затрат энергии на преодоление организмом человека-оператора неблагоприятных условий труда.

#### ВЫВОДЫ

Обоснованы критерии комфортности условий микроклимата и выявлена их зависимость от текущих значений теплового ощущения и теплового содержания организма человека-оператора. При этом становится возможной адекватная оценка эффективности функционирования не только устройств, корректирующих микроклимат замкнутого помещения, но и устройств, корректирующих тепловое состояние человека-оператора.

Разработана конструкция экспериментального образца ЛТУ для обеспечения комфортного теплового состояния организма человека-оператора в кабине ММ. Экспериментально определено значение плотности мощности теплового потока, необходимых для оптимальных расчетов как конструктивных, так и режимных параметров ЛТУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Глемба К.В. Интегральный критерий оценки комфортности условий микроклимата в кабинах мобильных сельхозмашин / К.В. Глемба, Ю.И. Аверьянов, В.Н. Кожанов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 4. – С. 36-38.
2. Глемба К.В. О показателях условий труда и утомляемости операторов мобильных машин сельскохозяйственного назначения / К.В. Глемба, Ю.Г. Горшков, Ю.И. Аверьянов, И.Н. Старунова // Наука. – 2003. – № 2. – С. 11-17.
3. Глемба, К.В. Улучшение условий труда и снижение травматизма операторов мобильных колесных машин сельскохозяйственного назначения диссертация: дис... канд. техн. наук. – Челябинск, 2004. – 190 с.
4. Глемба К.В. Улучшение условий труда и снижение травматизма операторов мобильных колесных машин сельскохозяйственного назначения: автореф. дис... канд. техн. наук. – Орел, 2004. – 20 с.
5. Аверьянов Ю.И. Улучшение условий труда операторов мобильных сельскохозяйственных машин применением локального терморегулирующего устройства: дис... канд. техн. наук. – Челябинск, 2000. – 197 с.
6. Аверьянов Ю.И. Повышение безопасности процесса уборки зерновых культур на основе совершенствования системы «оператор – машина – среда»: дис... докт. техн. наук. – Челябинск, 2006. – 414 с.
7. Глемба К.В. Факторы опасности мобильных технологических процессов / К.В. Глемба, Ю.Г. Горшков, Ю.И. Аверьянов, И.Н. Старунова, С.Ю. Попова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – № 7. – С. 4-6.
8. Глемба К.В. Оценка потенциальной технологической безопасности подсистемы / К.В. Глемба, Ю.Г. Горшков, Ю.И. Аверьянов, О.Ф. Скорняков, И.Н. Старунова // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003. – № 12. – С. 40-41.
9. Глемба К.В. Аспекты повышения безопасности подсистемы «оператор» на колесном транспорте / К.В. Глемба, О.Н. Ларин, Ю.И. Аверьянов // АПК России. – 2014. – Т. 70. – С. 34-42.

10. Глемба К.В. Результаты исследования режимных параметров тренажа операторов мобильных машин / К.В. Глемба, Ю.И. Аверьянов // Материалы конф. – Челябинск: ЧГАА, 2015. – С. 134-140.

11. Глемба К.В. Обзор методов определения надежности оператора в динамических эргатических системах / К.В. Глемба, О.Н. Ларин // Транспорт Урала. – 2012. – № 1(32). – С. 17-22.

12. Глемба К.В. Методы оценки информационной перегрузки оператора в процессе управления машиной / К.В. Глемба, Ю.И. Аверьянов, В.К. Глемба // Вестник ЧГАА. – 2010. – Т. 56. – С. 5-10.

13. Глемба К.В. Выявление и совершенствование проблемных взаимосвязей структурных элементов системы безопасности движения мобильных машин / К.В. Глемба, Ю.И. Аверьянов // Вестник ЧГАА. – 2013. – Т. 66. – С. 25-34.

14. Глемба К.В. Показатель уровня квалификации оператора мобильной сельскохозяйственной машины / К.В. Глемба, Ю.Г. Горшков, Ю.И. Аверьянов, О.Ф. Скорняков, Н.В. Светлакова // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 3 – С. 32.

15. Глемба К.В. Влияние пертинентности информационного поля на безопасность дорожного движения / АПК России. – 2014. – Т. 68. – С. 7-13.

16. Глемба К.В. Влияние на безопасность движения уровня формализации информационного потока в эргатических системах / К.В. Глемба, С.В. Горбачев // Вестник ОГУ. – 2011. – № 10(129). – С. 88-93.

17. Глемба К.В. Вопросы применения системного подхода для повышения безопасности дорожного движения / К.В. Глемба, О.Н. Ларин, В.И. Майоров // Ежемесячный научный

информационный сборник «ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление». – М.: ВИНТИ РАН, 2013. – № 11. – С. 52-55.

18. Глемба К.В. Влияние перцептивных процессов пространственного восприятия участников дорожного движения на их безопасность // Вестник ЧГАА. – 2012. – Т. 62. – С. 26-31.

19. Глемба К.В. Безопасность технического обслуживания машин / К.В. Глемба, Ю.Г. Горшков, Ю.И. Аверьянов, И.Н. Старунова, Е.В. Шаманова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – № 11. – С. 21-22.

20. Глемба К.В. Автоматический контроль за исправностью тормозной системы / К.В. Глемба, Ю.Г. Горшков, Ю.И. Аверьянов, И.Н. Старунова, С.Ю. Попова // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003. – № 5. – С. 20-22.

21. Глемба К.В. Влияние условий организации дорожного движения на процесс восприятия водителем информации / К.В. Глемба, О.Н. Ларин // Ежемесячный научный информационный сборник «ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление». – М.: ВИНТИ РАН, 2012. – № 11. – С. 55-57.

22. Глемба К.В. Обоснование безопасной скорости движения колесных машин / К.В. Глемба, Ю.Г. Горшков, Ю.И. Аверьянов, Э.Ю. Кульпин, И.Н. Старунова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. – № 12. – С. 27-30.

23. Мишуриин В.М. Надежность водителя и безопасность движения / В.М. Мишуриин, А.Н. Романов. – М.: Транспорт, 1990. – 167 с.

24. Гаврилов Э.В. Эргономика на автомобильном транспорте. – Киев: Техника, 1976. – 152 с.

25. Аруин А.С. Эргономическая биомеханика // А.С. Аруин, В.М. Зацюрский. – М., 1988. – 256 с.

## Substantiation of Parameters and Modes of Operation of the Device Thermal Comfort of the Operator of the Mobile Machine

Glemba K. V., Averianov Y. I.

South Ural State University (National Research University),

South Ural State Agrarian University,

Chelyabinsk, Russian Federation,

[glemba77@mail.ru](mailto:glemba77@mail.ru)

**Abstract.** The effects of heat and cold on the human body leads to a reduction in its protective power and reserve capacity. The productivity of operators is reduced by 25-55 % with increasing ambient temperature up to 28-31 °C. It is proved that between temperature and human performance there is a high level of correlation. The process of forming the thermal state of the human operator in the cabs of mobile machines automotive engineering remains poorly understood. On the basis of theoretical research identified the main factors influencing the process of formation of the thermal state of the human body, justified the scheme and design parameters of the proposed device for thermal regulation. There is a power dependence of heat flux on the thickness of clothing of the operator, the power and distance of the body of the human operator to a local device. In the study of

experimental relationships between the indicator of the thermal state (thermal sensation) of the human operator with regard to the parameters of microclimate in the cabs of mobile machines, considering the operating modes of the device. Experimental studies were carried out in a climatic chamber, established on the basis of a unified cabin. The experimentally determined value of the power density of the heat flow. It amounted to 486 watts that is needed in the future for the calculation of constructive and regime parameters of the offered device.

**Keywords:** the operator of the mobile machine; thermal comfort; conductance; thermoregulation; thermal sensation; the climate; the heat flux.

# Взаимосвязь сезонной нагрузки и технической готовности зерноуборочного комбайна

Шепелев С.Д., Черкасов Ю.Б.

Южно-Уральский государственный аграрный университет  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[shepelev2@yandex.ru](mailto:shepelev2@yandex.ru)

Шепелев В.Д.

Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет),  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[shepelev1978@mail.ru](mailto:shepelev1978@mail.ru)

**Аннотация.** Развитие рынка подержанной техники на постсоветском пространстве и наличие сельскохозяйственных предприятий с различной площадью возделывания зерновых культур вызывает необходимость в обосновании экономически целесообразного соотношения сезонной нагрузки зерноуборочного комбайна и его технической готовности. Установлено, что при увеличении сезонной нагрузки на комбайн от 150 до 350 гектаров рациональный коэффициент оперативной готовности должен быть повышен с 0,4 до 0,85, время устранения отказа должно быть уменьшено с шести часов до получаса и наработка на отказ увеличена с шести до двадцати часов. Обеспечить эти показатели возможно за счёт ремонтно-обслуживающих воздействий, увеличения количества исполнителей при устранении последствий отказа и формирования фонда обменных запасных частей, своевременной их доставки мобильными звеньями, использования агрегатного метода ремонта.

**Ключевые слова:** надёжность, зерноуборочный комбайн, производительность, потери продукции, наработка на отказ, сезонная нагрузка.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях дефицита трудовых и материальных ресурсов в сельскохозяйственном производстве необходимо сокращение потерь продукции и снижение затрат на привлечение технических средств [1]. При высокой надёжности зерноуборочной техники и низкой сезонной нагрузке увеличиваются затраты на её привлечение, при высокой сезонной нагрузке и низкой надёжности предприятия несут убытки от потерь продукции из-за увеличенных сроков уборки [2, 3]. Развитие рынка подержанной техники на постсоветском пространстве вызывает необходимость в обосновании экономически целесообразного соотношения сезонной нагрузки зерноуборочного комбайна и его технической готовности, которая определяется наработкой за весь период эксплуатации. Диспаритет цен на сельскохозяйственную и промышленную продукцию, снижение технического оснащения уборочных процессов требует обоснования рационального уровня технической готовности зерноуборочных комбайнов и дифференциации их сезонной нагрузки [4-6]. Для определения рациональной технической готовности уборочных машин необходимо обосновать целесообразность инвестирования в ремонтно-обслуживающие воздействия. Анализ эффективности функционирования зерноуборочных комбайнов на предприятиях различных форм осуществления хозяйственной деятельности показывает, что сложившаяся теория машиноиспользования не учитывает в полной мере взаимосвязь их надёжности, сезонной и суточной производи-

тельности, затрат на техническое обслуживание, ремонт, хранение и расход топлива. Современная производственная ситуация вызывает необходимость в обосновании целесообразной технической готовности зерноуборочного комбайна с учётом его сезонной загрузки и затрат ресурсов на ремонтно-восстановительные работы.

Проблемность ситуации заключается в том, что с одной стороны для снижения потерь урожая необходимы затраты на ремонтно-обслуживающие воздействия для повышения надёжности зерноуборочных комбайнов и повышения эффективности, с другой стороны их эксплуатация на небольшой площади уборки не всегда будет эффективной. Указанные противоречия требуют дополнительных исследований для получения новых знаний о взаимосвязи между показателями надёжности и затратами на привлечение и ремонт техники с различным ресурсным состоянием, что и определило задачи исследования. Установить диапазон сезонной загрузки зерноуборочных комбайнов от уровня их технической готовности и эксплуатации; выявить закономерности изменения технической готовности от объема ремонтно-обслуживающих воздействий зерноуборочных комбайнов за пределами нормативного срока эксплуатации; установить зависимость затрат на привлечение зерноуборочных комбайнов, техническое обслуживание, ремонт, хранение и расход топлива от технической готовности и дать технико-экономическую оценку эффективности согласования сезонной нагрузки зерноуборочных комбайнов и их технической готовности. Для реализации поставленных задач поставлена цель исследования - повышение эффективности использования зерноуборочных комбайнов с дифференцированной нагрузкой на основе обеспечения целесообразного уровня их технической готовности.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для обоснования рационального уровня надёжности зерноуборочных комбайнов с дифференцированной сезонной нагрузкой, учитывая методики авторов [7, 8], разработана целевая функция на основе минимума затрат [9-11]:

$$U(K_{og}) = Z(K_{og}(Q_n)) + P(K_{og}) + Z_{zap}(K_{og}) + R_t(K_{og}) \rightarrow \min \quad (1)$$

где:  $Z(K_{og}(Q_n))$  – рыночная стоимость зерноуборочного комбайна руб./га;  $P(K_{og})$  – ущерб от потери продукции,

руб./га [2, 18];  $Z_{zap}(K_{og})$  – затраты на запасные части, руб./га;  $R_t(K_{og})$  – затраты на топливо, руб./га;  $K_{og}$  – коэффициент оперативной готовности зерноуборочного комбайна [12, 13].

В общем виде функцию цели можно представить в следующем виде:

$$U(K_{og}) = \frac{Z(B(K_{og}(Q_n)))}{Q_f} + 0,5 \cdot \frac{K_c \cdot K_p \cdot Y \cdot C_p \cdot Q_f}{Q_{sm} \cdot K_{sm} \cdot K_{og} \cdot K_m} + \frac{Z_{zp}^{cp}(K_{og})}{Q_f} + R_{asx}(K_{og}) \cdot C_t \rightarrow \min \quad (2)$$

где  $Z(B(K_{og}(Q_n)))$  – затраты на привлечение ЗУК в зависимости от уровня надёжности, руб;  $Q_n$  – общая наработка, га;  $K_p$  – коэффициент потерь;  $K_c$  – коэффициент снижения потерь от сочетания сортов, культур по скороспелости [15];  $Q_{sm}$  – сменная производительность ЗУК, га;  $Q_f$  – сезонная нагрузка, га;  $Z_{zp}^{cp}(K_{og})$  – затраты на техническое обслуживание, ремонт и хранение в зависимости от коэффициента оперативной готовности [16];  $R_{asx}(K_{og})$  – расход топлива в зависимости от коэффициента оперативной готовности, кг/га [17];  $C_t$  – стоимость топлива, руб./кг;  $Y$  – урожайность, ц/га;  $K_{sm}$  – коэффициент сменности;  $K_m$  – коэффициент технологической надёжности.

Моделирование позволило выявить рациональный уровень надёжности зерноуборочного комбайна (ЗУК) в зависимости от сезонной нагрузки (рис. 1).

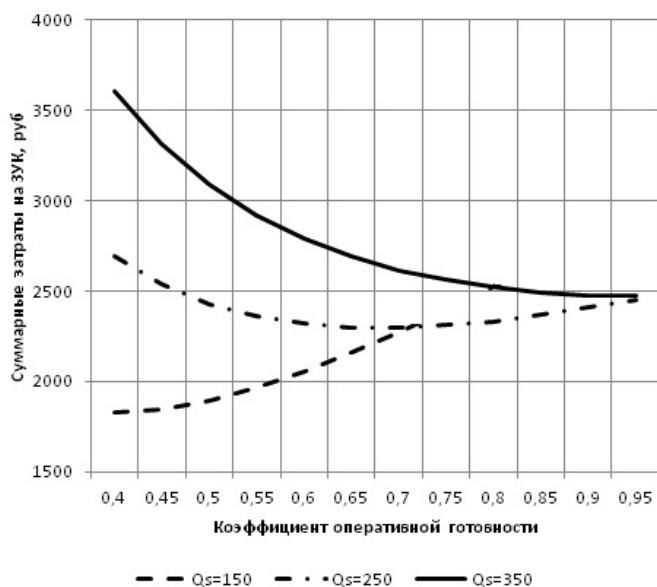


Рис. 1. Зависимость суммарных затрат от коэффициента оперативной готовности ЗУК (Енисей-1200)

Выявлены рациональные показатели среднего времени устранения технического отказа и наработки на отказ, определяемое, как отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки (рис. 2).

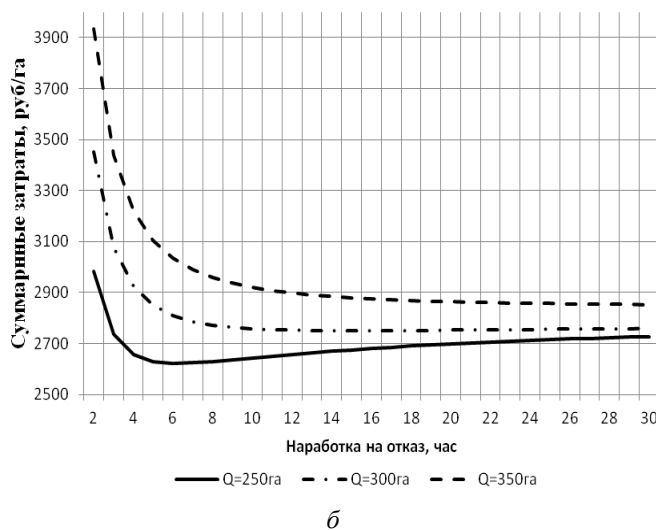
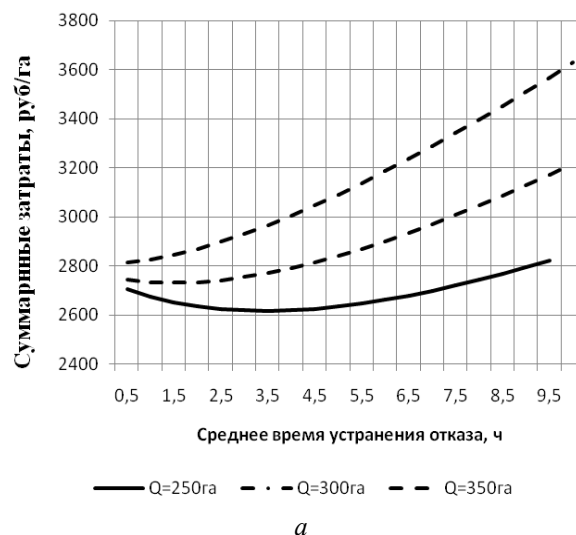


Рис. 2. Зависимость суммарных затрат от среднего времени устранения отказа (а) и наработки на отказ (б)

Установлено, что при увеличении сезонной нагрузки на комбайн от 150 до 350 гектаров рациональный коэффициент оперативной готовности должен быть повышен с 0,4 до 0,85. С увеличением сезонной нагрузки на зерноуборочный комбайн среднее время восстановления технического отказа уменьшается. Так с увеличением сезонной нагрузки на комбайн с 250 до 350 гектаров рациональное время устранения отказа снижается с четырёх часов до получаса. Моделированием установлено, что при сезонной нагрузке на комбайн 250 гектаров, рациональная наработка на отказ составляет 6 часов. С увеличением сезонной нагрузки до 350 гектаров рациональная наработка на отказ составляет около 20 часов.

Для обоснования целесообразности затрат на ремонтно-обслуживающие воздействия с целью повышения их надёжности получено выражение на основе критерия минимума суммарных затрат [11]:



$$U(K_{og}) = K(K_{og}) + P(K_{og}) + Z_{zap}(K_{og}) + R_t(K_{og}) \rightarrow \min \quad (3)$$

где  $K(K_{og})$  – зависимость капиталовложений в ремонт зерноуборочного комбайна от его надежности, руб.

Разработанная целевая функция представлена в общем виде:

$$U(K_{og}) = \frac{K(K_{og})}{Q_f} + 0,5 \cdot \frac{K_c \cdot K_p \cdot Y \cdot C_p \cdot Q_f}{Q_{sm} \cdot K_{sm} \cdot K_{og} \cdot K_m} + \frac{Z_{zp}^{cp}(K_{og})}{Q_f} + R_{asx}(K_{og}) \cdot C_t \rightarrow \min \quad (4)$$

Графическая интерпретация целевой функции представлена на рис. 4.

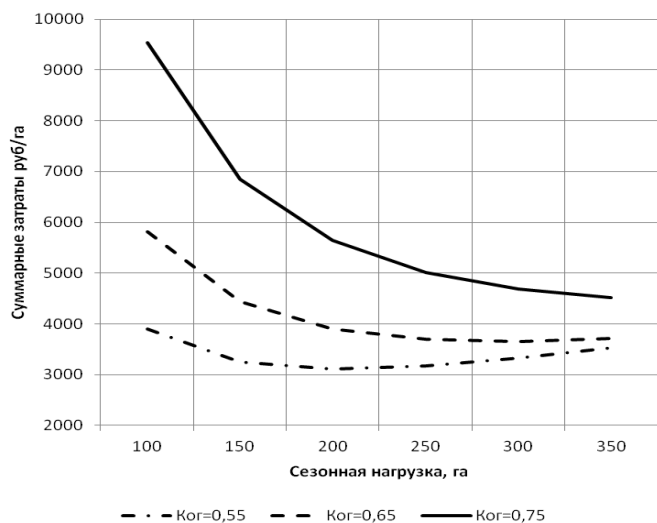


Рис. 2. Зависимость суммарных затрат от сезонной нагрузки на зерноуборочный комбайн

Исследование показало, что на сезонную нагрузку влияние оказывают затраты на запчасти, топливо а также потери продукции и капиталовложения в ремонт зерноуборочного комбайна. Установлено, что с увеличением коэффициента оперативной готовности суммарные затраты возрастают из-за увеличения затрат на ремонтно-обслуживающие воздействия, но с другой стороны увеличивается и рациональная площадь уборки зерновых культур. Так с увеличением коэффициента оперативной готовности с 0,55 до 0,75 рациональная сезонная нагрузка на ЗУК увеличивается от 150 до 350 гектаров.

Значительное влияние на комплексный показатель надёжности оказывает время устранения отказа и наработка на отказ. Среднее время восстановления отказа складывается из времени на поиски и непосредственно на устранение отказа (0,6 часа), а также доставки запасных частей (1,9 часа). Закономерность снижения наработки на отказ ЗУК от срока службы ( $T$ ) определяется по формуле:  $t_0(T) = 23,561 \cdot T^{-0,36T}$ .

На основе сбора статистических данных в табл. представлены уравнения регрессии по определению затрат на привлечение технологической машины, техническое обслуживание и хранение (ТОРХ), расхода топлива от коэффициента оперативной готовности уборочных агрегатов. Установлено, что затраты на запасные части к окончанию срока службы увеличиваются от 0,007 до 0,014% от стоимости комбайна в расчёте на один гектар, а расход топлива к окончанию срока службы увеличивается в 1,3 раза.

Таблица

Уравнения описывающие затраты на привлечение ЗУК, ТОРХ, расход топлива от показателя технической готовности

№	Показатели	Уравнение регрессии
1	Затраты на ТОРХ, руб.	$Z_{zap}(K_{og}) = 76547,426 - 42042,947 \cdot K_{og}$
2	Затраты на привлечение ЗУК, руб. ( $\alpha$ – коэффициент амортизации)	$Z_{zap}(K_{og}) = (4953082 \cdot K_{og} - 2244223) \cdot \alpha$
3	Расход топлива, л/га.	$R_t(K_{og}) = 9,6 - 5,5 \cdot K_{og}$

#### Выводы

Таким образом, производственная ситуация вызывает необходимость в обосновании целесообразной технической готовности зерноуборочного комбайна с учётом его сезонной загрузки и затрат ресурсов на ремонтно-восстановительные работы. Результаты исследования показывают, что в фермерских хозяйствах с небольшой площадью уборки целесообразно использовать технологические машины с невысоким уровнем надёжности, а в крупных сельскохозяйственных предприятиях необходимо обновление техники. При увеличении сезонной нагрузки на зерноуборочный комбайн типа Енисей-1200 от 150 до 350 гектаров рациональный коэффициент оперативной готовности должен быть повышен с 0,4 до 0,85 за счёт ремонтно-обслуживающих воздействий [19, 20]. Рациональное время устранения отказа должно быть уменьшено с шести часов до получаса и наработка на отказ должна быть увеличена с шести до двадцати часов за счёт увеличения количества исполнителей при устранении последствий технического отказа и формирования фонда обменных запасных частей, своевременной их доставки мобильными звеньями, использования агрегатного метода ремонта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Плаксин А.М. Взаимосвязь ресурсного потенциала земледелия с человеческим капиталом села // Вестник ЧГАА. – 2012. – Т. 62.
2. Саклаков В.Д. Техничко-экономическое обоснование выбора средств механизации / В.Д. Саклаков, М.П. Сергеев. – М.: Колос, 1973. – 100 с.
3. Корнев Г.В. Биологическое обоснование сроков и способов уборки зерновых культур. – М.: Колос, 1971.
4. Михайлов М.Р. Оптимизация использования зерноуборочных комбайнов по параметрам надёжности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013.
5. Ряднов А.И. Оптимизация показателей надёжности зерноуборочных комбайнов (детально для их несущей

системы) по результатам эксплуатационных испытаний в Волгоградской области: дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 1984.

6. Шепелёв В.Д. Обоснование технико-технологической согласованности процессов уборки и послеуборочной обработки зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2007.

7. Бледных В.В. Введение в теорию проектирования технологических процессов в растениеводстве // Вестник ЧГАУ. – 1998. – Т. 23. – С. 10-14.

8. Михайлов Ю.Е. Техничко-экономическое обоснование парка зерноуборочных комбайнов / Ю.Е. Михайлов, Н.Н. Чуркин // Сборник науч. тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1977. – Вып. 124. – С. 78-84.

9. Шепелёв С.Д. Обоснование границ эффективности использования накопителя-перегрузжателя / С.Д. Шепелёв, Ю.Б. Черкасов // Вестник КрасГАУ. – 2013. Вып. 12 – С. 199-203.

10. Шепелёв С.Д. Влияние срока службы зерноуборочных комбайнов на структуру технологических линий// С.Д. Шепелёв, Г.А. Окунев, Ю.Б. Черкасов // Известия ОГАУ. – 2014. – №1(45). – С. 43-46.

11. Шепелёв С.Д. Обоснование рационального уровня надёжности технологических машин в зерноуборочном процессе/ С.Д. Шепелёв, Ю.Б. Черкасов // Вестник КрасГАУ. – 2015. – Вып 5. – С. 58-63.

12. Белов В.В. Надёжность и эффективность в технике: справочник / В. В. Белов и др. – М.: Машиностроение, 1986.

13. Прибытков П.Ф. Безотказность уборочных агрегатов и комплексов / П.Ф. Прибытков, В.Ф. Скробач. – Л.: Агропромиздат, 1987.

Агропромиздат, 1987.

14. Шепелёв С.Д., Статистические показатели производительности зерноуборочных комбайнов в зависимости от наработки / С.Д. Шепелёв, В.Д. Шепелёв, Ю.Б. Черкасов // Агротехнологическая политика России. – 2015. – №1. – С. 36-40.

15. Шепелёв С.Д. Согласование параметров технических средств на уборке зерновых культур / С.Д. Шепелёв, И.Н. Кравченко // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2011. – № 7-8. – С. 71-76.

16. Камша С.А. Обоснование рациональных параметров уборочного процесса зерновых культур (на примере Алтайского края): дис. ... канд. сельскохозяйственных наук. – Барнаул, 2009. – 195 с.

17. Шепелёв С.Д. Обоснование дифференцированной надёжности зерноуборочных комбайнов с учетом их сезонной нагрузки / С.Д. Шепелёв, Ю.Б. Черкасов // Материалы LIV Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск, 2015. – Ч. II.

18. Шепелёв С.Д. Проектирование поточных линий на уборке урожая: монография / С.Д. Шепелёв, Г.А. Окунев. – Челябинск, 2006.

19. Липп В.А. Исследования агрегатного метода устранения отказов комбайнов СК-4 с целью повышения их работоспособности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 1972.

20. Солоницын Е.В. Сокращение продолжительности технологических процессов в растениеводстве на основе агрегатного метода восстановления работоспособности тракторов: дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2003.

## Differentiation of the Seasonal Loading of Combine Harvester Depending on His Technical Readiness

Shepelev S.D., Cherkasov Y.B.  
South-Ural state agrarian university  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[shepelev2@yandex.ru](mailto:shepelev2@yandex.ru)

Shepelev V.D.  
South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[shepelev1978@mail.ru](mailto:shepelev1978@mail.ru)

**Abstract.** Development of the worn machinery market on the former USSR and availability of the commercial farm units with varying areas of cereal cropping causes the necessity in grounding the economically viable correlation between the combine harvester season load and its technical readiness. It is determined that on the increasing the combine harvester season load from 150 to 350 hectares the rational operational readiness must be raised from 0,4 to 0.85, the repair time must be decreased from six hours to half an hour and the mean time between failures must be raised from six hours to twenty hours. It is possible to

ensure these activities by means of repair-servicing correlations, increasing the number of participants in eliminating the consequences of failure and forming the fund of the changeable spare parts, their timely delivery to the mobile units, using the aggregate repair method.

**Keywords:** reliability, combine harvester, productivity, production loss, mean time between failures, season load

# Обоснование адаптивного рабочего органа канатного экскаватора

Максимов Ю.В.

ООО «КЗ «Ростсельмаш»,  
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация  
[019468@oaorsm.ru](mailto:019468@oaorsm.ru)

Исаков В.С.

Южно-Российский государственный  
политехнический университет (НПИ)  
г. Новочеркасск, Российская Федерация  
[kafedra\\_sdkm@mail.ru](mailto:kafedra_sdkm@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены достоинства и недостатки канатных экскаваторов с обратной лопатой по отношению к гидравлическим. Установлено, что основной причиной снижения производительности канатных экскаваторов является жесткое крепление ковша к рукояти. Проведен синтез структуры механизма поворота ковша, не требующего дополнительного привода. Разработана конструкция механизма поворота ковша канатного экскаватора, где поворот ковша осуществляется за счет дополнительной кинематической связи переменной длины между ковшом и рукоятью или ковшом и стрелой и реализующей внутренние усилия, обусловленные соответствующим взаимным расположением стрелы и рукояти. Рассмотрена часть траектории рабочего процесса, на которой осуществляется поворот рукояти относительно стрелы с одновременным поворотом ковша относительно рукояти. Определены параметры механизма, влияющие на положение ковша в процессе копания относительно горизонта. Приведен алгоритм поисковой оптимизации геометрических параметров механизма поворота, обеспечивающих требуемый закон поворота ковша при заданных ограничениях.

**Ключевые слова:** канатный экскаватор, структурный синтез, механизм поворота ковша.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение производительности универсальных одноковшовых экскаваторов относится к числу важнейших направлений увеличения эффективности производства земляных работ при строительстве сооружений различного назначения. Среди одноковшовых экскаваторов с рабочим оборудованием обратная лопата до настоящего времени не теряют своей актуальности экскаваторы с канатной подвеской рабочего оборудования, которые отличаются надёжностью, простотой обслуживания, не требующей сложной ремонтной базы, и низкой ценой, как самих экскаваторов, так и запасных частей [1]. При этом канатные экскаваторы имеют значительные преимущества по сравнению с гидравлическими при работе с абразивными породами и при экстремальных температурных условиях, что подтверждается опытом их эксплуатации [2, 3]. Основным недостатком канатных экскаваторов с оборудованием обратная лопата является снижение производительности за счет потери части зачерпнутого грунта на различных участках рабочей траектории. Возникновение таких потерь обусловлено жестким креплением ковша к рукояти. Несмотря на известные попытки устранения этого недостатка посредством введения дополнительных кинематических звеньев [4], задача обеспечения возможности поворота ковша относительно рукояти не нашла окончательного решения, однако сама гипотеза о возможном

управлении поворотом ковша при повороте рукояти посредством дополнительной жесткой тяги, соединяющей ковш и стрелу, является перспективной и требует дальнейшего исследования.

Оценка конкурентоспособности одноковшовых экскаваторов различных типов определяется на основе аргументов максимально влияющих на минимизацию величины удельных приведённых затрат. Таким образом, определяющими считаются аргументы, которые напрямую связаны с производительностью работы [5]. Следовательно, сохранение в ковше всего объема зачерпнутого грунта на участках выхода из забоя и разгрузки повышает эффективность работы, а, следовательно, и конкурентность канатных экскаваторов с рабочим органом обратная лопата. В этом случае источниками инновации в процессе модернизации является разработка схемы дополнительного манипулирования ковшом (включая адаптацию траектории движения обратной лопаты к внешним условиям, как на участке копания, так и на участке разгрузки).

Так как все одноковшовые канатные экскаваторы имеют общую конструктивную схему рабочего оборудования обратная лопата, то дальнейший анализ рабочих процессов проводится на примере наиболее распространенного в своём классе экскаватора ЭО-4112 с объемом ковша 0,65 м<sup>3</sup>. Анализ показал, что при приемлемой длительности рабочего цикла, равного 18 с., реальная эксплуатационная производительность за счет высыпания из ковша до 30% грунта обратно в забой оказывается значительно ниже технической. Это обусловлено невозможностью существующей конструкции обеспечить рациональное положение ковша относительно горизонта на всех участках рабочей траектории.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обосновать и разработать структуру и конструкцию бесприводного механизма, обеспечивающего поворот ковша относительно рукояти.

Под структурой механизма поворота ковша, в соответствии с [6], понимается совокупность его элементов и отношений между ними, т.е. совокупность звеньев и подвижных соединений. В рассматриваемом случае геометрическая структура механизма поворота может быть описана формой и размерами его звеньев, их расположением и шарнирными связями между ними.

В результате исследования структуры рычажных механизмов установлено, что решение проблемы поворота ковша возможно за счет применения напряженных замкнутых контуров. Эти механизмы широко представлены в [6]. Дальнейшие исследования [7, 8] позволили решать

задачи перераспределения силового фактора в параллельных звеньях механизмов и машин и нагружения контуров в различных режимах.

В работе [9] предложена методика концептуального конструирования рабочих органов экскаваторов на основе которой разработана структурная схема механизма поворота ковша канатного экскаватора (рис. 1), защищенная патентом РФ [10].

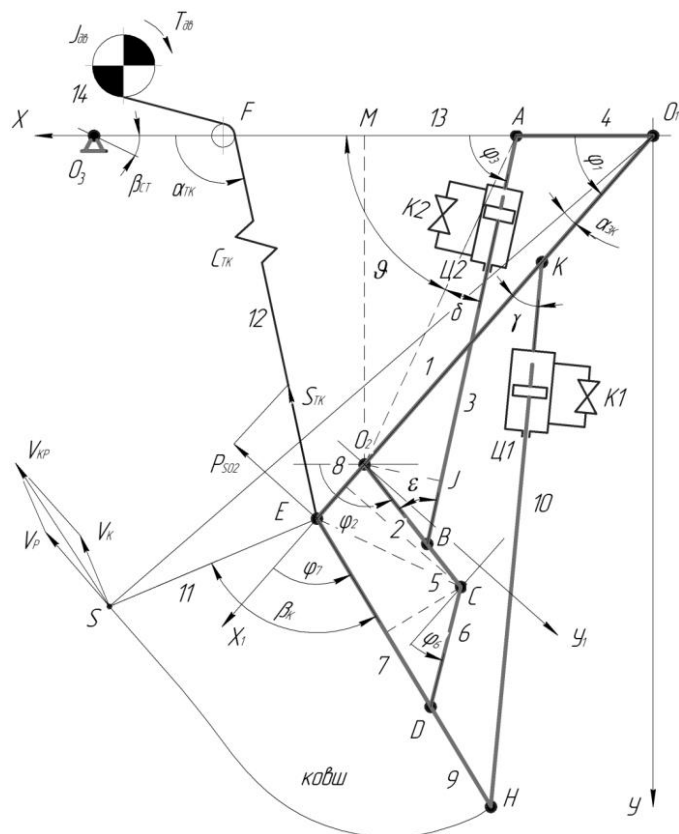


Рис. 1. Схема механизма поворота ковша

Отличительной особенностью предложенной структуры механизма поворота является поочередное использование дополнительной кинематической (в виде гидроцилиндров) связи ковша с рукоятью или ковша со стрелой, что позволяет реализовать усилия, возникающие в замкнутом контуре стрелы, рукояти, ковша и дополнительных гидроцилиндров на поворот ковша относительно рукояти. Наличие в структуре звеньев (гидроцилиндров) изменяемой длины в каждый отдельный период рабочего цикла обуславливает переменную структуру механизма, работа которого возможна только при включении в структуру одной из двух дополнительных связей при одновременном выключении другой, являющейся в этом случае избыточной. Звенья изменяемой длины должны обеспечивать промежуточную фиксацию на длине, задаваемой внешним управляющим воздействием. В кинематическом смысле конструкция такого звена не имеет принципиального значения. Это могут быть различные устройства. Для конкретного исследования выбор гидроцилиндров (без привода) обусловлен прежде всего совокупностью таких показателей, как минимальные затраты, доступность стандартного оборудования, простота управления, точ-

ность позиционирования, возможность контроля и изменения параметров процесса.

Предложенный механизм поворота ковша представляет собой два смежных четырехзвенных механизма:  $O_1ABO_2$  и  $O_2CDE$ , дополненные звеном  $KH$ , где для первого механизма  $O_1ABO_2$  роль стойки (звено 4) выполняет стрела, а ведущим звеном является рукоять 1 (звено  $O_1O_2$ ). Звено 1 вращается с угловой скоростью  $\omega_1$  за счет тягового каната 12 наматываемого на барабан главной лебедки с приводом от двигателя ( $T_{об}$ ). Для второго механизма  $O_2CDE$  стойкой является рукоять (звено 8), а ведущим является звено 5 ( $O_2C$ ) которое есть продолжение звена 2 ( $O_2B$ ) первого механизма  $O_1ABO_2$ . В этом механизме звенья  $AB$  и  $KH$  являются звеньями (гидроцилиндры без привода) переменной длины, которые посредством управления кранами  $K2$  и  $K1$  могут: – при закрытом кране фиксировать длину соответствующего звена, а при открытом выключать звено из структуры как избыточную связь.

Процесс копания канатным экскаватором с поворотом ковша характеризуется определенным порядком, каждый из этапов работы завершается некоторым событием, инициирующим переход. Переход обозначает передачу управления от одного состояния вида деятельности к другому. На рис. 2 приведена диаграмма деятельности рабочего органа. Декомпозиция состояния вида деятельности осуществляется посредством плавательных дорожек, которые разделяют диаграмму на вертикальные зоны, каждая из которых представляет зону ответственности соответствующего оборудования. Для описания параллельных процессов используется линейка синхронизации. Диаграмма деятельности может являться основой для создания системы управления адаптирующую рабочие процессы к конкретным условиям, обеспечивая траекторию движения ковша при максимальном сохранении грунта в ковше.

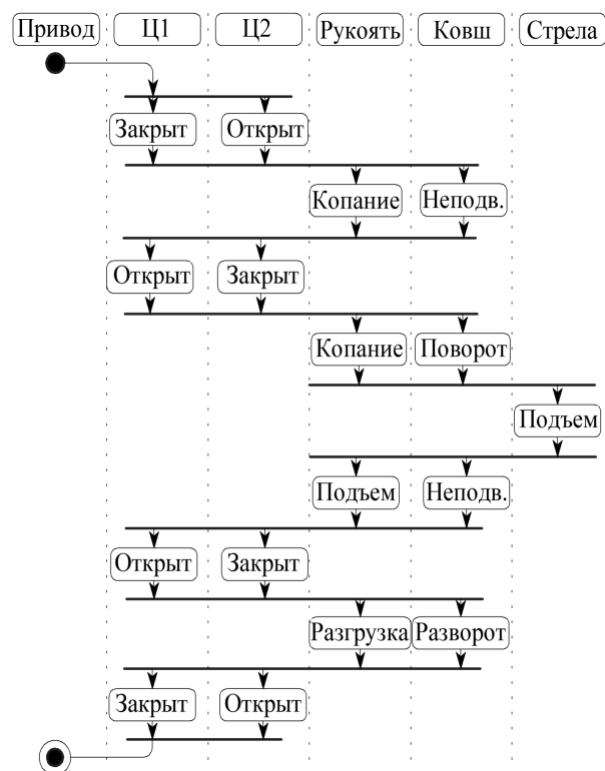


Рис. 2. Диаграмма деятельности рабочего органа



Очевидно, что работоспособность и эффективность работы механизма по предложенной схеме зависит от рационального сочетания конструктивных (геометрических) параметров этих двух смежных четырехзвенных механизмов. Для их определения необходимы аналитические зависимости параметров механизма поворота ковша в функции угла поворота рукояти (ведущего звена 1), которые получены в результате кинематического анализа в работе [11].

Обозначим для краткости длины звеньев  $O_1O_2 = l_1$ ;  $O_2B = l_2$ ;  $AB = l_3$ ;  $AO_1 = l_4$ ;  $O_2C = l_5$ ;  $CD = l_6$ ;  $ED = l_7$ ;  $EO_2 = l_8$ ;  $EH = l_9$ ;  $HK = l_{10}$ ;  $EF = l_{12}$ ;  $O_1F = l_{13}$ ;  $O_1E = l_{14}$ ;  $ES = l_{15}$ .

В качестве оптимизируемых параметров выступают длины восьми звеньев ( $l_1...l_8$ ), образующих механизм поворота. Ограничения, накладываемые на эти параметры, определяются в первую очередь заданными (для конкретного канатного экскаватора) размерами стрелы, рукояти, ковша, и во вторую - размерами, обеспечивающими необходимую прочность самих шарнирных узлов. В этом случае задача по поиску рациональных параметров формулируется как задача многопараметрической условной оптимизации и математически описывается выражением [12]

$$J = \text{extr}(\vec{X}) = \varphi_7 = f(l_1, l_2, \dots, l_8) \rightarrow \min \quad (1)$$

где  $\vec{X}$  – вектор управляемых (оптимизируемых) параметров при накладываемых ограничениях

$$\vec{\varphi}(\vec{X}) > 0 \text{ и } \vec{\psi}(\vec{X}) = 0. \quad (2)$$

Аналитические зависимости полученные в [11] не устанавливают прямую связь между управляемыми параметрами и целевой функцией (1) и ограничениями (2), что затрудняет определение экстремума. В такой ситуации следует применять поисковую оптимизацию, сущность которой заключается [12] в том, что поиск экстремальной точки  $\vec{X}^*$  в пространстве управляемых параметров осуществляется последовательными шагами, ведущими от исходной точки  $\vec{X}_0$  через некоторые промежуточные отображающие точки  $\vec{X}_k$  в заданную  $\varepsilon$  – окрестность точки экстремума  $\vec{X}^*$ . Переход из точки  $\vec{X}_k$  в точку  $\vec{X}_{k+1}$  является одним из последовательных шагов (итераций) вычисления значений выходных параметров.

После нахождения множества значимых в рамках принятых ограничений вариантов решения, которые условно характеризуют множество Парето, следует произвести выбор окончательного варианта. Эта последняя процедура обычно выполняется лицом, принимающим решения (ЛПР) на основании собственного опыта и неформального анализа.

На рис. 3 приведена блок-схема алгоритма поисковой оптимизации параметров механизма поворота ковша.

В цикле осуществляется перебор значений параметров, лежащих в области указанных ограничений  $\vec{X}_p$ . Выполняется вычисление критерия оптимальности и поиск экстремального значения критерия

$$J = \text{extr}(\vec{X}).$$

Цикл поиска экстремума производится во всей области допустимых значений с шагом  $dX$ . При достижении экстремального значения критерия, запоминается значение параметра, доставляющего экстремум.

Применительно к экскаватору типа ЭО 4112 выбор ограничений на величину звеньев механизма поворота в

соответствии со схемой рисунка 1 определялся конкретными размерами: – стрелы (расстояние от оси крепления рукояти до отклоняющего блока тягового каната); – рукояти (расстояние от оси крепления ее к стреле до шарнира ковша); – ковша (длина верхней стенки, расстояние от шарнира до передней кромки). При этом механизм поворота должен обеспечить угол поворота ковша, равный  $90^\circ$  ( $\varphi_7^{\max} = 90^\circ$ ) в диапазоне угла поворота рукояти  $90...45^\circ$ , а усилия в звене  $l_3$  (цилиндре Ц2) не превышать пяти условных единиц, где за единицу принимается усилие копания приложенное к передней кромке ковша. Последнее условие соответствует средним величинам гидравлических экскаваторов.

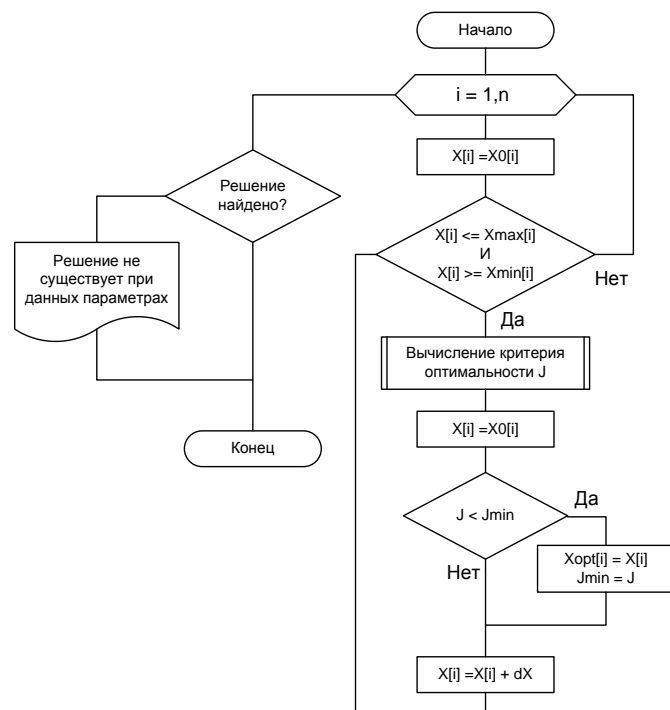


Рис. 3. Блок-схема алгоритма поисковой оптимизации

Усилия копания определялись по известной формуле Н.Г. Домбровского [13] с учетом приведенных в [14] особенностей процесса копания канатным экскаватором с поворотом ковша.

В результате расчетов по вышеприведенному алгоритму определены значения рациональных параметров механизма поворота ковша ( $l_1, l_2, \dots, l_8$ ). Длины звеньев, определяющие точки крепления звена  $l_{10}$  (гидроцилиндра Ц1) выбраны конструктивно.

Для проверки работоспособности предложенной структуры механизма поворота ковша канатного экскаватора была разработана и изготовлена в соответствии с результатами проведенных исследований специальная экспериментальная установка рабочего органа. Эксперименты проводились в специализированном помещении кафедры «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. Основные геометрические параметры рабочего органа экспериментальной установки относятся к соответствующим параметрам канатного экскаватора ЭО-4112 в

соотношении 1:7. Проведённые экспериментальные исследования подтвердили его работоспособность и высокую эффективность в части поворота ковша и сохранении массы груза в ковше при его подъеме из забоя.

#### Заключение

Выполненный синтез структуры и цикл экспериментов на математических и физической моделях доказал работоспособность и эффективность разработанной бесприводной системы управления поворотом ковша канатного экскаватора.

#### Литература

1. Исаков В.С. О перспективах использования одноковшовых экскаваторов с тросовой подвеской / В.С. Исаков, Ю.В. Максимов // Новые технологии управления движением технических объектов: тезисы докл. 9-й Международной науч.-техн. конф. (Новочеркасск, 2008 г.). – Новочеркасск, 2008. – Т.1 – С. 59.-62.
2. Шеметов П.А. Опыт эксплуатации канатных и гидравлических экскаваторов в условиях карьера Мурунтау / П.А. Шеметов, С.К. Рубцов, А.Г. Шлыков // Горная промышленность. – 2005. – №5. URL: <http://www.mining-media.ru/ru/article/karertekh/1227-opyt-ekspluatatsii-kanatnykh-i-gidravlicheskiykh-ekskaovorov-v-usloviyakh-karera-muruntau>
3. Кёльш Х.Р. Прогнозирование ресурса гидравлических насосов и моторов гидроприводов карьерных экскаваторов при их эксплуатации в условиях низких температур / Х.Р. Кёльш, Г.С. Бродсей // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – №11. – С. 35.-37.
4. Исаков В.С. Кинематика копания одноковшового экскаватора с канатной подвеской / В.С. Исаков, Ю.В. Максимов // Новые технологии управления движением технических объектов: тезисы докл. 9-й Международной науч.-техн. конф. (Новочеркасск, 2008 г.). – Новочеркасск, 2008. – Т. 1.– С. 55.-58.
5. Мандровский К.П. Оценка конкурентоспособности строительных одноковшовых экскаваторов // Дорожная держава. – 2007. – №5. – С. 50.-52.
6. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ИД Альянс, 2012. – 640 с.
7. Исаков В.С. О формировании структур замкнутых напряженных гидромеханических контуров // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Спец. Выпуск. Актуальные проблемы машиностроения. – 2006. – С. 55.-58.
8. Исаков В.С. Применение напряженных замкнутых кинематических контуров в рабочих механизмах экскаваторов / В.В. Исаков, Ю.В. Максимов // Современные тенденции Российской системы высшего профессионального образования: тезисы докл. Всероссийской конф. (Тверь, 14-16 мая 2008 г.). – Тверь, 2008. – С. 8.-9.
9. Максимов В.П. Концептуальное конструирование инновационных рабочих органов канатных экскаваторов / В.П. Максимов, Ю.В. Максимов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – №4. URL: <http://www/ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2183>.
10. В.С. Исаков, Ю.В. Максимов, Г.М. Симилайский. Рабочее оборудование ковшового экскаватора // Патент России №2450106. (2012). Бюл. №13.
11. Максимов Ю.В. Кинематическое исследование механизма поворота ковша канатного экскаватора // Инженерный вестник Дона. – 2013. – №4. <http://www/ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2174>.
12. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: учеб. для вузов. — Минск: Дизайн ПРО, 2004. — 640 с.
13. Домбровский Н.Г. Экскаваторы — М.: Машиностроение, 1969. – 318 с.
14. Максимов Ю.В. Математическое моделирование процесса копания канатным экскаватором с поворотом ковша / Ю.В. Максимов, В.П. Максимов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №2. URL: <http://www.science-education.ru/116-12285>.

## Justification of an Adaptive Working Body of a Cable Excavator

Maksimov Y.V.

LLC «Rostselmash»  
Rostov-on-Don, Russian Federation  
[019468@oaorsm.ru](mailto:019468@oaorsm.ru)

Isakov V.S, Maksimov V.P.

Platov South-Russia State Polytechnical University (NPI),  
Novocherkassk, Russian Federation  
[kafedra\\_sdkm@mail.ru](mailto:kafedra_sdkm@mail.ru)

**Abstract.** The article deals with the advantages and disadvantages of cable backhoe excavators in comparison with the hydraulic ones. It was stated that the main cause of the slow performance of rope excavators was a rigid attachment of the bucket to the handle. The authors of the article conduct the synthesis of the structure of rotation mechanism of the bucket, which does not require additional drive. The authors also developed the design of cable excavator bucket rotation mechanism where the bucket rotation is carried out with the help of additional kinematic connection of variable length between the bucket and the handle or the bucket and the boom and implementing the internal forces due to the mutual arrangement of the boom and the

arm. The authors consider the trajectory of the working process, where the rotation of the handle is carried out relative to the boom while turning the bucket relative to the handle. The parameters of the mechanism influencing the position of the bucket during the digging relative to the horizon are stated. The authors report the algorithm of search optimization of rotation mechanism geometrical parameters providing the required law of the bucket rotation with the given constraints.

**Keywords:** cable excavator, structural synthesis, the rotation mechanism of the bucket.

# Экспериментальное исследование и термодинамическое моделирование фазовых равновесий, реализующихся в системе $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3$ \*

Винник Д.А., Трофимов Е.А., Жеребцов Д.А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

г. Челябинск, Российская Федерация

[denisvinnik@gmail.com](mailto:denisvinnik@gmail.com)

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты синтеза соединений системы  $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3$ , а также результаты изучения характера и температур плавления полученных соединений. На основе анализа литературных данных, а также результатов собственных исследований проведены систематизация сведений о системе системы  $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3$  и построена фазовая диаграмма этой системы.

**Ключевые слова:** ферриты бария, моделирование фазовых диаграмм, дифференциальная сканирующая калориметрия, температуры плавления.

## ВВЕДЕНИЕ

Информация о фазовых равновесиях, реализующихся в системе  $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3$  необходима для анализа и совершенствования процесса выращивания кристаллов  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  из оксидных расплавов [1]. Кроме того данные по фазовым равновесиям в этой системе полезны с точки зрения совершенствования технологий иммобилизации радионуклидов. Несмотря на интерес, который проявляют исследователи к этой системе, начиная с 60-х годов XX века [2-5] до настоящего времени не сформулированы общепринятые представления о виде диаграммы состояния этой системы, о количестве ферритов, входящих в её состав, о температурных диапазонах их устойчивости, температурах и термодинамических характеристиках процесса их плавления.

Варианты диаграммы состояния, построенные по экспериментальным данным, которые можно встретить в литературе [2-7] существенно отличаются друг от друга не только количественно но и, зачастую, качественно.

Проведённый поиск не позволил обнаружить работ, посвященных моделированию фазовых равновесий в этой системе. Базы данных TDnucl и FTnucl (2015), входящие в комплект программного пакета «FactSage» производства «Thermfact» (Канада) и «GTT Technologies» (Германия), позволяют рассчитать координаты фазовых диаграмм этой системы. Однако два варианта диаграммы, которые получаются в результате расчётов, существенно отличаются между собой, а набор данных, которые программа использует в процессе расчёта доступен для пользователя программы только частично, что не позволяет внести в него коррективы.

Термодинамические параметры фаз существующих в системе  $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3$ , значения которых встречаются в опубликованных работах [8-11], существенно отличаются и очевидно нуждаются в оптимизации.

Целью настоящей работы стало экспериментальное определение температур плавления и характера плавления ферритов в системе  $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3$ , а затем, опираясь на полученные данные и данные приводимые в литературных источниках, термодинамическое моделирование фазовых равновесий в этой системе для построения её фазовой диаграммы.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Для исследования температуры плавления и его характера синтезированы вещества системы  $\text{Ba-Fe-O}$ :  $\text{Ba}_3\text{Fe}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Ba}_7\text{Fe}_4\text{O}_{13}$ ,  $\text{Ba}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ,  $\text{BaFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ . В качестве исходных компонентов использовали оксида бария и железа. Шихту перетирали, затем проводили синтез в платиновом тигле в течение 3 часов в резистивной печи. Для определения оптимальной температуры синтеза были проведены эксперименты при температурах от 1200 до 1450 °С.

Рентгенофазовый анализ проводили на порошковом дифрактометре Rigaku Ultima IV. Измерения проводили в диапазоне углов  $10^\circ$  to  $90^\circ$  со скоростью до  $2^\circ/\text{min}$  с использованием излучения  $\text{CuK}_\alpha$ . Исследование показало, почти все соединения (за исключением  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) плавятся конгруэнтно, т.к. дифрактограммы образцов до и после плавления имеют одинаковые наборы пиков. Идентичность дифрактограмм  $\text{Ba}_3\text{Fe}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Ba}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$  и  $\text{BaFe}_2\text{O}_4$  литературным данным свидетельствует о низком содержании в образцах посторонних фаз. Литературных данных о структуре  $\text{Ba}_7\text{Fe}_4\text{O}_{13}$  не найдено.

Температуру плавления определяли по пику плавления на кривой, полученной на дифференциальном термоанализаторе. Скорость нагрева и охлаждения составляла  $7,5^\circ\text{C}$ . Образец помещали в платиновую лодочку, затем в стандартный корундовый тигель. Для каждого состава исследовали 2 образца. Отклонения температуры пиков составляли не более 3 %.

В результате проведенного исследования синтезированных веществ были экспериментально установлены температуры плавления образцов  $\text{Ba}_7\text{Fe}_4\text{O}_{13}$ ,  $\text{Ba}_3\text{Fe}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Ba}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ,  $\text{BaFe}_2\text{O}_4$  равны 1325, 1320, 1365, 1405 °С (1598, 1593, 1638, 1678 К) соответственно.

\* Исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 13-08-00545.

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии проведены исследования синтезированных нами монокристаллов, соответствующих по составу  $BaFe_{12}O_{19}$ . Нагрев до температуры 1500 °С не привёл к их плавлению. Нагрев на воздухе до 1700 °С с последующим охлаждением вместе с печью и рентгенофазовый анализ продуктов позволяют утверждать, что при давлении воздуха 1 атм гексаферрит бария М-типа плавится incongruently.

Результаты проведённого исследования в сопоставлении с данными по температурам плавления для соединений, относящихся к системе  $BaO-Fe_2O_3$ , заимствованным из различных источников представлены в табл. 1.

Таблица 1

Температуры плавления или разложения твёрдых оксидных фаз по литературным данным и данным настоящей работы

	T <sub>m</sub> , К			
	Данная работа	[2]	[5]	[3]
BaO*	–	–	–	–
Ba <sub>7</sub> Fe <sub>4</sub> O <sub>13</sub>	1598	–	–	1599**
Ba <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1593	–	–	***
Ba <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1638	1643	1645	1653
BaFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1678	1723	1720	1693
Ba <sub>2</sub> Fe <sub>6</sub> O <sub>11</sub> ****	–	–	–	–
BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	>1773**	1853±50	1728... 1808**	1738**
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *****	–	–	–	–
	T <sub>m</sub> , К			
	[4]	[8]	[15]*****	[16]*****
BaO*	–	2196	2289	2286
Ba <sub>7</sub> Fe <sub>4</sub> O <sub>13</sub>	–	1603	1598	1595
Ba <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	–	1593	–	–
Ba <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–	1643	1629	1646
BaFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1694±5	1693, 1723	1682	1677
Ba <sub>2</sub> Fe <sub>6</sub> O <sub>11</sub> ****	1418±5	–	1418	1431
BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	1723**	1723*****	1735**	1742**
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *****	–	–	1893	1957

\* 2198 К [9]; \*\* incongruentное плавление; \*\*\* существует и образует твёрдый раствор с Ba<sub>7</sub>Fe<sub>4</sub>O<sub>13</sub>; \*\*\*\* температуры разложения на BaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> (помимо представленных в таблице данных – 1423±10 [12], 1383 [13]); \*\*\*\*\* в различных справочниках встречаются следующие значения температуры плавления (с разложением): 1812, 1835, 1838, 1839 К; \*\*\*\*\* температуры определены по рассчитанной фазовой диаграмме системы BaO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; \*\*\*\*\* нет данных о характере плавления.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для расчёта фазовой диаграммы использован блок «Phase Diagram» программного пакета «FactSage» (версия 6.4) и созданные в процессе исследования базы термодинамических данных, содержание которых представлено в табл. 2 и 3. Значения термодинамических функций отчасти заимствованы из литературных источников, а отчасти стали результатом оптимизации, направленной на согласование данных с целью получения согласующейся с экспериментальными данными картины фазовых равновесий в моделируемой системе.

Для описания избыточной энергии Гиббса при образовании расплава в системе BaO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в работе использован вариант модели Редлиха-Кистера:

$$\Delta G_m^E = x_{BaO} x_{Fe_2O_3} [L_0 - L_1 (x_{BaO} - x_{Fe_2O_3})], \quad (1)$$

где  $\Delta G_m^E$  – молярная избыточная энергия Гиббса,  $x_{BaO}$  и  $x_{Fe_2O_3}$  – мольные доли компонентов оксидного расплава,  $L_0$  и  $L_1$  – температурнозависимые параметры модели.

В табл. 2-4 представлены параметры, использованные для описания твёрдых оксидных фаз и расплава BaO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Заимствованные параметры снабжены указанием на источник заимствования. Значения без ссылок получены в ходе настоящей работы в ходе согласования исходных литературных значений параметров с результатами экспериментального исследования.

Таблица 2

Параметры, использованные для описания твёрдых оксидных фаз

	T <sub>m</sub> , К	$\Delta_f H_{298}^\circ$ , Дж/моль	$S_{298}^\circ$ , Дж/(моль·К)
BaO	2198	-548104 [18]	72.069 [18]
Ba <sub>7</sub> Fe <sub>4</sub> O <sub>13</sub>	1598	-6030800	693.8
Ba <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1593	-2733000	297.35
Ba <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1638	-2172600	182.0
BaFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1678	-1572300	129.8
Ba <sub>2</sub> Fe <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	1423	-4070000	439.18
BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	1774	-5920000	429.5 [10]
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1839	-825000 [17]	87.4 [17]

Таблица 3

Коэффициенты уравнения температурной зависимости теплоёмкости ( $c_p = a + bT + cT^2 + c'/T^2$ ), Дж/(моль·К)

	a	b	c'	c
BaO	50.622	0.006827	-792170.22	–
Ba <sub>7</sub> Fe <sub>4</sub> O <sub>13</sub> [9]	506.88	0.1121	-3798791	–
Ba <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	265	0.011	-1000000	–
Ba <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	232.15	0.051342	-1739846.28	–
BaFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	158.65	0.03509	-1189021.58	–
Ba <sub>2</sub> Fe <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	267.05	0.0425	-2015534.1	–
BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> [9] 298–725 К	348.6	1.1682	–	–
BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> [9] >725 К	695.79	0.1546	–	–
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [17] 298–700 К	143.7	-0.0368	-3147020	7.225·10 <sup>-5</sup>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [17] 700–955 К	638.1	-0.964	-44749240	0.0005612
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [17] 955–970 К	-5041690	6908.19	7.957924·10 <sup>11</sup>	-2.662215
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [17] 970–1050 К	-34422.16	43.508	6.456186·10 <sup>9</sup>	-0.0153983
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [17] >1050 К	80.38	0.0558	16685510	-1.236·10 <sup>-5</sup>



Таблица 4

Параметры, использованные для описания расплава  
BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

$L_0$	$-267858.17162 + 1.093099325 \cdot T$
$L_1$	$-182512.14972 + 377.723363489 \cdot T - 46.5036654535 \cdot T \cdot \ln(T)$
BaO <sub>liq</sub>	$T_m = 2197.9 \text{ K}, \Delta H_m = 59000 \text{ Дж/моль [18],}$ $c_{p \text{ liq}} = 52.629 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{K)}$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3 liq</sub>	$T_m = 1839 \text{ K}, \Delta H_m = 87000 \text{ Дж/моль [17],}$ $c_{p \text{ liq}} = 134.494 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{K)}$

На рис. 1-2 представлены результаты расчёта фазовой диаграммы системы BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

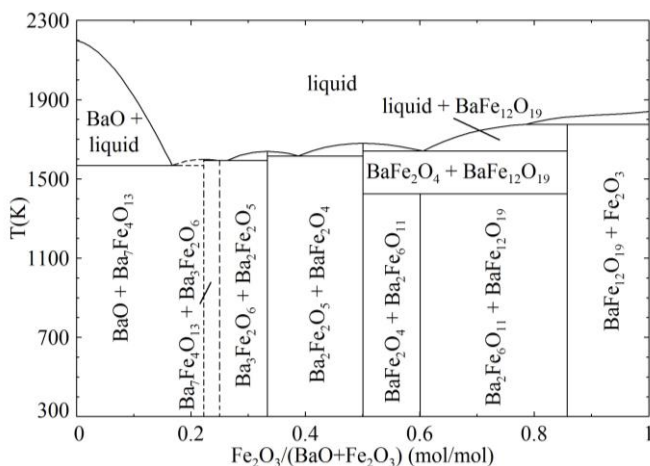


Рис. 1. Результат расчёта фазовой диаграммы системы BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

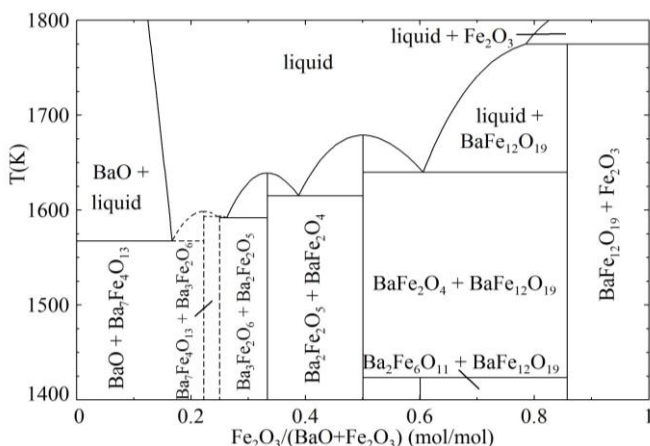


Рис. 2. Фрагмент фазовой диаграммы системы BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для интервала температур 1400-1800 °K

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты исследования характера и температур плавления соединений системы, а также результаты моделирования системы BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> неплохо соответствуют большей части ранее опубликованных данных, о чём свидетельствуют, в частности, данные табл. 1.

В то же время исследования данной системы должны быть продолжены до прояснения некоторых дискуссионных вопросов.

К таким вопросам относятся температура и характер плавления BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>. Согласно нашим данным это веще-

ство плавится инкогруэнтно (что соответствует данным работы [3]), однако при температурах несколько больше, чем указано в этой работе (что, в свою очередь, соответствует данным работы [2]). Сложный характер температурной зависимости теплоёмкости для этого соединения также должен быть исследован более тщательно. Имеющиеся данные экспериментальных исследований этой характеристики [10, 11] существенно расходятся количественно и к тому же ограничены максимальной температурой порядка 1450 °K [11]. Поэтому в качестве первого приближения в ходе наших расчётов использованы оценки зависимости теплоёмкости из работы [9].

Температуры плавления BaO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, как видно из данных таблицы 1 и примечаний к ней также нуждаются в более однозначном определении. В ходе наших расчётов мы старались использовать надёжные справочные данные. Возможно они уязвимы для критики, однако данные, которые используются в базах TDnucl и FTnucl, вряд ли более обоснованы.

Наконец, дискуссионным остаётся вопрос о составе фаз в области, показанной на диаграмме прерывистыми линиями. Традиционно, начиная с 60-х годов прошлого века считают, что в этой области находится соединение Ba<sub>7</sub>Fe<sub>4</sub>O<sub>13</sub>. В современных базах данных, которые позволяют рассчитывать фазовую диаграмму интересующей нас системы также содержатся данные о Ba<sub>7</sub>Fe<sub>4</sub>O<sub>13</sub>. Вместе с тем в литературе практически не приводится данных о кристаллической структуре этого соединения, в то время как известно, что существует соединение Ba<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, термодинамические характеристики которого (включая и область довольно высоких температур) исследованы в работе [10], а параметры кристаллической ячейки представлены, например, в работе [8]. При этом соединение Ba<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>6</sub> на диаграммах в литературе практически не встречается. В обзорной части работы [8] указывается на возможность существования обоих веществ. При этом авторы приводят рассматриваемые ферриты бария как разные вещества с тетрагональной (Ba<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) и орторомбической (Ba<sub>7</sub>Fe<sub>4</sub>O<sub>13</sub>) сингонией.

Проведенные в ходе настоящей работы эксперименты позволили определить, что для веществ, соответствующих обоим составам, характерно конгруэнтное плавление, а также позволили измерить температуру такого плавления. Эти данные были использованы в наших расчётах.

Однако проведённые нами рентгенофазовые исследования дают некоторое основание предполагать, что в данной зоне диаграммы существует область твердых растворов на основе Ba<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>6</sub> кубической сингонии с изменяющимся количеством Fe<sup>4+</sup>. Такой вывод отчасти согласуется с данными [19], где установлено существование твердых растворов между Ba<sub>7</sub>Fe<sub>4</sub>O<sub>13</sub> и Ba<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>6</sub> орторомбической сингонии, а также с данными Р. Vatti [3]. Для уточнения особенностей кристаллической структуры, а также определения границ твердых растворов на основе Ba<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>6</sub> необходимы дополнительные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования синтезированы соединения системы BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, экспериментально установлены их температуры плавления. С использованием полученных данных проведена оптимизация ряда термодинамических

функций и осуществлено термодинамическое моделирование фазовых равновесий в исследуемой системе, результаты которого представлены в виде фазовой диаграммы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wittenauer M.A. Growth and characterization of high purity single crystals of barium ferrite / M.A. Wittenauer, J.A. Nyenhuis, A.I. Schindler, H. Sato, F.J. Friedlaender, J. Truedson, R. Karim, C.E. Patton // Journal of Crystal Growth. – 1993. – vol. 130, is. 3-4. – P. 533-542.
2. Goto Y. On the Phase Diagram of the Condensed System BaO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Y. Goto, T. Takada // Journal of the Japan society of powder and powder metallurgy. – 1960. – vol. 7, is. 2. – P. 35-40.
3. Batti P. Equilibrium Diagram of the System BaO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (in Italian) // Ann. Chim. (Rome). – 1960. – vol. 50 – P. 1461-1478.
4. Ziolkowski Z. The Pseudobinary System BaO·6Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–BaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (in Polish) // Prace Instytut Hutniczych. – 1965. – vol. 14, is. 2 – P. 155-163.
5. Van Hook H.J. Thermal Stability of Barium Ferrite (BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>) // Journal of the American Ceramic Society. – 1964. – vol. 47, is. 11. – P. 579-581.
6. Wohlfarth E.P. Handbook of Magnetic Materials. – third ed. – Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1982. – 852 p.
7. Ropp R.C. Encyclopedia of the Alkaline Earth Compounds. – Amsterdam: Elsevier B.V., 2013. – 1187 p.
8. Шабанова Г.Н. Структура системы BaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Г.Н. Шабанова, С.Н. Быканов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2002. – № 7-8. – С. 21.-25.
9. Шабанова Г.Н. Термодинамическая оценка образования ферритов бария / Г.Н. Шабанова, С.Н. Быканов, И.В. Гуренко, З.И. Ткачева // Информационные техноло-

гии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сб. научн. тр. ХГПУ. – 1998. – Т. 6, №3. – С. 35.-40.

10. Rakshit S.K. Heat capacities of some ternary oxides in the system Ba–Fe–O using differential scanning calorimetry / S.K. Rakshit, S.C. Parida, S. Dash, Z. Singh, B.K. Sen, V. Venugopal // Journal of Alloys and Compounds. – 2007. – is. 438. – P. 279-284.

11. Denisov V.M. High-temperature heat capacity of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> and BaSc<sub>0.5</sub>Fe<sub>11.5</sub>O<sub>19</sub> / V.M. Denisov, L.T. Denisova, L.A. Irtyugo, G.S. Patrin, N.V. Volkov, L.G. Chumilina // Physics of the Solid State. – 2013. – vol. 55, is. 1. – P. 240-242.

12. Slocari G. Phase Equilibrium in the Subsystem BaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–BaO·6Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Journal of the American Ceramic Society. – 1973. – vol. 56, is.9. – P. 489-490.

13. Appendino P. Sul sistema monoferrito di bario-seaferrito di bario / P. Appendino, M. Montorsi // Ann. di Chimica. – 1973. – is. 63. – P. 43-46.

14. Kubaschewski O. Metallurgical Thermochemistry. / O. Kubaschewski, E.L. Evans, C.B. Alcock. – London: Pergamon Press, 1967. – 495 p.

15. TDnucl database (NUCLEA nuclear database), FactSage 6.4.

16. FTnucl database (FACT nuclear database), FactSage 7.0.

17. SGPS database (SGTE pure substances database), FactSage 6.4.

18. FactPS database (FACT pure substances database), FactSage 6.4.

19. Shipko M.N. Phase structure in the BaO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system (in Russian) / M.N. Shipko, L.M. Letyuk, N.L. Aksel'rod // Izv. Akad. Nauk SSSR, Neorg. Mater. – 1990. – vol. 26, is. 12. – P. 2551-2555.

## Experimental Study and Thermodynamic Modeling of Phase Equilibria in the System BaO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

D.A. Vinnik, E.A. Trofimov, D.A. Zhrebtsov  
South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[denisvinnik@gmail.com](mailto:denisvinnik@gmail.com)

**Abstract.** This article presents the results of the synthesis of compounds of BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and the results of nature and melting temperatures study. Based on an analysis of published data, as well as the results of our studies conducted systematization sections and modeling diagram of the system BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Keywords:** barium ferrite, modeling phase diagrams, differential scanning calorimetry, Fact Sage.

# Изучение угла смачивания карбида циркония\*

Аникеев А.Н., Чуманов И.В.

Филиал Южно-Уральского государственного университета  
(национального исследовательского университета) в г. Златоусте  
г. Златоуст, Российская Федерация.

[anikeev-ml@mail.ru](mailto:anikeev-ml@mail.ru)

**Аннотация.** Данная статья посвящена изучению угла смачиваемости карбида циркония. Эксперимент по определению угла смачиваемости проводился двумя разными способами, контактным и бесконтактным. По заключении проведения эксперимента были рассмотрены микроструктуры полученных областей контакта металла и подложки и проведены спектральные анализы. В заключении приведены выводы по проделанной работе.

**Ключевые слова:** угол смачивания, карбид циркония.

## ВВЕДЕНИЕ

Перспективным направлением получения композиционных материалов, обладающих высокими механическими свойствами, является внедрение в структуру металла дисперсных частиц карбидов, оксидов или нитридов. Вводимые частицы, в большей или меньшей степени, взаимодействуют с расплавом. От степени этого взаимодействия зависят свойства приобретаемые материалом. Таким образом, целью данной работы является теоретическое и практическое изучение процесса и продуктов взаимодействия карбида циркония с низкоуглеродистой сталью.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Практическое исследование угла смачивания карбида циркония проводили в Центре высокотемпературных исследований Научно-исследовательского института литья (Foundry Research Institute, г. Краков, Польша). Исследование проводилось на экспериментальном комплексе, рис. 1. Данный исследовательский комплекс предназначен для оценки комплексных характеристик материалов при высоких температурах, в том числе для изучения смачиваемости материалов различными методами. Комплекс позволяет производить испытания различных материалов в условиях контролируемой температуры (до 2000 °С), под вакуумом (до  $10^{-10}$  ГПа) или в защитной атмосфере [1].

Из мелкодисперсного карбида циркония была получена подложка, формирование которой осуществлялось в прессе для запрессовки образцов при температуре 180 °С и давлении 300 бар. Полученная подложка для исследования не полировалась. В качестве смачивающего материала использовались образцы металла, следующего химического состава, табл. 1.

Таблица 1

Химический состав образцов металла  
низкоуглеродистой стали

Элемент	C	Mn	Si	W	Fe
Содержание, %	0,217	0,301	0,221	0,069	основа

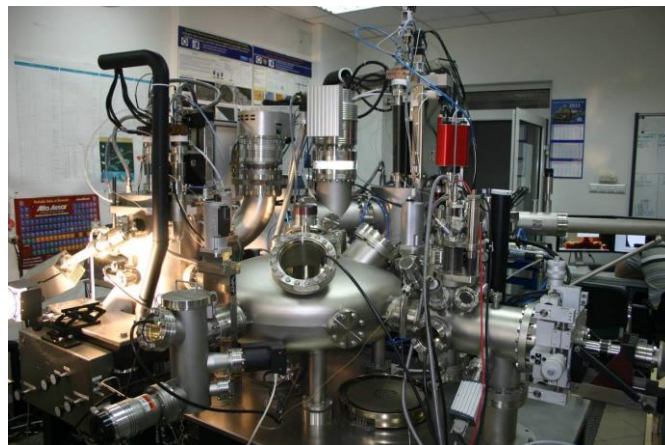


Рис.1. Экспериментальный комплекс, для оценки комплексных характеристик материалов при высоких температурах (в том числе для изучения смачиваемости материалов различными методиками)

Исследование кинетики взаимодействия были выполнены при помощи методик контактного и бесконтактного нагрева в атмосфере аргона.

## ХОД ЭКСПЕРИМЕНТА

Нагревание подложки из карбида циркония вместе с образцами металла проводили в течение 3-х часов до температуры 1600 °С со скоростью 495 °С/час, в атмосфере аргона (степень чистоты 99,9992 %), при давлении 850-900 мбар. Первый образец низкоуглеродистой стали устанавливался на подложку. Второй образец находился в отдельной мини-камере (дозированном устройстве (капельнице), имеющей форму наконечника, не контактирующей с подложкой “рис.2 а”). Весь процесс нагрева и плавления металла фиксировался на высокоскоростную камеру (2000 кадров/сек).

В ходе эксперимента было установлено, что активное взаимодействие металла с материалом подложки не происходит даже при достижении температуры 1450 °С при которой образец начинается плавиться. После расплавления, в процессе нагрева происходит формирование капли жидкого металла на подложке. При достижении температуры в 1550 °С процесс формирования останавливается и капля жидкого металла остается неизменной при последующем нагреве “рис. 2 б”), показав краевой угол смачивания равный 50°.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования № 11.1470.2014/К, а также поддержана по Соглашению №14.z56.15.7690-МК



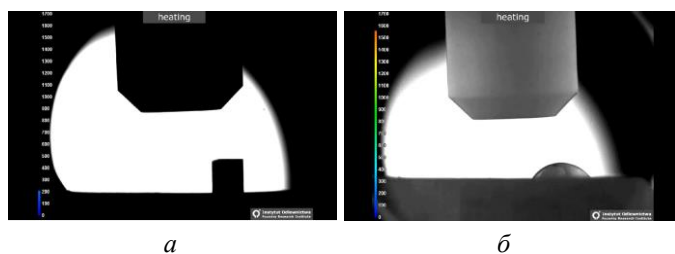


Рис. 2. Кинетика высокотемпературного взаимодействия образца низкоуглеродистой стали с подложкой ZrC в атмосфере аргона по методике контактного нагрева: а – начало нагрева; б – сформировавшаяся капля расплавленного металла ( $T = 1540\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

При достижении температуры  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , из мини-камеры расположенной внутри камеры, где производилось нагревание, на подложку выдавливалась капля расплавленного металла образовавшаяся в процессе нагрева. Эксперимент показал, что после выдавливания капли металла на подложку, происходит формирование капли, а окончательно сформировавшаяся капля имеет краевой угол смачивания равный  $40^{\circ}$ , рис. 3.

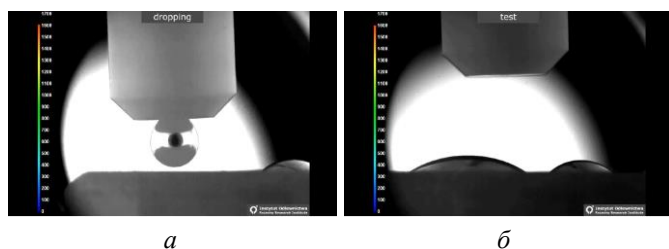


Рис. 3. Кинетика высокотемпературного взаимодействия образца низкоуглеродистой стали с подложкой ZrC в атмосфере аргона по методике бесконтактного нагрева: а – начало нагрева; б – сформировавшаяся капля расплавленного металла ( $T = 1540\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДЛОЖЕК

Исследование продуктов взаимодействия подложек карбида циркония и низкоуглеродистой стали проводили на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM3000. В процессе исследования были изучены области контакта каждого из образцов, сделаны фотографии их микроструктур. На полученных фотографиях четко видно границу контакта капли металла и подложки, рис. 4. С подложки отобраны спектры, с области контакта с металлом, табл. 2, а так же областей неконтактирующих с металлом, табл. 3.

Таблица 2

Состав спектра с области контакта металла с подложкой

Элемент	Zr	C	Fe
Содержание, %	91,8	7,8	0,4

Таблица 3

Состав спектра с области подложки не контактирующей с металлом

Элемент	Zr	C
Содержание, %	92,8	7,2

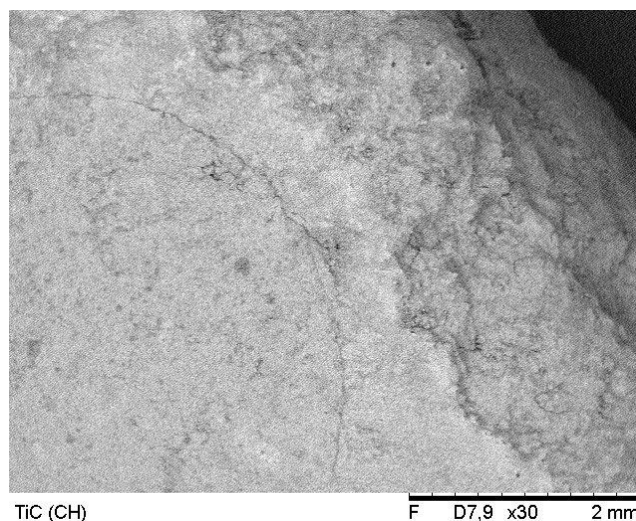


Рис. 4. Изображение микроструктуры ZrC (чистая поверхность+область контакта) после эксперимента, увеличение в 30 раз

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Результаты исследования показывают, что несмотря на применение различных методик изучения взаимодействия карбида циркония, полученные результаты различаются незначительно. Краевые углы в обоих случаях значительно меньше  $80^{\circ}$ , что говорит о хорошей смачиваемости карбида циркония. Однако при бесконтактном методе нагрева краевой угол смачивания на  $10^{\circ}$  меньше чем при контактном нагреве. Исследование подложек показало, что в местах непосредственного взаимодействия подложек и металла четко идентифицируются зерна циркония. Содержание железа в этой области показывает, что в незначительной степени имело место взаимодействие металла с подложкой. Полученные результаты указывают на то, что при создании новых композиционных материалов, основанных на введении дисперсных частиц ZrC, благодаря углу смачивания менее  $80^{\circ}$  и низкому взаимодействию частиц с металлом, частицы будут связываться расплавом, но не будут в нём растворяться. Так же результаты эксперимента указывают на то, что контактный метод нагрева имеет погрешность при измерении угла смачивания предположительно из-за образовавшихся продуктов реакции металла с подложкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анিকেев А.Н. Исследование смачиваемости карбида вольфрама металлическим расплавом. Ч.1. / А.Н. Анিকেев, И.В. Чуманов // Электротехнология. – 2014. – №1. – С. 32-34.
2. Анিকেев А.Н. Исследование смачиваемости карбида вольфрама металлическим расплавом. Ч.2. / А.Н. Анিকেев, И.В. Чуманов // Электротехнология. – 2014. – №2. – С. 34-35.
3. Chumanov I.V. Preparation of precipitation-strengthened hollow billets for rotary dispersers / I.V. Chumanov, A.N. Anikeev, V.I. Chumanov // Metallurgist. – 2011. – Т. 55, №5-6. – Р. 439-443.



4. Sobchzak N. Experimental complex for investigations of high temperature capillarity phenomena / N. Sobczak, R. Nowak, W. Radziwill // Materials Science and Engineering. – 2008. – №495 (1-2). – P. 43.-49.

5. Sobchzak N. Some methodological aspects of high temperature capillarity phenomena investigations – Part I // Transactions of the Foundry Research Institute. – 1994. – XLIV (4). – P. 221.-238.

## **Study of Contact Angle of Zirconium Carbide**

Anikeev A.N., Chumanov I.V.

South Ural State University (national research university), Zlatoust Branch  
Chelyabinsk region, Zlatoust, Russian Federation

[anikeev-ml@mail.ru](mailto:anikeev-ml@mail.ru)

**Abstract.** This article is devoted to the study of the angle of wettability of zirconium carbide. Experiment to determine the angle of wettability was carried out in two different ways, contact and contactless. At the conclusion of the experiment we examined the microstructure obtained contact areas of the metal and the substrate and held spectral analyzes. In conclusion, given the conclusions of the work done.

**Keywords:** angle, zirconium carbide.

# Прогнозирование длительной прочности молибденового сплава

Самойлов С.П., Чернявский А.О.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация

[Samoilov.s.p@mail.ru](mailto:Samoilov.s.p@mail.ru)

**Аннотация.** С использованием комплекса Gleeble-3800 исследовано деформационное поведение молибденового сплава, применяемого в теплонагруженных конструкциях. Испытания в температурном диапазоне от 293 до 1773 °К включали монотонное растяжение до разрыва, циклическую деформацию при силовом и кинематическом нагружении, кратковременные (до 9 часов) испытания на ползучесть. При монотонном нагружении предел прочности достигается при весьма малой (доли процента) пластической деформации, хотя при кинематическом нагружении материал демонстрирует ресурс пластичности более 50%. Повторное нагружение сопровождается снижением прочности, но увеличением пластической деформации, соответствующей пределу прочности. В области высоких температур происходит смена механизма разрушения с вязкого на квазихрупкое рассейное. Предложена методика прогнозирования длительной прочности и накопленных деформаций ползучести с использованием аналитического выражения термоактивационного типа, описывающего стадию установившейся ползучести. Для описания стадии предразрушения использован подход, аналогичный известному решению ХOFFа для идеально вязкого разрушения.

**Ключевые слова:** молибденовый сплав, длительная прочность, ползучесть, деформационное разрушение.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкое распространение в теплонагруженных конструкциях получили сплавы жаропрочных металлов – вольфрама, молибдена, ниобия. Имеющие заметно большую, чем у стали, температуру плавления, такие сплавы сохраняют прочность при температурах до 1600 °С. Этим обусловлено их активное применение в аппаратах аэрокосмической промышленности, энергетики и металлургии, для которых повышение рабочей температуры позволяет увеличить к.п.д. и достичь требуемых массогабаритных характеристик.

В настоящей работе исследованы свойства молибденового сплава, изготавливаемого по технологии, отличающейся от традиционных для подобных материалов методов порошковой металлургии, для которых свойства получаемого металла хорошо изучены [1-3 и др.].

Наличие небольшого количества легирующих добавок заметно повышает жаропрочность сплава по сравнению с чистым молибденом, для которого в литературе имеются обширные экспериментальные данные по ползучести и длительной прочности [4-7 и др.].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваемый сплав предполагается применять в конструкциях, работающих при длительном термоциклическом нагружении. Задачей исследования являлось определение характеристик, необходимых для расчета на прочность этих конструкций: однократной и циклической прочности, ресурса пластичности и вида диаграмм дефор-

мирования, а также характеристик ползучести. Ограниченные временные возможности проведения экспериментов и высокие ресурсные требования к конструкциям предполагают также создание модельных представлений, позволяющих хотя бы ориентировочно экстраполировать поведение материала на большие интервалы времени.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исходный материал представлен в двух состояниях поставки – прутки разных диаметров (далее – марки А и Б). Для сравнения использованы данные других исследователей о материалах близкого состава, полученных на образцах, вырезанных из листов вдоль (марка В) и поперек (марка Г) направления проката, а также из прутка (марка Д).

При испытаниях использованы средства комплекса Gleeble-3800. Образцы для испытаний на растяжение с отношением рабочей длины к диаметру 2 и 3 испытаны в вакуумной камере, нагреты пропуском тока. Температура в центральной части образца и ее перепад вдоль базы зафиксированы с помощью термопар. В случае длительных испытаний для контроля температуры использован пирометр. Для контроля деформации использованы высокотемпературные продольные и поперечные датчики.

В диапазоне температур от 20 до 1500 °С проведены испытания на однократное растяжение до разрыва со скоростью деформации  $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Результаты статических испытаний были использованы для планирования последующих испытаний на ползучесть и малоцикловую прочность.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Диаграммы деформирования в диапазоне температур 750-1200 °С (рис. 1) имеют короткий участок упрочнения и преимущественно ниспадающий характер. Истинные кривые также содержат участок разупрочнения, который в некоторых случаях достигает момента локализации деформации.

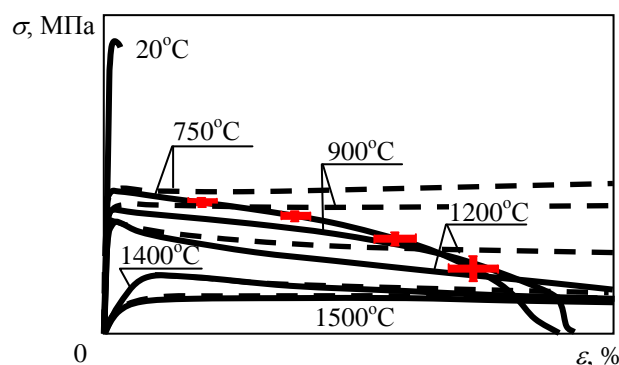


Рис. 1. Результаты испытаний на однократное растяжение при температурах 20 – 1500 °С: условные (сплошные линии) и истинные (штриховые) кривые деформирования

Столь заметная склонность материала к деформационному разупрочнению, по всей видимости, обусловлена предварительной упрочняющей механической обработкой типа прокатки. Подобный вид кривых деформирования наблюдают и для сталей: после предварительной деформации порядка 20% и более их прочность в перпендикулярном направлении заметно возрастает, а на кривой деформирования появляется участок разупрочнения [8].

Вероятно, наблюдаемое разупрочнение может быть связано с совокупным влиянием текстуры и повышенной плотности дислокаций после прокатки, а также закрепления дислокаций облаками атомов внедрения при изотермических выдержках, предшествовавших деформации. При эксплуатации конструкций подобный эффект не позволяет использовать пластичность материала, поскольку приводит к локализации деформаций.

Характер разрушения в зависимости от температуры изменяется немонотонно (рис. 2).

В диапазоне 20-300 °С материал разрушается хрупко, практически без остаточных деформаций, в силу хладноломкости (рис. 2, а).

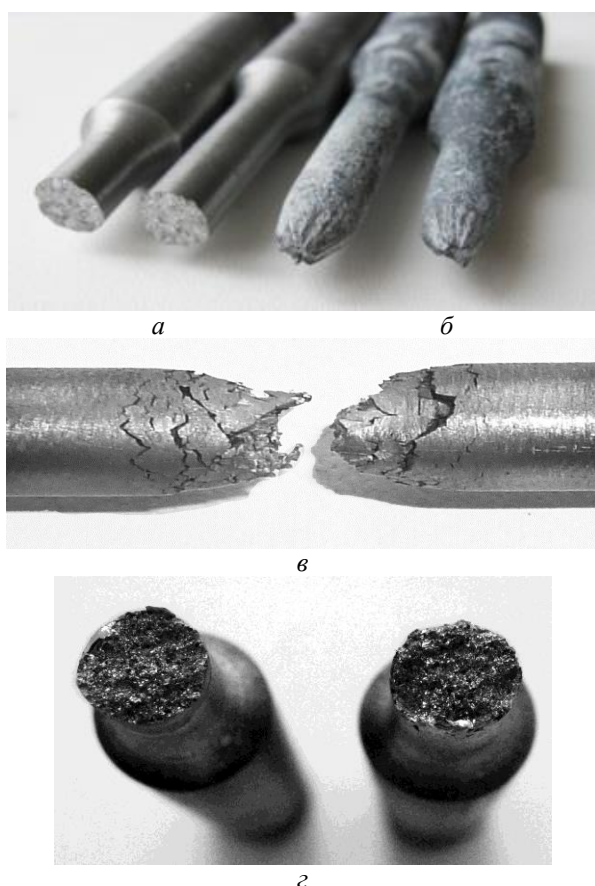


Рис. 2. Характер разрушения образцов в зависимости от температуры испытаний: а – 20-300 °С; б – 750-900 °С; в – 1200, 1500 °С; г – 1400 °С

При температурах 750-900 °С разрушение можно охарактеризовать как вязкое, по механизму Хоффа [9], с выраженной анизотропией зоны локализации (рис. 2, б).

Аналогичный характер разрушения наблюдается при температуре 1200 °С. Однако, при испытаниях с меньшей скоростью деформации ( $2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ) механизм разрушения меняется (рис. 2, в). Рабочая зона образца по мере деформирования покрывается сеткой трещин, наблюдается

фрагментация. Несмотря на кажущуюся хрупкость разрушения, остаточные деформации сопоставимы с наблюдаемыми при разрушении вязкого типа, поэтому такой тип разрушения можно охарактеризовать как квазихрупкий. Соответствующие разным скоростям условные кривые деформирования показаны на рис. 3.

При температуре 1500 °С разрушение также является квазихрупким. По-видимому, «переходной» является температура около 1400 °С, при которой наблюдались как вязкие, так и квазихрупкие разрушения (рис. 4).

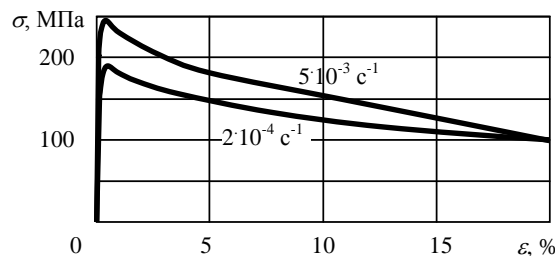


Рис. 3. Влияние скорости деформирования (при 1200 °С)

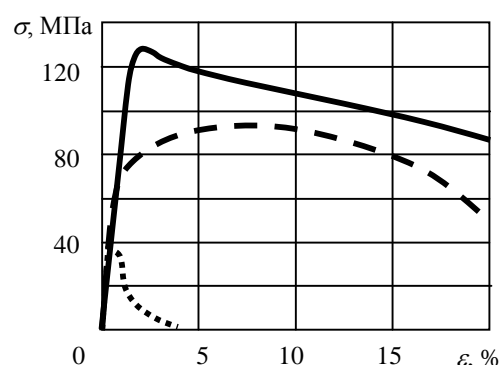


Рис. 4. Условные кривые деформирования при 1400 °С

Вероятно, в температурном диапазоне 1300-1400 °С происходит смена механизма пластической деформации. Действующий при меньших температурах механизм оказывается уже неэффективен, в то время как высокотемпературный механизм еще недостаточно активен. Не имеющий возможности к эффективному пластическому деформированию, материал в данном температурном диапазоне разрушается хрупко.

Наличие перехода к иному процессу деформирования и разрушения в высокотемпературной области является общеизвестным фактом [10]. Более подробно данный вопрос будет обсужден в следующем разделе.

Испытания на ползучесть проведены в температурном диапазоне 1200-1500 °С по «классической» схеме, когда фиксируется постоянное усилие. Каждой из получаемых кривых ползучести поставлены в соответствие температура и условное напряжение, рассчитанное как отношение усилия ползучести к площади поперечного сечения недеформированного образца. Наибольшая продолжительность испытаний составила 9 часов. Типичные кривые ползучести для материала марки Б показаны на рис. 5. Как и в случае с кратковременными испытаниями, особо выделяется температура 1400 °С. Разрушение образцов при этой температуре происходит без остаточных деформаций. При температуре 1500 °С разрушение носит квазихрупкий рассеянный характер, от рабочей части образцов отделяются фрагменты.

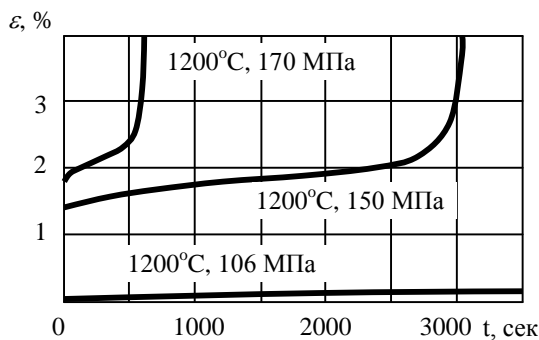


Рис. 5. Типичные кривые ползучести для сплава марки Б

С целью снятия технологического деформационного упрочнения были проведены испытания при 1200 °С с циклическим приложением нагрузки. Испытания включали 2 типа экспериментов. В первом случае нагрузка осуществлялась кинематически, задавался от нулевой по деформациям цикл. Пример такого цикла с размахом деформации 0,1 % показан на рис. 6, а. Огибающая напряжений в циклах деформирования показана на рис. 6, б. Уменьшение размаха напряжений от цикла к циклу свидетельствует о протекании процессов изотропного разупрочнения и наличии в материале рассеянных повреждений. Этот вывод подтверждается визуальным осмотром образца после испытания: на поверхности деформированной части видна сетка мелких трещин. Доллом образца (рис. 6, в) показывает, что, несмотря на наличие сетки усталостных трещин, материал сохраняет значительную пластичность. Кривая долома (сплошная линия) лежит значительно ниже кривой однократного деформирования (точки). Предел прочности отличается в два раза. С другой стороны, кривая долома выгодно отличается от кривой однократного деформирования наличием протяженного участка упрочнения.

В другом типе испытаний комбинировались силовое нагружение и выдержки при постоянном усилии в течение 20 секунд (рис. 7, а). Выдержки при постоянном растягивающем усилии сопровождались накоплением деформаций ползучести, которое оказалось более быстрым, чем ползучесть при постоянном напряжении (рис. 7, б, тонкая линия – ползучесть при постоянном напряжении, остальные – ползучесть в последовательных циклах). Полученный результат демонстрирует как дополнительное накопление деформаций, связанное с повторным возникновением стадии неустановившейся ползучести, так и изотропное разупрочнение, проявляющееся в виде ускорения ползучести на второй стадии. Эффект деформационного разупрочнения достигается и в том случае, когда пластическая деформация следует за стадией ползучести (кривая долома после ползучести отличается от кривой однократного деформирования).

#### АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

По результатам экспериментов была определена реологическая функция – зависимость скорость установившейся ползучести от приложенного напряжения и температуры. Обоснование существования подобной функции дано в работах [11, 12]. Помимо результатов испытаний на ползучесть, при определении реологической функции использованы результаты кратковременных испытаний. В

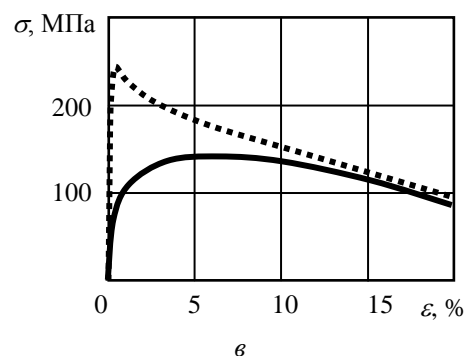
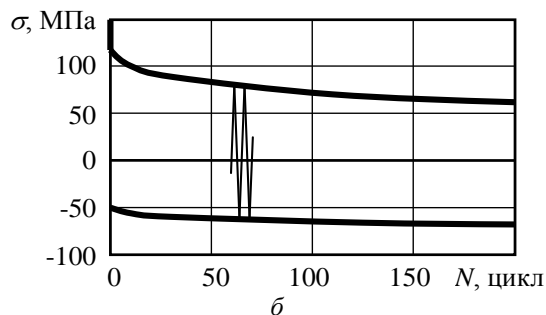
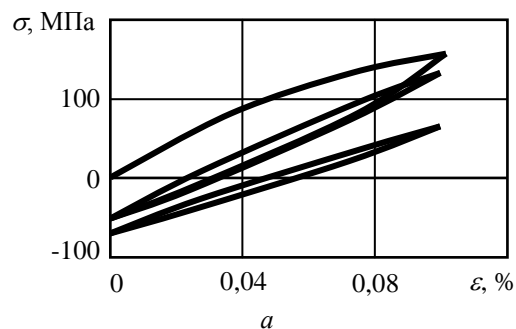


Рис. 6. Разупрочнение при кинематическом циклическом нагружении

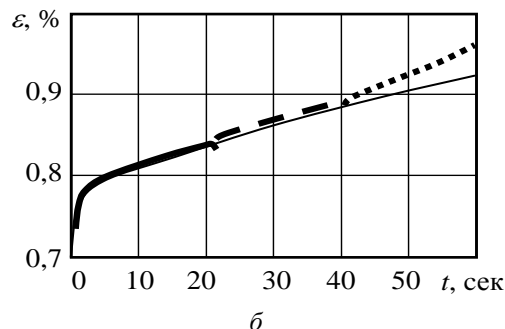
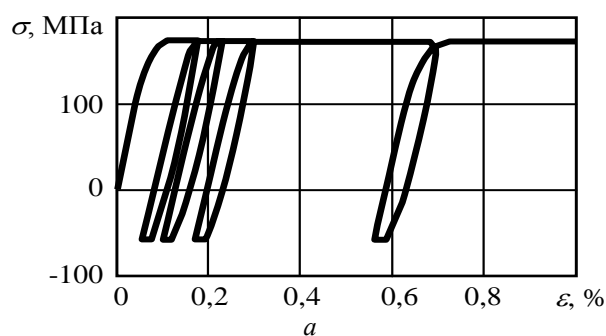


Рис. 7. Разупрочнение и накопление деформации при силовом циклическом нагружении с выдержками



этом случае под скоростью установившейся ползучести понималась скорость деформации, а под приложенным напряжением – либо значение максимального напряжения деформирования (при отсутствии зуба текучести), либо значение предела текучести, получаемое экстраполяцией кривой упрочнения к нулевому значению деформации.

При использовании для описания реологической функции выражений, приводимых в работах [10, 12-14], суммарное отклонение экспериментальных точек от линии тренда в области степенной ползучести превосходит два порядка.

Более удачный результат регрессионного анализа получается с использованием предлагаемого эмпирического выражения для реологической функции:

$$\dot{p}(\sigma, T) = A \exp(-Q/RT) [\sinh(\gamma\sigma/RT)]^n, \quad (1)$$

где  $Q$  – энергия активации активного процесса деформации;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – абсолютная термодинамическая температура;  $\sigma$  – истинное напряжение;  $A, \gamma, n$  – постоянные.

Предложенное выражение является модификацией популярной эмпирической зависимости, ранее использованной в работах [13-14]. Выгодным отличием предлагаемого выражения является наличие аргумента  $\sigma/T$  вместо  $\sigma$ . Это позволяет описать реологическую функцию единым выражением во всем температурном диапазоне 20-1500 °С.

Мультипликативный характер выражения (1) позволяет привести весь объем экспериментальных данных к однопараметрической зависимости

$$Z = \dot{p} \exp(Q/RT) = A [\sinh(\alpha\sigma/T)]^n, \quad (2)$$

где  $Z$  – температурно-скомпенсированная скорость деформации (параметр Зинера-Холломоны);  $\alpha = \gamma/R$ .

Полученные значения энергий активации составили: для низкотемпературной области  $Q = 265$  кДж/моль; при переходе к высоким температурам энергия активации изменяется скачком в районе 1300 °С до величины  $Q^* = 146$  кДж/моль. Косвенное представление о ведущем механизме деформации и разрушения дает тот факт, что полученное значение энергии активации практически совпадает с известным значением энергии активации диффузии атомов углерода в молибдене, равным 140 кДж/моль [15-16].

Результаты экспериментов для марок А и Б совместно с данными об однократных испытаниях марок В, Г и Д представлены на рис. 8. По результатам испытаний построены три реологические функции, описывающие линию тренда для марок А и Б (толстая линия), а также верхнюю и нижнюю границы разброса данных для всех состояний поставки А-Д (тонкие линии). Коэффициенты зависимости (2) для каждой из реологических функций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимации реологической функции

Функция	Коэффициенты аппроксимации		
	A, 1/с	$\alpha$ , К/МПа	n
Тренд	25 000 000	4,70	9,0
Верхняя граница	65 000	11,8	9,0
Нижняя граница	62 000 000	3,29	9,0

Существенный разброс экспериментальных данных в области низких температур, вероятно, обусловлен различными степенями деформационного упрочнения на стадии изготовления материала поставки, которое снимается по мере приближения ко второй стадии ползучести.

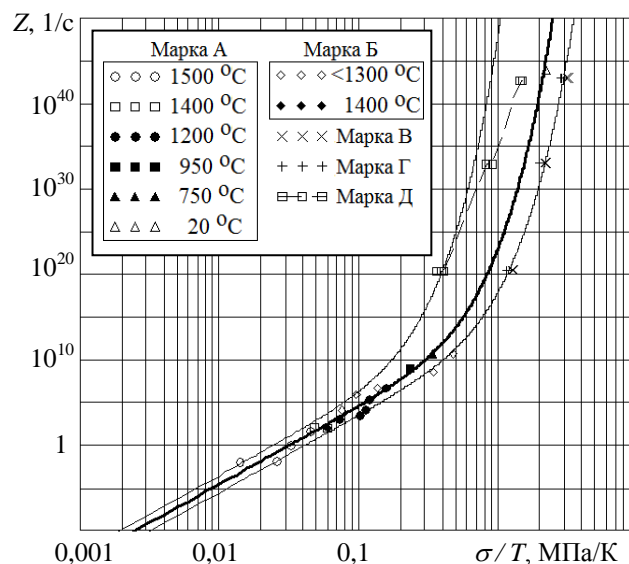


Рис. 8. Реологическая функция

#### МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

Для оценки длительной прочности воспользуемся методикой, аналогичной подходу Хоффа [9]. Для наиболее напряженного поперечного сечения в зоне локализации деформаций в силу пластической несжимаемости материала справедливо уравнение равновесия:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(p), \quad (3)$$

где  $\sigma$  – истинное напряжение;  $\sigma_0$  – условное напряжение;  $p$  – логарифмическая пластическая деформация.

Продифференцируем выражение (3) по времени  $t$ :

$$d\sigma/dt = \sigma_0 \dot{p} \exp(p) = \sigma \dot{p}. \quad (4)$$

Пренебрегая вкладом неустановившейся ползучести в оценку времени до разрушения, положим  $\dot{p}$  в соответствии с выражением (1). В этом случае в дифференциальном уравнении (4) могут быть разделены переменные:

$$A \exp(-Q/RT) dt = d\sigma/\sigma [\sinh(\gamma\sigma/RT)]^n. \quad (5)$$

Интеграл от правой части выражения (5) не представим в элементарных функциях, однако он может быть вычислен приближенно, если при интегрировании положить  $\sinh(\gamma\sigma/RT) \sim \gamma\sigma/RT$ , а затем сделать обратную подстановку. Принимая пределы интегрирования для начального момента времени ( $t = 0$  и  $\sigma = \sigma_0$ ) и момента разрушения ( $t = t_F$  и  $\sigma = \infty$ ), найдем параметрическую зависимость для определения времени до разрушения  $t_F$ :

$$t_F \exp(-Q/RT) = 1/An [\sinh(\gamma\sigma_0/RT)]^n. \quad (6)$$

Оценки с использованием зависимости (6) по данным о реологической функции приведены на рис. 9. Все экспериментальные точки, полученные из испытаний на ползучесть, укладываются в предсказанный диапазон.

Исследование деформационного поведения молибденового сплава показало, что кривые однократного деформирования включают продолжительный участок разупрочнения, что накладывает ограничение на эксплуатацию конструкций из сплава в виде исключительно кинематического нагружения.

При циклическом приложении нагрузки деформационное разупрочнение достигается при малых (0,05 %) амплитудах деформирования через 100-200 циклов.

Склонность материала к рассеянному разрушению ограничивает его использование при температурах свыше 1200 °С.

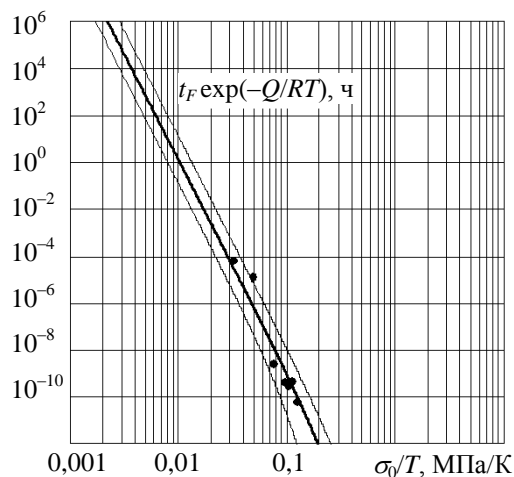


Рис. 9. Прогнозирование длительной прочности

#### ВЫВОДЫ

Предложенные в настоящей работе выражения для скоростей установившейся ползучести и длительной прочности удовлетворительно описывают данные для всех рассмотренных состояний поставки в широком диапазоне условий нагружения, что позволяет надеяться на возможность их использования для прогноза характеристик материала за пределами рассмотренного диапазона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зеликман А.Н. Молибден. – М.: Metallurgizdat, 1970. – 440 с.
2. Карпачев Д.Г. Тугоплавкие и редкие металлы и сплавы: справочник. / Д.Г. Карпачев, Е.Д. Доронькин, С.А. Цукерман, М.Б. Таубкин, А.И. Князева, Л.И. Клестова. – М.: Metallurgiya, 1977. – 240 с.
3. Meili Xiao. Characterization of strengthening mechanism and hot deformation behavior of powder metallurgy molybdenum / Meili Xiao, Fuguo Li, Hangfang Xie, Yufeng Wang // Materials & Design. – 2012. – vol. 34. – P. 112-119.
4. Ciulik J.R. Creep and Dynamic Abnormal Grain Growth of Commercial-Purity Molybdenum: D.Ph. Diss., The Univer-

sity of Texas at Austin. – 2005. – P. 33-78.

5. Conway J.B. Creep-Rupture Data for the Refractory Metals to High Temperatures / J. B. Conway, P. N. Flagella // Gordon and Breach Science Publishers. – 1971.

6. Green W.V. Short-Time Creep-Rupture Behavior of Molybdenum at High Temperatures / W.V. Green, M.C. Smith, D.M. Olson // Trans. AIME. – 1959. – vol. 2215. – P. 1061-1066.

7. Klopp W.D. Mechanical Properties of Electron-Beam-Melted Molybdenum and Dilute Mo-Re Alloys / W.D. Klopp, Walter R. Witzke // Met. Trans. – 1973. – vol. 4. – P. 2006-2008.

8. Gardey B. Correlation between the macroscopic behavior and the microstructural evolutions during large plastic deformation of a dual-phase steel / B. Gardey, S. Bouvier, B. Bacroix // Met. Trans. – 2005. – vol. 36. – P. 2937-2945.

9. Hoff N.J. The necking and the rupture of rods subjected to constant tensile loads // J. Appl. Mech. – 1953. – vol. 20, no.1. – P. 105-108.

10. Иванова В.С. Разрушение металлов. – М.: Metallurgiya, 1979. – С. 57-70.

11. Гохфельд Д.А. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: справочник. / Д.А. Гохфельд, Л.Б. Гецов, К.М. Кононов, Е.Т. Кульчин, Ю.Н. Ребяков, О.С. Садаков, С.А. Тимашев, В.Н. Чепурский. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 408 с.

12. Гохфельд Д.А. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях / Д.А. Гохфельд, О.С. Садаков. – М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.

13. Sellars C.M. La relation entre la résistance et la structure dans la déformation à chaud / C.M. Sellars, W.J.McG. Tegart // Mémoires scientifiques de la revue de métallurgie. – 1966. – vol. 63. – P. 731-746.

14. Tegart W.J.McG. The role of ductility in hot working // CoA Note Mat. – 1967. – no.14. – P. 48.

15. Самсонов Г.В. Диффузия бора, углерода и азота в переходные металлы 4, 5 и 6 групп периодической системы / Г.В. Самсонов, Т.В. Латышева // Доклады АН СССР. – 1956. – т. 109. – № 8. – С. 582-587.

16. <http://contrails.iit.edu/DigitalCollection/1960/WADDT/R60-793.pdf> (дата обращения 27.08.2015)

## Molybdenum Alloy Long-Term Strength Assessment

Samoilov S.P., Cherniavsky A.O.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian Federation

[Samoilov.s.p@mail.ru](mailto:Samoilov.s.p@mail.ru)

**Abstract.** Using Gleeble-3800 physical simulator, mechanical behavior of a molybdenum alloy for high-temperature application was investigated. The tests included monotonic loading up to fracture, stress- and strain-controlled cyclic loading and short-term creep (less than 9 hours) under temperatures ranging from 293 to 1773 °K. Tensile strength of the material under the monotonic loading reaches with a small amount of plastic strain (less than percent), despite of the significant residual plastic strain after fracture (more than 50%). Repeated loading decreases the tensile strength and yield stress, but increases the hardening factor. There is a rapid change in the fracture mechanism at high

temperatures from ductile to quasi-brittle distributed. The rheological properties of the material under relatively low temperatures vary throughout the as-received conditions. According to the observed effects, an approach based on thermo-activation equation for steady creep is proposed for long-term strength and creep deformations assessment. The concept of the prefracture stage description is based on well-known Hoff's model for creep fracture.

**Keywords:** molybdenum alloy, long-term strength, creep, work softening.

# Формирование фотокаталитических наночентров на поверхности сорбента-фотокатализатора

Михайлов Г.Г., Морозова А.Г., Лонзингер Т.М., Скотников В.А.  
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[v7690@mail.ru](mailto:v7690@mail.ru)

**Аннотация.** Эффект фотокаталитического окисления на нанокристаллических структурах является одним из перспективных методов очистки воды и воздуха от органических загрязнений. В качестве фотокатализатора широко применяются оксиды цинка и титана. Большинство работ по синтезу фотокатализаторов на основе оксидов титана относится к разработке технологических приемов получения нанокристаллических оксидов либо в свободном состоянии, либо на инертных носителях в виде пленок или диспергированных оксидов. Возможность получения и использования фотокатализатора на уровне катионных центров в составе наноструктурированного химически активного материала-носителя ранее не рассматривалась. В качестве активного материала-носителя в работе использовали гранулированного композиционного сорбента на основе силиката и алюмосиликата кальция. Отличительной особенностью композиционного сорбента является способность к необратимой сорбции катионов тяжелых металлов в результате образования твердых растворов замещения с широкой областью гомогенности. Разработаны методы получения фотокаталитических центров на поверхности композиционного сорбента. Изготовлены образцы сорбента-фотокатализатора методом сорбции катионов  $Ti^{3+}$  из раствора сорбата и методом обменных поверхностных реакций. Исследованы закономерности формирования наноструктурированных фотокаталитических поверхностных центров типа твердых растворов  $2CaO \cdot SiO_2 \cdot Ti_2O_3$  и  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot Ti_2O_3$  на поверхности композиционного сорбента. Показана эффективность сорбента-фотокатализатора в процессе фотокаталитической деградации метилового красного.

**Ключевые слова:** сорбент-фотокатализатор, композиционный сорбент, обменные поверхностные реакции, оксиды титана, наноструктурированные фотокаталитические поверхностные центры.

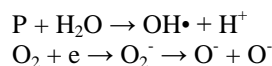
## ВВЕДЕНИЕ

Эффект фотокаталитического окисления на нанокристаллических структурах является одним из перспективных методов очистки воды и воздуха от органических загрязнений. В качестве фотокатализатора широко применяются оксиды цинка и титана.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Фотокаталитическая активность полупроводников в процессах деструкции органических загрязнителей возникает в результате того, что под действием ультрафиолетового излучения происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости и появление свободных носителей заряда (свободных электронов и дырок),

генерирующих сильные окислители – радикалы  $OH^\cdot$  и  $O^\cdot$  при взаимодействии с кислородом воздуха и водой по реакциям:



$OH^\cdot$  и  $O^\cdot$  способны окислить любые известные органические вещества.

К настоящему времени показано [1-11], что на поверхности оксида титана могут быть окислены (минерализованы) до  $CO_2$  и  $H_2O$  практически любые органические соединения.

Большинство работ по синтезу фотокатализаторов на основе оксидов титана относится к разработке технологических приемов получения нанокристаллических оксидов либо в свободном состоянии, либо на инертных носителях в виде пленок или диспергированных оксидов. В нанесенных системах фотокатализатор химически “прививается” на инертную подложку ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ).

Известны технологии нанесения фотокатализаторов на поверхность неорганических сорбентов (активированный уголь, цеолит, ткань и др.) [12-20]. Преимуществом материалов, обладающих сорбционными и фотокаталитическими свойствами является возможность удерживания загрязнителя на поверхности и постепенное разложение их фотокатализаторами. Необходимым условием получения фотокатализаторов является наноразмерное кристаллическое состояние наносимых оксидов. Возможность получения и использования фотокатализатора на уровне катионных центров в составе наноструктурированного химически активного материала-носителя ранее не рассматривалась.

В качестве активного материала-носителя представляется целесообразным использование гранулированного композиционного сорбента на основе силиката и алюмосиликата кальция [21]. Сорбенты, описанные в опубликованных ранее работах, удерживают сорбат на своей поверхности за счет физической адсорбции, поэтому обладают ограниченной обменной емкостью. Отличительной особенностью композиционного сорбента является способность к необратимой сорбции катионов тяжелых металлов в результате образования твердых растворов замещения с широкой областью гомогенности. При этом формируются наноструктурированные поверхностные новообразования, содержащие катионы сорбата, эпитаксиально связанные с матрицей сорбента [22].



ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы: исследование закономерностей формирования наноструктурированных фотокаталитических поверхностных центров в виде твердых растворов  $Ti_2O_3$  в силикатных фазах, слагающих композиционный сорбент-носитель и их фотокаталитической активности в процессе деградации органических загрязнителей.

Задачи работы:

- получение фотокаталитических центров на поверхности композиционного сорбента;
- исследование фотокаталитической активности сорбента-фотокатализатора в процессе деградации органических загрязнителей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются образцы композиционного сорбента, синтезированного сорбента-фотокатализатора и индикатор метиловый красный, используемый в качестве контрольного раствора при изучении разложения органических загрязнителей, структурная формула которого приведена на рис. 1.

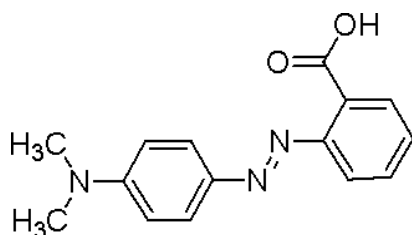


Рис. 1. Структурная формула индикатора метилового красного

Методы исследования:

- электронно-микроскопический и микрорентгеноспектральный анализ на растровом электронном микроскопе JEOL JSM 6460LV;
- дифференциально-термический анализ на дериватографе MOM Q-1500D системы F.Paulik, J.Paulik, L.Erdei;
- фотоколориметрический анализ на спектрофотометре ПЭП-5300В.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Композиционный сорбента для нанесения фотокатализатора был получен методом низкотемпературного спекания в виде гранул с размерами частиц от 1 до 10 мм. Характеристики фазового состава и физико-химических свойств композиционного сорбента представлены в табл. 1-2.

Особенностью композиционного сорбента является энергетическая неравновесность поверхностных центров, обуславливающая его способность к сорбции катионов тяжелых металлов и образование прочных структурных образований с сорбатом. Ранее проведенные исследования показали, что количество сорбируемых катионов зависит от формирования исходной структуры сорбента и от характеристик раствора сорбата.

Для формирования фотокаталитических центров на поверхности композиционного сорбента были выбраны два способа взаимодействия сорбента с сорбатом:

- сорбция катионов титана из раствора его хлорида;
- сорбция катионов титана из тонких пленок на поверхности сорбента (минимизация роли воды как среды переноса).

Таблица 1

Дифракционные характеристики основных фазовых составляющих гранулированного сорбента

№ п/п	Характеристика объекта	Основные фазовые составляющие	Межплоскостные расстояния d, Å
1	Исходные гранулы	$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ $\gamma 2CaO \cdot SiO_2$ $3CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$	2,85; 3,06; 2,72 2,74; 3,01; 2,66 2,84; 2,74

Таблица 2

Физико-химические характеристики гранулированного сорбента

форма	средний диаметр, мм	открытая пористость, %	кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	водопоглощение, %	σ сж, МПа	pH
сфера	10-11	53-55	1,38-1,39	39-40	8-10	8,5-9

При реализации первого способа в качестве реакционной среды применяли раствор хлорида титана с концентрацией 500 мг/л при соотношении сорбент: сорбат = 1:10. Время экспозиции 24 часа. Далее гранулы сорбента отделяли от водного раствора, сушили при 100 °С и проводили термическую обработку при температуре 800 °С.

Внешний вид поверхности сорбента, фотокаталитических центров и химический состав поверхности представлен на рис. 2-4 и в табл. 3.

Анализ полученных экспериментальных данных показал уменьшение содержания кальция в составе титаносодержащих центров. Очевидно, что в процессе сорбции произошла частичная замена катионов кальция на катионы титана в структурах  $\gamma 2CaO \cdot SiO_2$  и  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ .

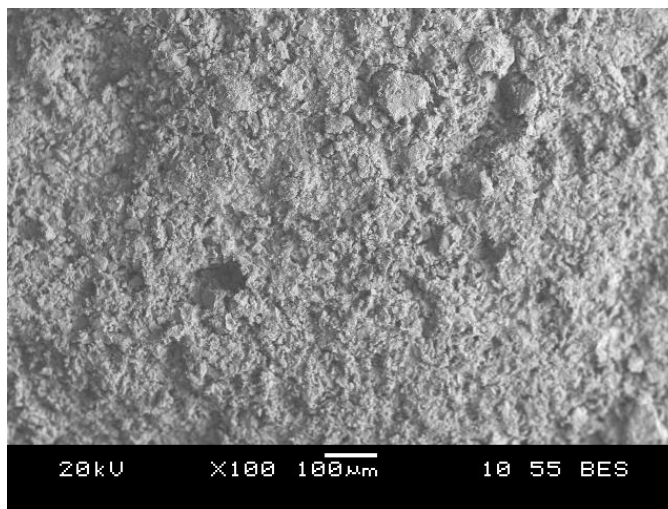


Рис. 2. Поверхность сорбента с фотокаталитическими центрами



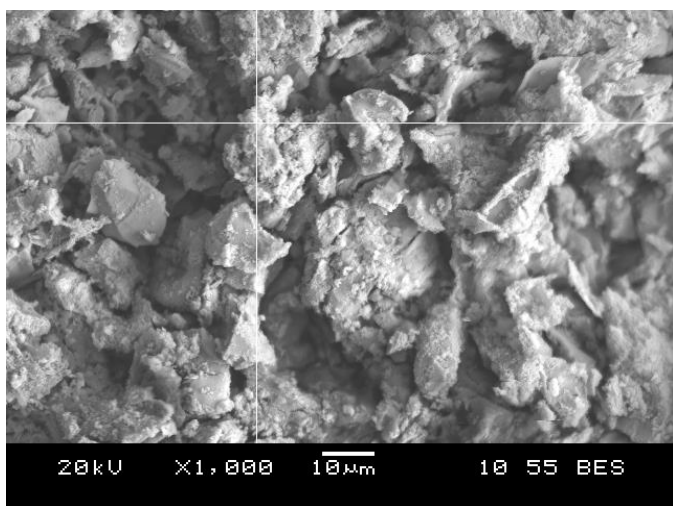


Рис. 3. Локальные фотокаталитические центры

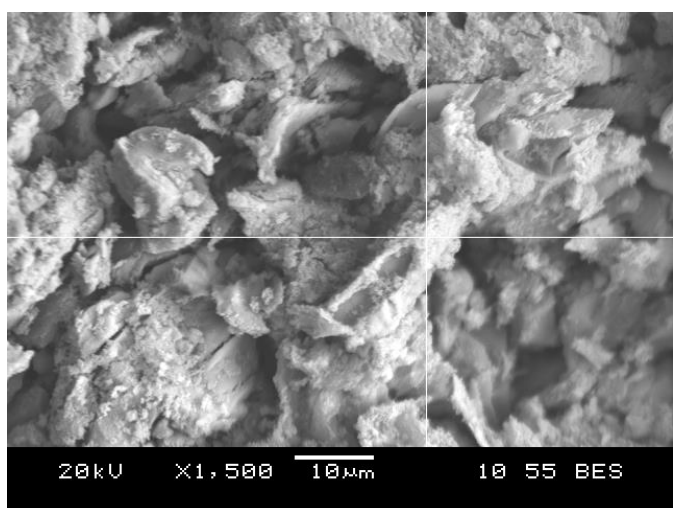


Рис. 4. Локальные фотокаталитические центры

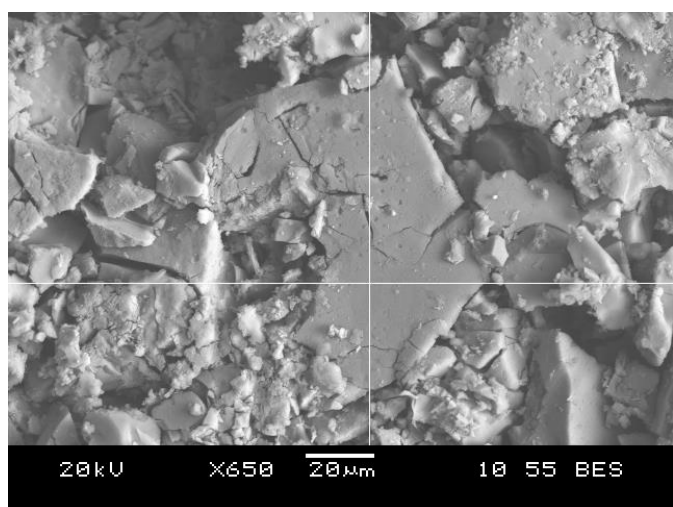


Рис. 5. Структура и состав мелкодисперсных осадков

Данные картирования поверхности образцов с нанесенным фотокатализатором свидетельствуют об образовании твердых растворов замещения  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\text{-Ti}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\text{-Ti}_2\text{O}_3$ . Повышенное содержание углеро-

да в составе локальных центров свидетельствует о развитии реакции карбонизации. Содержание катионов  $\text{Ti}^{3+}$  в локальных центрах колеблется от 1,22 до 7,97 мас. %.

Из литературных источников известно, что присутствие кремния в фотокаталитических системах, содержащих оксиды титана, изменяет величину разрешенной зоны, поэтому можно предполагать усиление эффекта разложения органических соединений на поверхности сорбента-фотокатализатора.

Таблица 3

Результаты микрорентгеноспектрального анализа

Элемент	Химический состав, мас. %			
	Рис. 2.	Рис. 3.	Рис. 4.	Рис.5.
C	13,53	23,30	20,97	-
O	37,88	45,72	36,94	26,88
Mg	2,28	0,59	0,53	1,46
Al	3,59	1,44	7,88	0,59
Si	13,21	19,07	8,97	6,72
S	0,44	-	-	-
Cl	0,78	-	-	16,22
Ca	25,19	6,77	16,74	11,58
Ti	1,81	2,38	7,97	36,56
Fe	1,20	0,74	-	-
Итого	100	100	100	100

В процессе сорбции титана из раствора хлорида наблюдается образование осадка. Структура и состав мелкодисперсных осадков показаны на рис. 5. и в табл. 3. Осадок содержит значительное количество хлорида титана совместно с силикатом и хлоридом кальция, следовательно, при реализации первого способа преимущественное развитие имеют реакции не на поверхности сорбента, а в объеме сорбата.

Таким образом, реализация данного способа получения фотокаталитических центров связана с повышенным неэффективным расходом реагентов. Его достоинство – экологическая безопасность, простота технологического решения и низкая энергоемкость процесса.

Сущность второго способа состоит во взаимодействии тонкой пленки концентрированного раствора хлорида титана (5 мас.%) с поверхностью композиционного сорбента. После сорбционного взаимодействия в течение 0,5 часа при комнатной температуре образцы сушили при 100 °С и обжигали при температуре 800 °С. После обжига поверхность образцов промывали дистиллированной водой для удаления растворимых хлоридов кальция и оксихлоридов титана, не вступивших в реакцию. Далее следовал повторный обжиг при температуре 800 °С.

Данные электронно-микроскопического анализа полученных образцов представлены на рис. 6-8 и в табл. 4.

Фотокаталитические центры на поверхности композиционного сорбента присутствуют в виде наноструктурированных пленочных новообразований, представляющих собой твердые растворы  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\text{-Ti}_2\text{O}_3$  и  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\text{-Ti}_2\text{O}_3$ .

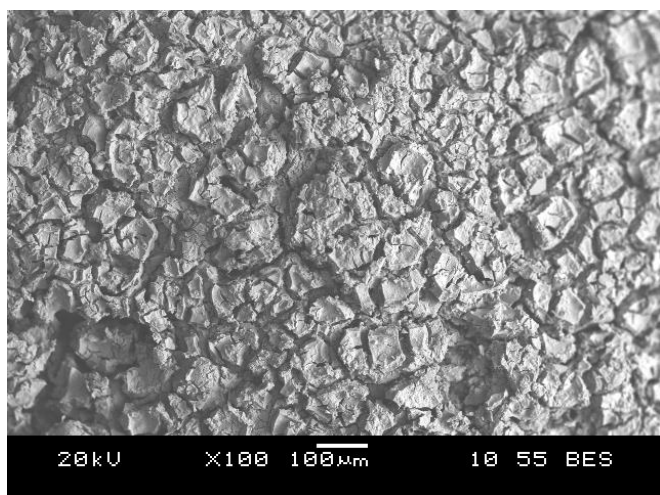


Рис. 6. Пленочные фотокаталитические новообразования

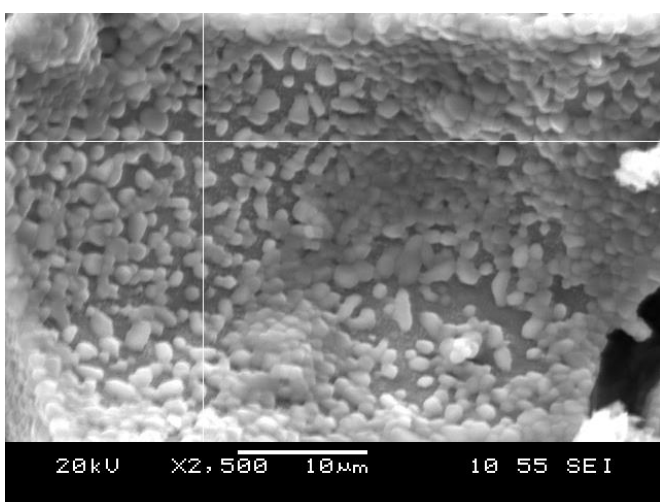


Рис. 7. Структурные фрагменты фотокаталитических новообразований – участки пленочного покрытия

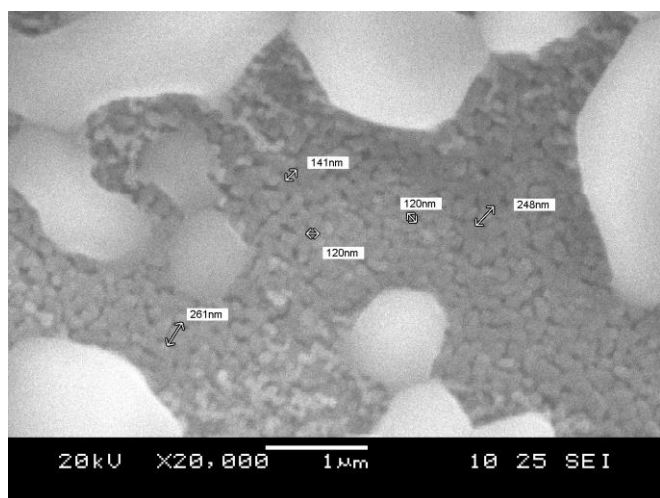


Рис. 8. Ячеистая наноструктура пленочных фотокаталитических новообразований

Пленочные новообразования имеют ячеистую пористую наноструктуру с размером фрагментов от 100 до 300 нм. Количество катионов титана  $Ti^{3+}$  на поверхности сор-

бента-фотокатализатора составляет в среднем 9,6 мас.%, а в активных центрах до – 33,39 мас.%

Таблица 4

Результаты микрорентгеноспектрального анализа

Элемент	Химический состав, мас. %	
	Рис. 6.	Рис. 7.
O	50,38	36,58
Mg	3,09	1,27
Al	2,93	-
Si	9,87	6,62
Ca	24,13	22,14
Ti	9,60	33,39
Итого	100	100

Как показали проведенные исследования, природа процессов, протекающих при получении сорбента-фотокатализатора разработанными способами, аналогична, различия выражаются количественными характеристиками. В первом случае воды выступает как химический реагент и как среда переноса. Движущей силой процесса является градиент pH на границе раздела твердое – жидкое и градиент химического потенциала между сорбентом и сорбатом. Реализация второго способа происходит в результате обменных взаимодействий при реакциях твердое – жидкое, твердое – газообразное, твердое – твердое.

Полученные экспериментальные данные позволили построить теоретическую модель формирования фотокаталитических центров на поверхности сорбента, обладающего необратимой сорбцией. Можно выделить следующие основные стадии:

- гидролиз хлорида титана по схеме  
 $Ti^{3+} + H_2O \rightarrow (TiOH)^{2+} + H^+$ ;
- протонирование поверхности силикатов  
 $2CaO \cdot SiO_2, 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ;
- обменные процессы на поверхности  
 $2H^+ \leftrightarrow (TiOH)^{2+}; Cl^- \leftrightarrow OH^-; Ca^{2+} \leftrightarrow (TiOH)^{2+}$ ;
- поверхностное фазообразование  $Ca^{2+} + 2Cl^- \rightarrow CaCl_2 \downarrow$ ;  
 $(TiOH)^{2+} + \gamma 2CaO \cdot SiO_2 \rightarrow (\gamma 2CaO \cdot SiO_2) - Ti_2O_3$   
 (твердый раствор);  
 $(TiOH)^{2+} + 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 - Ti_2O_3$   
 (твердый раствор);
- термическая дегидратация и пирогидролиз оксихлоридов, не вступивших в сорбционное взаимодействие.

Электронно-микроскопическим анализом установлено, что сорбционные и фотокаталитические центры на поверхности сорбента-фотокатализатора территориально разделены, следовательно, процессы сорбции и фотокаталитического разложения органических загрязнений происходят одновременно.

Рис. 9. и табл. 5. иллюстрируют наличие территориального разделения сорбционных и фотокаталитических центров. Фотокаталитические центры представлены твердыми растворами  $\gamma 2CaO \cdot SiO_2 - Ti_2O_3$ . Сорбционные центры, на которых не произошло взаимодействие с катионами  $Ti^{3+}$ , характеризуются наличием эпитаксиально связанных с подложкой неравноценных в энергетическом отношении карбонатов.



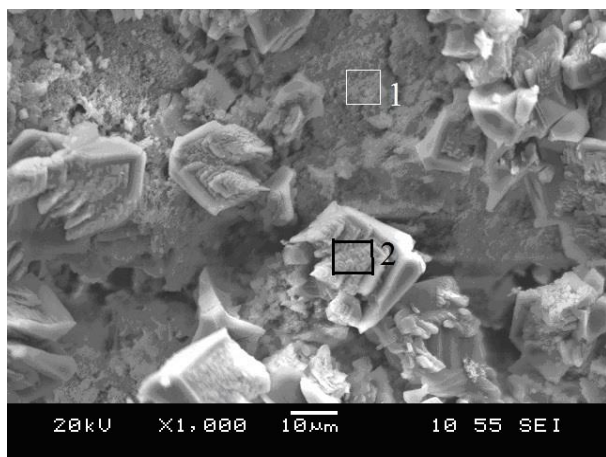


Рис. 9. Фотокаталитические центры на поверхности сорбента-фотокатализатора

Таблица 5

Результаты микрорентгеноспектрального анализа

Элемент	Химический состав, мас. %	
	1	2
C	-	16,14
O	50,78	62,26
Al	0,69	-
Si	17,80	1,08
Cl	2,20	-
Ca	18,76	20,51
Ti	9,78	-
Итого	100	100

Для оценки фотокаталитической активности синтезированного сорбента-фотокатализатора использовали стандартный метод разложения красителей. Эксперименты проводили с использованием красителя с высокой стабильностью метиловый красный, который не разлагается под воздействием ультрафиолетового излучения. Образцы сорбента-фотокатализатора, изготовленные по первому (образец 1) и второму (образец 2) методу помещали в 0,1 % водный раствор метилового красного при соотношении твердое:жидкое = 1:50. Систему облучали в течение 3 часов ультрафиолетовым излучением с длиной волны 390 нм. Фотоколориметрическим методом определяли оптическую плотность раствора красителя до и после облучения. Полученные результаты представлены на рис. 10.

При контакте с сорбентом-фотокатализатором интенсивность окраски раствора красителя снижается в 2 раза для образца, изготовленного по первому варианту, и в 5 раз при использовании образца сорбента-фотокатализатора, изготовленного вторым методом. Таким образом, доказана фотокаталитическая активность катионов титана в составе наноструктурированных силикатных твердых растворов на поверхности сорбента-фотокатализатора.

Взаимодействие продуктов распада органического модификатора с сорбентом-фотокатализатором подтверждено данными термогравиметрического анализа.

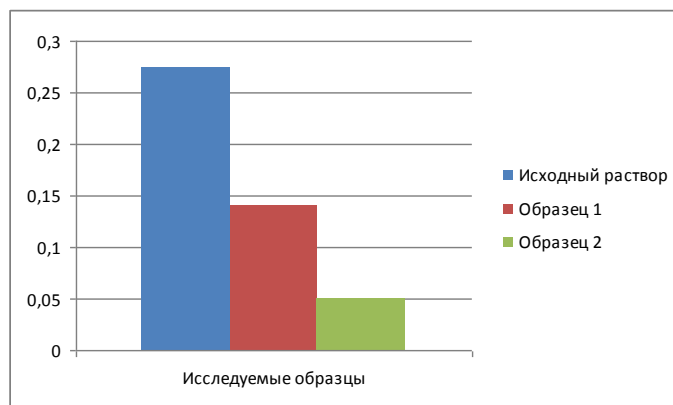


Рис. 10. Изменение оптической плотности раствора красителя после контакта с сорбентами-фотокатализаторами

На рис. 11, 12 представлены дериватогаммы сорбента-фотокатализатора после выдержки в дистиллированной воде и растворе индикатора в течение 3 недель. Раствор индикатора взят после ультрафиолетового облучения.

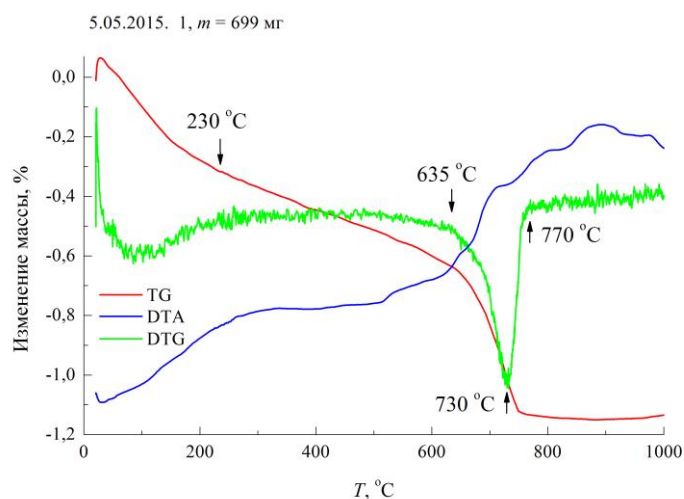


Рис. 11. Дериватогамма сорбента-фотокатализатора после облучения и выдержки в воде

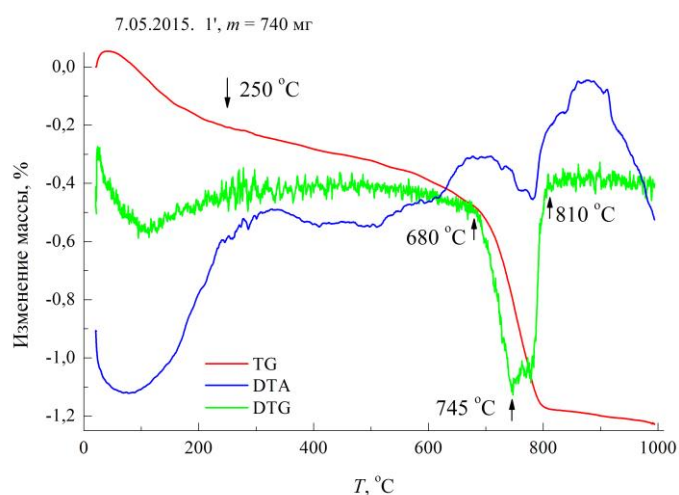


Рис. 12. Дериватогамма сорбента-фотокатализатора после облучения и выдержки в растворе индикатора

Характер теплового эффекта декарбонизации свидетельствует о наличии энергетически неравноценных карбонатных структур. Потери массы в температурном интервале декарбонизации 680-800 °С для образца, выдержанного в воде, составили 0,45 мас.%, а для образца, выдержанного в растворе индикатора – 0,75 мас.%. Образование карбонатов свидетельствует о деградации красителя и концентрировании продуктов распада на сорбционных центрах. Образование карбонатных структур является завершающей стадией сорбционного процесса.

#### ВЫВОДЫ

1. Разработаны методы получения фотокаталитических центров на поверхности композиционного сорбента.
2. Изготовлены образцы сорбента-фотокатализатора методом сорбции катионов  $Ti^{3+}$  из раствора сорбата и методом обменных поверхностных реакций.
3. Исследованы закономерности формирования наноструктурированных фотокаталитических поверхностных центров типа твердых растворов  $\gamma$   $2CaO \cdot SiO_2 - Ti_2O_3$  и  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 - Ti_2O_3$  на поверхности композиционного сорбента.
4. Показана эффективность сорбента-фотокатализатора в процессе фотокаталитической деградации метилового красного.
5. Установлено, что сорбционная и фотокаталитическая активность сорбента-фотокатализатора проявляется совместно, не подавляя друг друга.
6. Построена теоретическая модель формирования фотокаталитических центров на поверхности сорбента с необратимой сорбцией.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федотова М.П. Нанодисперсные фотокатализаторы на основе диоксида титана / М.П. Федотова, Г.А. Воронова, Е.Ю. Емельянова, Н.И. Радишевская, О.В. Водянкина // Журнал физической химии, – 2009. – Т. 83. – № 8. – С. 1539–1544.
2. Воронова Г.А. Фотокаталитические свойства электровзрывного нанопорошка  $TiO_2$  / Г.А. Воронова, М.П. Федотова, Е.Ю. Емельянова, О.В. Водянкина // Журнал прикладной химии, – 2009. – Т. 82. – № 8. – С. 1256–1260.
3. Voronova G.A. Synthesis and properties of new  $TiO_2$ -containing systems for photodegradation of organic substances / G.A. Voronova, M.P. Fedotova, E.Yu. Emelyanova, O.V.Vodyankina // Book of Abstract of Sixth International Conference on Inorganic Materials. – Dresden: Elsevier, – 2008. – P. 3 – 75.
4. Воронкова Г.А. Фотоиндуцированные процессы на поверхности электродов, модифицированных диоксидом титана / Г.А. Воронова, М.П. Федотова, Е.Ю. Емельянова, О.В. Водянкина // Материалы IV Всероссийской конференции Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах. – Воронеж, – 2008. – Т.1. – С. 79 – 82.
5. Федотова М.П. Разработка способа приготовления нанодисперсных  $TiO_2$ -содержащих фотокаталитических систем / М.П. Федотова, Г.А. Воронова, Е.Ю. Емельянова, Н.И. Радишевская, О.В. Водянкина // Труды Региональной научно-технической конференции Перспективные материалы и технологии. – Томск, – 2008. – С. 416 – 422.

6. Федотова М.П. Состав, структура и свойства  $TiO_2/SiO_2$  фотокатализаторов / М.П. Федотова, Е.Ю. Емельянова, Г.А. Воронова, О.В. Водянкина // Сборник материалов V Всероссийской конференции молодых ученых Физика и химия высокоэнергетических систем. – Томск: ТГУ, – 2009. – С. 575 – 577.

7. Самойлов А.В. Влияние добавок на структуру и физико-химические свойства фотокаталитических систем на основе диоксида титана / А.В. Самойлов, Е.Ю. Емельянова, Г.А. Воронова, О.В. Водянкина // Труды VI Международной конференции молодых ученых. Перспективы развития фундаментальных наук. – Томск: ТПУ, – 2009. – С. 469 – 472.

8. Fedotova M.P. Au-containing  $TiO_2-SiO_2$  photocatalysts for water purification / Fedotova M.P., G Voronova.A., Emel'yanova E. Yu., Vodyankina O.V. // VIII International conference "Mechanisms of catalytic reactions". – Novosibirsk: Institute of Catalysis SB RAS, – 2009. – P. 153.

9. Воронова Г.А. Au-содержащие  $TiO_2-SiO_2$  фотокатализаторы / Г.А. Воронова, М.П. Федотова, Е.Ю. Емельянова, О.В. Водянкина // Тезисы докладов III Всероссийской конференции по наноматериалам НАНО-2009. – Екатеринбург: Уральское издательство, – 2009. – С. 637 – 639.

10. Воронова Г.А. Au-содержащие  $TiO_2/SiO_2$  фотокатализаторы / Г.А. Воронова, М.П. Федотова, О.В. Водянкина // Тезисы докладов IV Всероссийской конференции с международным участием Химия поверхности и нанотехнология. – Санкт-Петербург, – 2009. – С. 30 – 31.

11. Самойлов А.В. Фотоллюминесцентные свойства наноматериалов на основе диоксида титана / А.В. Самойлов, М.П. Федотова, В.А. Светличный, О.В. Водянкина // Сборник материалов II Международной конференции с элементами научной школы Физика и химия наноматериалов. – Томск: ТГУ, – 2009. – С. 422 – 424.

12. Артемьев Ю.М. Введение в гетерогенный фотокатализ. / Ю.М. Артемьев, В.К. Рябчук – СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, – 1999. 304 с.

13. Шелимов Б.Н. Фотохимические процессы на поверхности нанесенных оксидных систем / Б.Н. Шелимов, В.Б. Казанский – Новосибирск: Наука, – 1991. – С. 109 – 137.

14. Евстратов А.А. Распределение свободных носителей заряда по поверхности fotocувствительных материалов: зачем управлять и как управлять / А.А. Евстратов, К. Киш, А.А. Малыгин, Ж.-М. Тольмез, П. Гудон, Т. Вэнсон // Росс. хим. журн., – 2007. – Т.51. – № 6. – С. 52 – 60.

15. Емельянова Е.Ю. Фотокатализаторы процессов гетерогенного жидкофазного окисления органических веществ / Е.Ю. Емельянова, М.П. Федотова, Г.А. Воронова, Л.П. Шиляева, О.В. Водянкина // Материалы IV Всероссийской конференции. Физика и химия высокоэнергетических систем. – Томск: ТГУ, – 2008 – С. 393 – 395.

16. Федотова М.П. Новый подход к синтезу катализаторов процессов фоторазложения органических веществ / М.П. Федотова, Е.Ю. Емельянова, Г.А. Воронова, О.В. Водянкина // Труды V Международной конференции молодых ученых Перспективы развития



фундаментальных наук. – Томск: ТПУ, – 2008. – С. 215 – 216.

17. Петухов Д.И. Синтез и исследование свойств пленок пористого  $TiO_2$ , полученных анодным окислением / Д.И. Петухов, И.В. Колесник, А.А. Елисеев, А.В. Лукашин, Ю.Д. Третьяков // Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – Т.45. – №1. С. 65 – 69.

18. Петухов Д.И. Термическая стабильность пористых пленок анодного оксида титана / Д.И. Петухов, И.В. Колесник, Д.А. Булдаков, А.А. Елисеев, А.В. Лукашин // Российские нанотехнологии. – 2009. Т. 5 – 6. – С. 57 – 63.

19. Колесник И.В. Мезопористый оксид титана и нанокomпозиты на его основе для каталитических применений / И.В. Колесник, Г.С. Чеботарева, А.В. Овчинников, А.А. Черник, А.А. Елисеев, А.В. Лукашин, Ю.Д. Третьяков // Сборник тезисов НАНО-2009. – Екатеринбург, 20 – 24 апреля 2009. – С. 334.

20. Михайлов Г.Г. Химические и технологические приемы получения фотокаталитического покрытия / Г.Г. Михайлов, А.Г. Морозова, Т.М. Лонзингер, В.А. Скотников // Вестник ЮУрГУ, Серия «Химия». – 2012. – № 24 (283). – Вып. 9. – С. 62 – 68.

21. Морозова А.Г., Лонзингер Т.М., Михайлов Г.Г. Композиционный сорбент на основе силикатов кальция // Патент России №2481153. 2011 год. Бюл. №13.

22. Михайлов Г.Г. Особенности необратимой сорбции катионов тяжелых металлов гранулированным сорбентом на основе силикатов и алюмосиликатов кальция / Г.Г. Михайлов, А.Г. Морозова, Т.М. Лонзингер, А.В. Лонзингер, И.Ю. Пашкеев // Вестник ЮУрГУ, Серия «Химия». – 2011. – № 12 (229). – Вып. 5. – С. 46 – 53.

## Formation of Photocatalytic Nano-centers on the Surface of the Photocatalytic Sorbing Agent

Mikhailov G.G., Morozova A.G., Lonzinger T.M., Skotnikov V.A.  
South Ural State University (National Research University)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[v7690@mail.ru](mailto:v7690@mail.ru)

**Abstract.** Using the effect of photocatalytic oxidation in nanocrystalline structures is one of the most promising methods of purifying air and water contaminated with organic pollutants. Zinc oxides and titanium oxides are widely used as photocatalysts. The majority of works on the synthesis of photocatalysts on the basis of titanium oxides are covering the elaboration of technological processes of production nanocrystalline oxides either in free condition or as a film on inert carriers or as dispersed oxides. The possibility of obtaining and using photocatalysts on cation centre level in nanostructured chemically active carrier material has not been studied before. It is practical to use calcium silicate and calcium aluminosilicate based granulated composite sorbing agent as an active carrier material. A distinctive feature of composite sorbing agent is its ability of irreversible sorption of

heavy metals cations due to formation of substitutional solid solution with a wide homogeneity region. Methods of obtaining photocatalytic centres on the surface of composite sorbing agent have been formulated. Samples of photocatalytic sorbing agent have been obtained by sorption of  $Ti^{3+}$  cations from sorbate solution and through surface exchange reactions. The regularities of formation of nanostructured photocatalytic surface centres of  $\gamma$   $2CaO \cdot SiO_2 \cdot Ti_2O_3$  type and  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot Ti_2O_3$  type on the surface of composite sorbing agent have been studied. Photocatalytic sorbing agent has been proven effective in photocatalytic decomposition of methyl red.

**Keywords:** photocatalytic sorbing agent, composite sorbing agent, surface exchange reactions, titanium oxides, nanostructured photocatalytic surface centres.

# Поверхностная закалка деталей электрической дугой

Королькова Л.И.

Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[korolkovali@rambler.ru](mailto:korolkovali@rambler.ru)

Машрабов Н.М.

Южно-Уральский государственный аграрный университет, Институт агроинженерии  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[nmashrabov@yandex.ru](mailto:nmashrabov@yandex.ru)

**Аннотация.** Представлены результаты исследований по обоснованию и разработке способов и средств поверхностного упрочнения цилиндрических деталей из закаливаемых сплавов за счет тепла электрической дуги, горящей между инертным электродом и деталью. Обоснованы форма заточки электрода и месторасположение электрода относительно детали. Приведена последовательность операций поверхностной закалки. Определена критическая скорость охлаждения и доказано ее значение численными экспериментами. Для проведения численных экспериментов, разработана программа расчета температурных полей в детали; при этом впервые разработана дифференциально-разностная схема, полученная на основе комбинации явной и неявной схем. Проведены исследования по определению механических свойств, остаточных напряжений, усталостной прочности, твердости и микроструктуры упрочненного слоя. Проведены исследования по определению механических свойств, износостойкости, усталостной прочности, твердости и микроструктуры упрочненного слоя. Рекомендуется технология поверхностной закалки при восстановлении и изготовлении цилиндрических деталей машин.

**Ключевые слова:** упрочнение, деталь, режимы процесса, электрическая дуга, вольфрамовый электрод, свойства.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях интенсификации современного производства рост напряженности работы машин и механизмов, связанный с увеличением их мощности, скорости и др. показателей, приводит к повышенным требованиям к работоспособности их агрегатов, узлов и деталей.

Наибольшее число отказов (до 80 %) обусловлено процессами изнашивания или сочетаниями процессов, где изнашивание играет основную роль. Наличие такого количества отказов во многом объясняется низкой износостойкостью, прочностью поверхностного слоя сопряженных деталей машин.

Детали многих машин работают в сложных условиях, испытывая значительные знакопеременные и ударные нагрузки. Поэтому детали машин должны иметь достаточно высокую износостойкость поверхностных слоев и вязкую эластичную сердцевину, что достигается путем поверхностной закалки.

Разработанные способы упрочнения деталей машин позволяют повысить износостойкость деталей машин до 2-2,5 раз, прочностные свойства в 3-4 раза [1-3] и могут применяться в зависимости от конкретных условий работы деталей и технических требований на их изготовление и восстановление.

Разработка способов и средств поверхностной закалки для предприятий с ограниченными программами изготов-

ления, восстановления и широкой номенклатурой деталей является актуальной задачей. При этом необходимо учесть, что детали типа тела вращения в общей номенклатуре составляют около 64 %; до 60 % цилиндрических деталей изготавливаются из сталей марок 45, 45Х; длина их достигает 2000 мм, а основная доля (до 50 %) в пределах 350-400 мм; диаметры находятся в интервале 30-70 мм. Длина шеек, подвергающихся термообработке – 20-60 мм, твердость поверхности – от 30 до 60 HRC [2, 4].

## ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

Учитывая изложенное, разработаны способ и средства упрочнения деталей машин за счет тепла электрической дуги, горящей между инертным электродом и деталью; при этом дуга перемещается относительно нагреваемой поверхности детали [5].

Согласно разработанного способа [5], электроду из вольфрама предварительно придают форму конуса с острым углом, равным  $40^\circ$ , и закруглением на вершине этого угла 0,5 диаметра электрода рис. 1, а). Вольфрамовый электрод (диаметром 4 мм, ЭВЛ ГОСТ 23969-80) устанавливают под углом  $\alpha = 160-160^\circ$ , на расстоянии  $a = 0,5-1,5$  мм относительно детали (рис. 1, а).

Используется стандартная аргоновая горелка 8 с измененной конструкцией керамической (защитной) втулки 9 (рис. 2, а).

Последовательность операций следующая: приводят деталь 11 во вращательное движение с частотой  $\omega = 7,5 \text{ с}^{-1}$  (при диаметре детали 40 мм), подают аргон, затем сварочное напряжение на деталь 11 и электрод [6-8]. Источник питания – ВДУ-1201; характеристика источника питания – падающая; напряжение холостого хода 60 В. Процесс упрочнения управляется оператором с помощью пульта 15 (рис. 1, б). Зажигают дугу между деталью 11 и электродом путем подачи осциллирующего напряжения с помощью устройства для возбуждения электрической дуги постоянного тока при сварке и наплавке в защитных газах [9] или путем кратковременного короткого замыкания угольным электродом зазора между вольфрамовым электродом и деталью 11 через отверстие 7 в защитном кожухе 10, после чего отверстие 7 закрывают. Рабочее напряжение 12 В, величина тока 500 А. Включают подачу суппорта станка, равную 0,46 мм/об, при этом ширина активного пятна дуги составляет 1,4-1,7 мм (экспериментальные данные) [3]. Электрод перемещается вдоль оси детали и прогревает поверхность вала на ширину шейки. По окончании процесса выключают сварочное напряжение (охлаждение) и останавливают привод токарного станка. Снимают деталь [5].

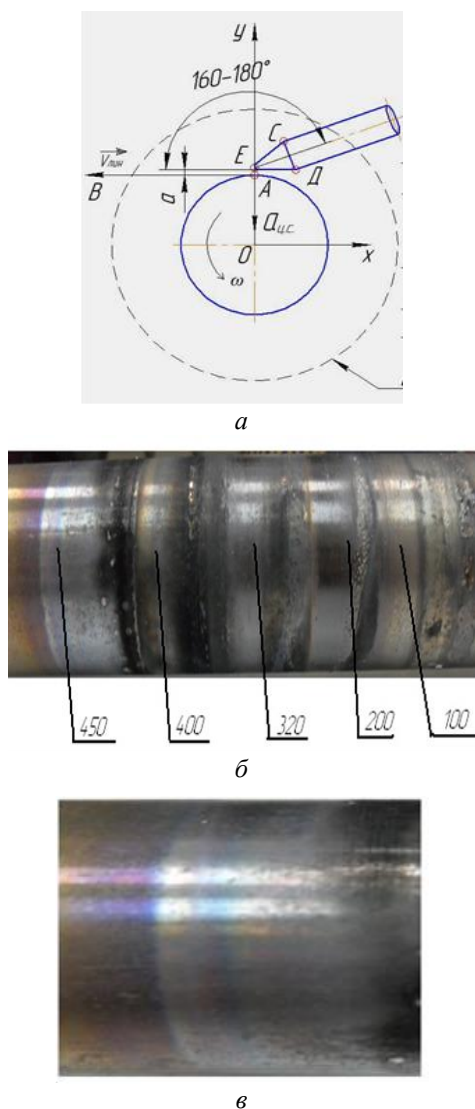


Рис. 1. Способ поверхностной закалки:  
 а – схема процесса закалки; б – изменение качества поверхности от скорости процесса; в – поверхность детали закаленная на рациональных режимах

При закалке происходят структурные изменения, приводящие к упрочнению верхнего слоя металла вала за счет отвода тепла в глубинные холодные слои металла, а также за счет отвода тепла в окружающий деталь воздух (газ) вследствие сильного турбулентного движения газа в граничном слое. В результате повышается стабильность процесса и качество упрочнения.

#### ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты эксперимента с применением защитного кожуха на разных скоростях (указанные значения в об/мин) приведены на рис. 1, б. На рис. 1, в представлена вид шероховатости, полученная на рациональных режимах процесса.

Для установления технологических параметров для конкретной детали необходимо:

- зная марку материала, используя данные диаграммы изотермического превращения аустенита для соответствующих сталей, определяют критическую скорость по (1) охлаждения (закалки), необходимую для переохлаждения аустенита до мартенситного превращения по выражению [10]

$$V_k = \frac{(A_1 - t_{min})}{\tau_{min}} \quad (1)$$

где  $A_1$  – температура критической точки,  $A_1 = T_{Ac3} + 30 \dots 50^\circ\text{C}$ ;  $t_{min}$ ,  $\tau_{min}$  – соответственно температура и время минимальной устойчивости аустенита, для стали 45 –  $t_{min} = 510^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{min} = 1\text{ с}$  [10]. Таким образом, скорость охлаждения равны  $V_k = 305^\circ\text{C/сек}$ . для стали 45. При скоростях охлаждения выше критических расчетных аустенит испытывает мартенситное превращение  $\{Fe_\gamma(C) \rightarrow F_\alpha(C)\}$ , тогда твердость достигает для стали 45-50 HRC;

- имея размер диаметра детали, длину детали (участка закалки), теплоемкость материала, теплопроводность материала детали, количество теплоисточников, мощность теплоисточника и др., по методике [11] определяют параметры активного пятна дуги;

- используя разработанную термодинамическую модель расчета, определяют температурное поле процесса поверхностной закалки.

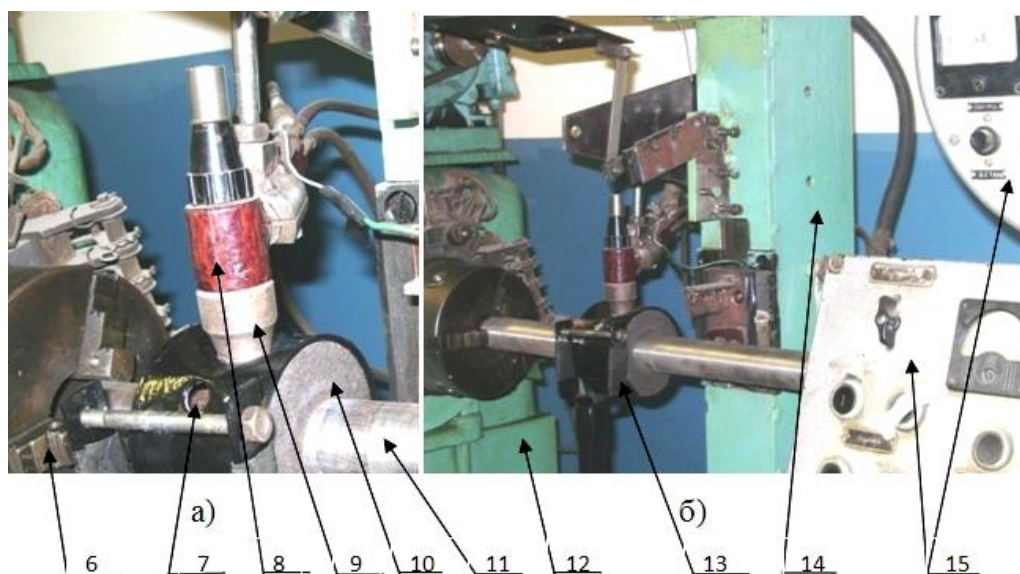


Рис. 2. Общий вид установки реализуемого способа: а – упрочняющий узел, б – общий вид установки



Из теории тепловых процессов известно, что знания температурного поля (скорости нагрева и охлаждения) предопределяют получение качественного закаленного слоя [12-14]. Учитывая это, разработана термодинамическая модель, блок-схема расчета температурного поля и на этой основе – компьютерная программа расчета температурных полей в цилиндре при действии поверхностных тепловых источников «Тепло 4.0», «Тепло 5.0» [15, 16], при этом впервые разработана дифференциально-разностная схема [17-20], полученная на основе комбинации явной и неявной схем и учтены рекомендации приведенные в работах [21-23].

Разработанная программа расчета [16] позволяет для выбранных технологических параметров, теплофизических свойств материала детали, геометрических размеров детали рассчитать время подогрева поверхности детали для образования разогретой кольцевой поверхности до закалочной температуры и температурное поле в процессе закалки, а также скорость нагрева, охлаждения и др. Кроме этого, используя программу расчета определяют значения температуры нагрева и охлаждения детали по окружности, по длине и глубине в зависимости от времени. Таким образом, полученные данные, кроме установления скорости охлаждения и технологических параметров позволяют прогнозировать структуру, твердость и глубину закаленного слоя.

Для примера примем исходные данные для вала из стали 45: диаметр детали  $d = 40$  мм, длина закаливаемой поверхности  $L = 24$  мм, общая длина 224 мм, частота вращения детали  $n = 7,5 \text{ c}^{-1}$ , сила тока  $I = 600$  А, напряжение  $U = 12$  В, КПД  $\eta = 0,58$ . Кроме них определены: линейная скорость детали, мощность теплоисточника, длина ( $a$ ) и ширина ( $b$ ) активного пятна дуги.

С целью определения времени локального нагрева до закалочной температуры, критической скорости охлаждения и других параметров. Были проведены расчеты и построены графики различных зависимостей.

Ниже представлены данные расчета температурного поля по окружности вала. Результаты численных экспериментов представлены табл. 1 и на рис. 3, а для нагрева, и в табл. 2 и на рис. 3, б для охлаждения.

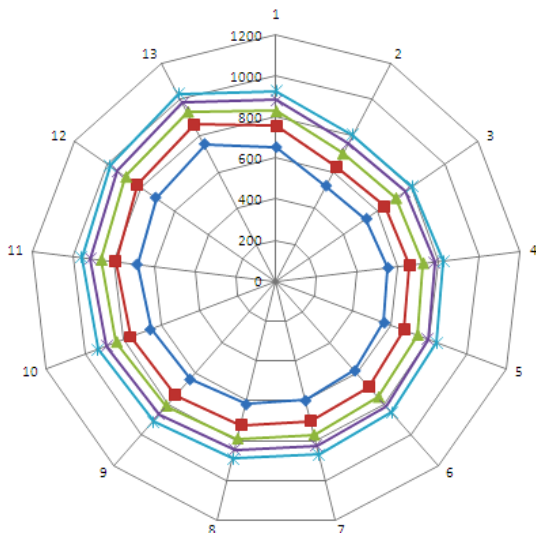


Таблица 1  
Результаты расчетов для нагрева по окружности вала

Число оборотов	Участки по окружности						
	1	3	5	7	9	11	13
20	653	537	565	597	637	687	755
40	760	644	672	704	744	794	863
60	829	713	741	773	813	863	932
80	883	767	794	826	866	917	985
100	927	811	838	871	911	961	1030

Из табл. 1 видно, что при числе 100 оборотов на нагрев на всей окружности детали достигается температура заковки.

Таблица 2  
Результаты расчетов для охлаждения по окружности вала

Время охлаждения, с	Участки по окружности						
	1	3	5	7	9	11	13
100 об/мин	927	811	838	871	911	961	1030
0,5	589	586	590	596	602	601	593
1,0	496	498	499	499	497	495	495
1,5	444	444	443	442	443	443	444
2,0	408	408	408	408	408	408	408

Из табл. 2 видно, что при времени охлаждения, равной 1, с скорость охлаждения по окружности детали больше, чем критическая скорость охлаждения.

Исходя из требования для закалки, для получения закаленного слоя необходимо охлаждать деталь со скоростью не ниже критической, но и не желательно превышать ее в несколько раз, так как это может привести к образованию мартенсита с примесями. Поэтому для рассматриваемого случая при нагреве в 1030 °С необходима скорость охлаждения не ниже чем 305 °С/с. Данная скорость составляет 535 °С/с и ее достаточно для получения мартенситной структуры без примесей.

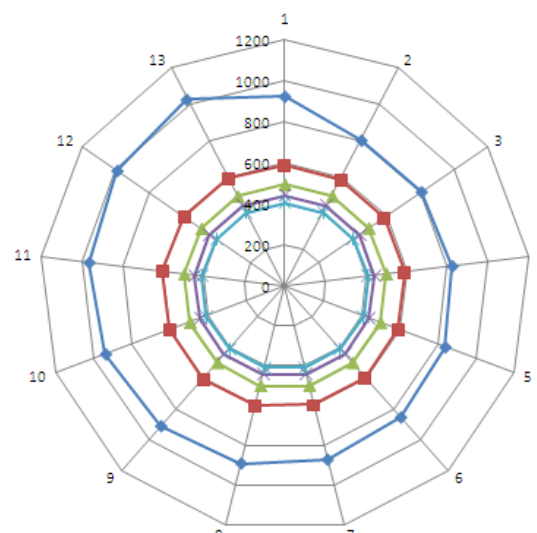


Рис. 3. Процесс кратковременного нагрева (а) и охлаждения (б) по окружности



ВЫВОДЫ

Результаты исследований позволили определить рациональные режимы процесса, которые приведены в табл. 3.

Таблица 3

Рациональные параметры процесса поверхностной закалки

Наименование параметра процесса	Единица измерения	Значение параметра
1. Напряжение дуги	В	11...13
2. Ток дуги	А	500...600
3. Скорость закалки	м/с	0,5...5,5
4. Продольная подача (шаг закалки)	мм/об	1,5...0,5
5. Диаметр электрода	мм	4,0
6. Материал электрода	–	ЭВЛ (ГОСТ 23969-80)
7. Зазор между электродом и деталью	мм	0,5...1,5
8. Расход аргона	л/мин	4...6
9. Угол конуса торца электрода составляет	град	30...40
10. Радиус закругления вершины электрода равен	мм	1,2...2,0
Примечание: показатели процесса ЭДЗ - увеличение твердости в HRC на (20...30) ед; - глубина упрочнения, мм (0,5...1,5)		

Полученные данные по качественным и количественным характеристикам закаленного слоя (твердость, микроструктура, износостойкость и результаты усталостных испытаний) позволяют сделать вывод о том, что разработанный способ упрочнения можно использовать при восстановлении и изготовлении цилиндрических деталей машин широкого ассортимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы упрочнения поверхностей деталей машин. – М.: КРАСАНД, 2008. – 400 с.
2. Иванов В.П. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Ляжкин, В.П. Иванов, В.М. Константинов. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
3. Машрабов Н. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники высокоскоростной аргоно-дуговой наплавкой: автореф. дисс. докт. техн. наук. – Челябинск, 2012. – 39 с.
4. Воловик Е.П. Справочник по восстановлению деталей. – М.: Колос, 1981. – 351 с.
5. Машрабов Н., Гуринец Е.Ю. Способ поверхностного упрочнения цилиндрических деталей из закаливающихся сплавов // Патент России № 2431684 С1. 2011. Бюл. № 29.
6. Машрабов Н. Поверхностная закалка деталей электрической дугой // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2004. – № 5. – С. 16-17.
7. Машрабов Н., Игнатьев Г.С. Способ поверхностной закалки валов электрической дугой // Тр. ГОСНИТИ, 2012. – Т. 110, ч. 2. – С. 61-65.
8. Машрабов Н. Результаты анализа способов поверхностной закалки / Н. Машрабов, Е.Ю. Гуринец // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы ЛП межд. науч.-техн. конф. (Челябинск, 23-25 января 2013 г.). – Челябинск, 2013. – С. 98-102.
9. Машрабов Н. Устройство для начального возбуждения электрической дуги постоянного тока при сварке и наплавке в защитных газах // Патент (полезная модель) России № 39850 U1. 2004. Бюл. № 23.

10. Тылкин М.А. Справочник термиста ремонтной службы. – М.: Металлургия, 1981. – 648 с.

11. Машрабов Н. Методика определения геометрических размеров активного пятна дуги при высокоскоростной аргоно-дуговой наплавке / Н. Машрабов, Г.С. Игнатьев // Тр. ГОСНИТИ. – 2011. – Т. 107. – С. 102-104.

12. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 295 с.

13. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 391 с.

14. Коротков В.А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями. / В.А. Коротков, А.А. Бердников, И.А. Толстов. – Челябинск: Металл, 1993. – 144 с.

15. Геренштейн А.В., Машрабов Н., Геренштейн Е.А. Расчет температурных полей в цилиндре при действии поверхностных тепловых источников «Тепло 4.0». // Свид-во об отрасл. рег. разработ. № 9776, 2008.

16. Машрабов Н., Геренштейн А.В., Геренштейн Е.А. Расчет температурных полей в цилиндре при действии поверхностных тепловых источников «Тепло 5.0». // Свид-во о госуд. рег. программ для ЭВМ №2008612210, 2008. РОСПАТЕНТ.

17. Геренштейн А.В. Устойчивые явные схемы для уравнения теплопроводности / А.В. Геренштейн, Е.А. Геренштейн, Н. Машрабов // Вестник ЮУрГУ, серия «Математическое моделирование и программирование». – 2008. – Вып. 1, № 15. – С. 9-11.

18. Машрабов Н. Устойчивые явные схемы для уравнения теплопроводности для осесимметричной задачи / Н. Машрабов, А.В. Геренштейн, Е.А. Геренштейн // Вестник ЮУрГУ, серия «Математика. Механика. Физика». – 2010. – Вып. 2, № 9. – С. 4-9

19. Самарский А.А. Введение в численные методы. – М.: Лань, 2005. – 288 с.

20. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 614 с.

21. Olson D.L. Physical metallurgical concerns in the modeling of weld metal transformations / D.L. Olson, S. Liu, G.R. Edwards // Mathematical Modeling of Weld Phenomena. – London: Institute of Materials, 1993. – P. 89-108.

22. Korotkov V.A. Studying the Wear Resistance of Carbonitrided Workpieces // Journal of Friction and Wear. – 2013. – Vol. 34, is. 1. – P. 27-31.

23. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. – М.: Мир, 1982. – 235 с.

# Surface Hardening of Parts Arc

Korolkova L.I.

South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[korolkovali@rambler.ru](mailto:korolkovali@rambler.ru)

Mashrabov N.M.

South Ural State Agricultural University,  
Institute of Agricultural Engineers  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[nmashrabov@yandex.ru](mailto:nmashrabov@yandex.ru)

*Abstract.* The paper presents the results of studies for justifying and developing ways and means of surface hardening of cylindrical parts made of hardenable alloys due to heating of an electric arc between the inert electrode and the element. The forms of electrode sharpening and the position of the electrode relative to the element are substantiated. The sequence of surface hardening operations is revealed and the critical rate of cooling is determined and its value is proved with numerical experiments. It was necessary to develop a program for calculating temperature fields in details, with a difference-differential scheme ob-

tained from a combination of explicit and implicit schemes being developed for the first time. A number of investigations were conducted to determine the mechanical properties, the residual stresses, the fatigue resistance, the hardness and the microstructure of hardened layers. As a result, the surface hardening technology is recommended for reconditioning and manufacturing cylindrical machine elements.

*Keywords:* hardening, detail, process conditions, an electric arc, tungsten electrode, properties.

# Азотирование деталей из легированных сталей при высокоэнергетической обработке поверхности

Криони Н.К., Мингажева А.А., Кононова А.Ю.

Уфимский государственный авиационный технический университет  
г.Уфа, Российская Федерация, [krioni@mail.rb.ru](mailto:krioni@mail.rb.ru)

**Аннотация.** Повышение износостойкости деталей машин продолжает оставаться одной из наиболее актуальных задач современного машиностроения. Несмотря на интенсивное развитие различных способов защитно-упрочняющей обработки технологии, основанные на использовании химико-термической метода являются достаточно востребованными и широко используются для повышения эксплуатационных характеристик деталей. Азотирование поверхностного слоя материала деталей как способ повышения надежности последних, имея значительную историю развития и совершенствования продолжает развиваться с учетом научных достижений в области технологий высоких энергий. Однако ужесточение условий работы современных машин и аппаратов требует создание новых технологий азотирования, позволяющих обеспечить комплекс свойств материалов поверхностного слоя деталей и, следовательно, заданные эксплуатационные характеристики. Данная статья посвящена разработке и исследованию новой технологии азотирования деталей из легированных сталей. Особенностью предлагаемой технологии азотирования является создание условий протекания процессов химико-термической обработки деталей, позволяющих формировать в них однородный по структуре и составу азотированный слой.

**Ключевые слова:** износ, азотирование, ионная имплантация, триботехника, модель, неоднородность физико-механических свойств, коэффициент трения.

## ВВЕДЕНИЕ

Износ деталей относится к одной из основных причин выхода их из строя машин и оборудования. Эксплуатационные характеристики деталей, работающих в условиях трения, как правило, определяются свойствами материала его поверхностного слоя. Поэтому для повышения срока службы современной техники широко используются различные виды упрочняющей обработки [1-3].

Процессы упрочнения поверхностного слоя деталей методами химико-термической обработки, нашли наибольшее применение в технике и технологии благодаря своей сравнительной простоте реализации и дешевизне.

Наиболее распространенным методом химико-термической обработки (ХТО) деталей является азотирование [4-6]. При применении способа высокотемпературного азотирования формируется упрочненный слой, незначительной толщины, который обладает высокой коррозионной стойкостью, хорошо работает при высоких изгибных, контактных напряжениях и в условиях повышенного износа. Однако требования к надежности изделий и необходимость интенсификации процессов ХТО привели к появлению процессов, основанных на использовании вы-

сокоэнергетических методов азотирования деталей, наибольшее распространения из которых приобрели технологии, основанные на ионно-плазменных методах химико-термической обработки. Ионно-плазменные процессы обработки деталей, включают, как правило, операцию активирования поверхности детали перед химико-термической обработкой с последующей подачей в камеру установки рабочей насыщающей среды, нагрева детали до температуры процесса ХТО и выдержки при этих температурах до образования азотированного слоя требуемой толщины.

Переход ХТО на новые технологии основанные на использовании ионно-плазменных процессов азотирования, позволил использовать для совершенствования технологий ряд новых эффектов, присущих ионно-плазменным процессам [7]. Однако опыт эксплуатации современной техники показывает, что даже в этом случае, азотированный слой деталей не всегда удовлетворяет требованиям к надежности и ресурсу машин и аппаратов.

Данная статья посвящена вопросам повышения износостойкости деталей из легированных сталей методом азотирования. Авторами был предложен и исследован новый способ формирования азотированного слоя при высокоэнергетической обработке поверхности деталей [8]. Предложенная схематическая модель процесса азотирования основана на гипотезе о возникновении равномерного поля диффузии в поверхностном слое материала в результате предварительной интенсивной бомбардировки высокоэнергетическими ионами азота. Проведенные исследования позволили сделать вывод о жизнеспособности предложенной гипотезы об эффекте применения высокоэнергетической активации поверхности перед азотированием. Разработанная, на основе предложенного способа технология позволила обеспечить однородное состояние поверхностного слоя материала детали. Проведенные испытания сравнительные азотированных по различным технологиям образцов из легированных сталей показали на повышение износостойкости не менее чем в 2,5-3 раза у образцов, обработанных по предложенной технологии по сравнению с образцами, упрочненными по традиционной ионно-плазменной технологии.

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АЗОТИРОВАНИЯ

Технологии обработки поверхности деталей методами ХТО достаточно широко распространены и используются в современном машиностроении как одни из основных методов упрочнения деталей [1-7]. Одним из наиболее перспективных методов упрочнения поверхностного

слоя является азотирование [4, 5]. Как правило, традиционные технологии азотирования основаны либо на обеспечении процессов диффузионного насыщения элементами внедрения и замещения с последующим нагревом поверхности изделия [4], либо в высокотемпературном азотировании и закалке с последующим отпуском [4, 5]. При обработке по технологии высокотемпературного азотирования [5] получают высокоазотистый слой небольшой толщины. Такой слой хорошо противостоит коррозии в атмосфере, но плохо работает при высоких изгибных, контактных напряжениях и в условиях повышенного износа. В последние годы применяются также ионно-плазменные методы ХТО, например, методы ионного азотирования в плазме тлеющего разряда постоянного или пульсирующего тока, которые включают в себя две стадии – очистку поверхности катодным распылением и собственно насыщение поверхности металла азотом [7] или технологии ХТО, в которых на стадии очистки изделий используют тлеющий разряд, который периодически переводят в импульсную электрическую дугу. Применение ионно-плазменных процессов в ХТО позволяет интенсифицировать процесс. При обработке с использованием ионно-плазменных технологий в начальный момент происходит быстрый разогрев поверхности детали. При этом температура начального разогрева несколько выше, чем температура протекания процессов классического азотирования [5,7]. Ионно-плазменные процессы ХТО деталей из металлов или сплавов, включают, как правило, следующую последовательность операций: размещение детали в камере установки, активирование поверхности детали перед химико-термической обработкой, подачу в камеру рабочей насыщающей среды, нагрев детали до температур химико-термической обработки и выдержку при этих температурах до формирования необходимой толщины диффузионного слоя [6].

В то же время, несмотря на достаточно интенсивное развитие технологии ХТО, в том числе, основанных на использовании ионно-плазменных процессов азотирования, им присущ ряд недостатков. Традиционные технологии азотирования характеризуются низкой производительностью – время насыщения поверхностного слоя материала детали длится достаточно долго [5]. При этом, в связи с ужесточением условий эксплуатации деталей их рабочие поверхности, упрочненные с использованием традиционных технологий азотирования, уже не удовлетворяют современным требованиям по износостойкости и другим триботехническим характеристикам [7]. Одной из причин, приводящих к преждевременному выходу из строя упрочненных деталей является неравномерный износ поверхности. Последнее объясняется, в частности, физико-механической и химической неоднородностью диффузионного слоя после азотирования и образования в нем хрупких фаз. Применение традиционных технологий азотирования с достаточно высокой степенью вероятности, приводит к образованию неравномерного слоя с уменьшенной концентрацией насыщаемого вещества, неоднородной и пониженной твердостью материала поверхностного слоя, возникновением дефектных участков. Появление указанных дефектов при азотировании связано, в частности, с различием условий протекания диффузионных процессов по фронту насыщения поверхностного

слоя (рис.1). Последнее связано с неоднородностью свойств и структуры материала поверхностного слоя, сформированной в результате предыдущих технологических операций, а также неоднородности физико-механических и химических свойств исходного материала детали. В результате проведения ХТО происходит наследование и усиление физико-механических и химических свойств материала поверхностного слоя детали [5, 7]. Кроме того, в тонком поверхностном слое материала после ХТО образуется дефектная зона, удаление которой проводится механическим способом. Однако удаление дефектного слоя материала детали часто приводит к образованию в нем новых дефектов, что приводит к повышению неоднородности свойств поверхности и, как результат, к снижению износостойкости деталей.

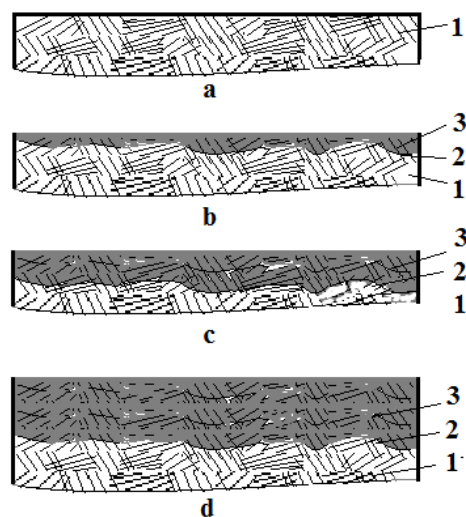


Рис. 1. Модель протекания процесса азотирования с учетом неоднородности поверхностного слоя материала детали при традиционной ХТО: а – поверхность детали перед азотированием; б – начальный процесс азотирования; с – развитие процесса диффузии; d - поверхность с азотированным слоем. 1 – основной материал детали; 2 – граница диффузионного слоя; 3 – азотированный слой

В данной работе предлагается новая технология азотирования [8], позволяющая снизить вероятность появления рассмотренных выше дефектов за счет активации поверхности детали и обеспечения однородного состояния материала его поверхностного слоя в процессе ХТО и, как следствие, привести к повышению износостойкости деталей при азотировании.

Новая технология азотирования деталей из легированной стали включает предварительную высокоэнергетическую активацию поверхности детали перед ХТО. Процесс происходит в рабочей камере вакуумной установки, в которую после ионно-имплантационной обработки деталей подается рабочая насыщающая среда и производится ионное азотирование.

При традиционных методах азотирования (рис. 1) из-за неоднородности свойств и структуры поверхностного слоя материала детали процесс диффузии протекает неравномерно (рис. 1, б, с), что приводит к формированию неоднородного по толщине и структуре азотированного слоя детали (рис. 1 d, рис. 2).



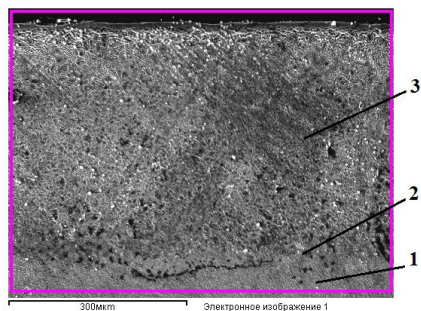


Рис. 2. Электронная фотография образца после ионного азотирования: 1 – исходный материал, 2 – граница, 3 – азотированный слой

В этой связи с целью минимизации неоднородности поверхностного слоя (рис. 3) проводят его ионно-имплантационную обработку (рис. 3,  $b_1$ ), после чего осуществляют азотирование, которое в начале протекает в имплантированной зоне (рис. 3,  $c_1$ ).

Ионно-имплантационная обработка поверхности приводит к образованию тонкого однородного слоя, способного равномерно поглощать диффундируемый азот. Поскольку начальный процесс диффузии является определяющим процесс дальнейшей диффузии азота, то, несмотря на небольшую толщину имплантированного слоя (порядка 3 мкм), последний обеспечивает образование более равномерного и однородного азотированного слоя поверхности детали (рис. 3,  $d_1$ , рис. 4).

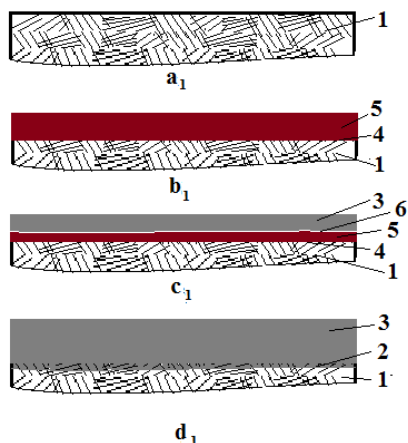


Рис. 3. Модель протекания процесса азотирования с учетом неоднородности поверхностного слоя материала детали при ХТО с предварительной высокоэнергетической активацией:  $a_1$  – поверхность детали перед азотированием;  $b_1$  – поверхностный слой после имплантации;  $c_1$  – начальный процесс азотирования в имплантированном слое;  $d_1$  – поверхность с азотированным слоем. 1 – основной материал детали; 2 – граница диффузионного слоя; 3 – азотированный слой; 4 – граница «имплантированный слой – основной материал»; 5 – имплантированный слой; 6 – граница «имплантированный слой – диффузионный слой»

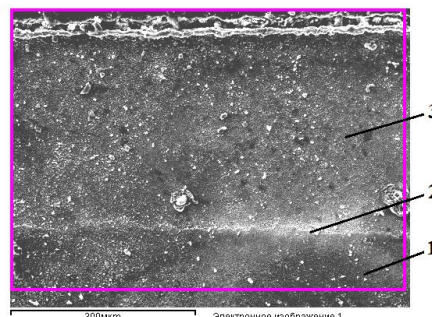


Рис. 4. Электронная фотография образца после ионного азотирования с ионной имплантацией: 1 – основной материал, 2 – граница, 3 – азотированный слой

При высокоэнергетической подготовке поверхности деталей, в качестве имплантируемых ионов использовались ионы азота. Однако, в зависимости от целей обработки деталей могут также применяться и ионы химических элементов, используемые для дополнительного легирования материала поверхностного слоя детали и образующие химические соединения с насыщающим при ХТО азотом.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Триботехнические испытания проводили на автоматизированной машине трения (High-Temperature Tribometer, CSM Instruments, Швейцария) по схеме испытания «шарик-диск». После испытания производилась оценка износа образца и контртела. В каждой партии было обработано и испытано по десять образцов из сталей 16ХЗНВФМБ – Ш. Результаты испытания на износостойкость приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты триботехнических испытаний образцов из стали 16ХЗНВФМБ-Ш после различных вариантов химико-термической обработки

№ партии образцов	Результаты триботехнических испытаний образцов		
	Вид ХТО	Потеря массы, $\Delta m \cdot 10^4$ г	Коэффициент трения (без смазки)
0	Исходный Материал (ИМ)	230	0,16-0,15
1	Газовое азотирование (ГА)	20	0,15-0,14
2	Ионное азотирование (ИА)	16	0,13-0,14
3	Ионная имплантация + газовое азотирование (ИА+ГА)	12	0,13
4	Ионная имплантация + ионное азотирование (ИИ+ИА)	3	0,12-0,13

На фотографиях (рис. 5 и 6) показаны канавки износа испытанных образцов. Поверхность износа исходного образца характеризуется наличием участков адгезионного взаимодействия с контртелом (рис. 5), в то время как в упрочненных образцах явно проявляется эффект адгезионного экранирования (рис. 6).



Рис. 5. Характер износа неупрочненных образцов: а – канавка (увеличение  $\times 5$ ); б – дно канавки (увеличение  $\times 20$ ); 1 – поверхность образца, 2 – канавка износа, 3 – дно канавки износа)

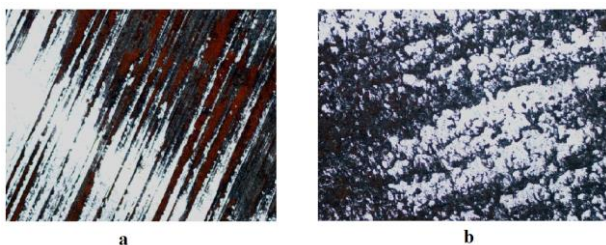


Рис. 6. Картина износа упрочненных образцов (увеличение  $\times 20$ ): а – И.А.; б – И.И.+ И.А.

Сравнение характера износа упрочненных образцов обработанных без высокоэнергетической активации (рис. 6, а) и при подготовке поверхности ионной имплантацией указывает на более высокую износостойкость азотированной поверхности с использованием процесса ионной имплантации (рис. 6, б).

В целом, исследования износа образцов показали, что в каждая партия образцов характеризуется различными количественными и качественными триботехническими характеристиками. Величина износа неупрочненного образца из исходного материала – стали 16ХЗНВФМБ-Ш максимальна, характер износа – наличие зон пластической деформации и схватывания образца с контртелом. По мере уменьшения величины износа образцов наблюдается снижение зон пластической деформации в канавках износа. На образцах, обработанных методом ионной имплантации наблюдается более однородная поверхность износа (рис. 6). Наиболее высокой износостойкостью обладают образцы обработанные по предложенной технологии – высокоэнергетической активацией поверхности методом ионной имплантации с последующим ионным азотированием.

#### Выводы

1. Необходимость обеспечения более высокого уровня надежности современной техники требует разработки новых технологий защитно-упрочняющей обработки деталей.

2. Традиционным технологиям ХТО характерно образование азотированного слоя с неоднородными физико-механическими свойствами, связанных, в частности неоднородностью свойств обрабатываемого поверхностного слоя материала детали.

3. Триботехнические испытания образцов, обработанных по традиционным и предложенной технологиям

азотирования, показали, что использование высокоэнергетической активации поверхности детали позволяет в значительной степени снизить вероятность появления дефектов ХТО и обеспечить однородность физико-механических свойств в материале поверхностного слоя детали.

4. Использование предложенной технологии азотирования деталей из стали 16ХЗНВФМБ-Ш с использованием ионно-имплантационной обработки, позволяет повысить износостойкость деталей не менее чем в 2,5 – 3 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошнин Л.Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. / Л.Г. Ворошнин – Минск: Наука и техника, 1981. – 296 с.

2. Котов О.К. Поверхностное упрочнение деталей машин химико-термическими методами / О.К. Котов – М.: Машгиз, 1961. – 279 с.

3. Чудина О.В. Комбинированное поверхностное упрочнение углеродистых сталей лазерным легированием с последующим азотированием / О.В. Чудина, В.А. Александров, А.А. Брежнев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – Т. 64, №4. – С. 33-37.

4. Лахтин Ю.М. Азотирование стали / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.

5. Лахтин Ю.М. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г.И. Шпис, З. Бомер – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.

6. Бледнова Ж.М., Чаевский М.И., Шауро А.Н. Способ повышения износостойкости штампов из азотируемых сталей // Патент России №2144095. 2000. Бюл. №1.

7. Арзамасов Б.Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов: монография / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1998. – 400 с.

8. Криони Н.К., Мингажев А.Д., Давлеткулов Р.К., Мингажева А.А., Измайлова Н.Ф., Бахтиярова Е.В. Способ химико-термической обработки детали из легированной стали // Патент России № 2559606. 2015. Бюл. №22.

# Nitriding of Parts Made of Alloyed Steels when High-Energy Surface Treatment

Krioni N.K., Mingazheva A.A., Kononova A.Yu.  
FSBEI HPE «Ufa state Aviation Technical University»  
Ufa, Russian Federation  
[krioni@mail.rb.ru](mailto:krioni@mail.rb.ru)

*Abstract.* Increased wear resistance of machine parts continues to be one of the most urgent problems of modern machine building. Despite the intensive development of different ways of protective hardening treatment, the technologies based on thermochemical methods are quite popular and widely used to improve the performance characteristics of parts. Nitriding of the surface layer of parts as a way of improving their reliability has a considerable history of development and improvement and continues to develop relying on scientific advances in the field of high energies. However, tightened operating conditions of modern machines and equipment require creating new nitriding technologies that can provide a complex of properties of parts surface layer and therefore specified performance characteristics. This

article is devoted to the research and development of a new technology of nitriding parts made of alloyed steels. The specific feature of the proposed nitriding technology consists in creating the conditions for thermochemical treatments of parts allowing forming the nitrided layer that is homogeneous in structure and composition.

*Keywords:* wear, nitriding, ion implantation, friction machinery, model, heterogeneity of physical and mechanical properties, coefficient of friction.

# Выращивание монокристаллов частично замещенного алюминием гексаферрита бария из раствора на основе оксида свинца\*

Винник Д.А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[denisvinnik@gmail.com](mailto:denisvinnik@gmail.com)

Гудкова С.А.

Московский физико-технический институт (государственный университет)  
г. Долгопрудный, Российская Федерация  
[svetlanagudkova@yandex.ru](mailto:svetlanagudkova@yandex.ru)

Нива Р.

Институт неорганической химии  
Университета Штуттгарта  
г. Штуттгарт, Германия  
[rainer.niewa@iac.uni-stuttgart.de](mailto:rainer.niewa@iac.uni-stuttgart.de)

**Аннотация.** В работе представлены результаты выращивания монокристаллов частично замещенного алюминием гексаферрита бария  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$  из раствора на основе оксида свинца на воздухе при температуре 1260 °С. Кристаллы имели форму гексагональных пластин размером до 2 мм. Предельно достигнутая степень замещения  $x$  – 3.6. На основании результатов проведенного рентгенофазового анализа можно утверждать, что выращенные кристаллы были монофазными. Рентгеноструктурный анализ выявил характерное для замещения алюминием изменение кристаллической решетки частично замещенных образцов.

**Ключевые слова:** гексаферрит бария, рост кристаллов, частично замещенный алюминием гексаферрит бария, магнетизм, структура монокристаллов.

## ВВЕДЕНИЕ

Появление новых научных направлений и создание новых наукоемких технологий предъявляют жесткие требования к материалам. Тенденцией современного материаловедения является умение не просто получать материалы, а управлять свойствами материалов, т.е. создавать материалы с прогнозируемыми свойствами под конкретные задачи той или иной отрасли промышленности. Одним из способов решения представленной задачи предлагается модификация уже известных материалов. Так, в области электроники известный материал гексаферрит бария, используемый в элементах памяти жестких дисков, в последние десятилетия привлекает все больший интерес благодаря возможности применения в качестве поглощающих покрытий, элементов излучателей и резонаторов и др. [1-6].

Установлено, что функциональные свойства ферритов бария могут быть значительно изменены путем частичного или полного замещения катионов примесными атомами. Такое изменение структуры позволяет значительно варьировать свойства ферритов бария, в частности изменить степень одноосной магнитной анизотропии, величину коэрцитивной силы, температуру точки Кюри [1].

Известно, что изо- и гетеровалентная частичная замена  $Fe^{3+}$  искажает поле внутри кристаллической решетки  $BaFe_{12}O_{19}$ . Это приводит к изменению параметров кристаллической решетки и как следствие к модификации магнитных свойств материала [7-11]. Одним из наиболее перспективным легирующим элементом для гексаферрита

$BaFe_{12}O_{19}$  является алюминий, замещение железа на который приводит к увеличению поля анизотропии и увеличению частоты ФМР [12-22]. Для состава  $BaFe_{10}Al_2O_{19}$  это значение в 2-2,5 раза выше, чем для чистой матрицы гексаферрита бария. Это дает возможность использовать данный модифицированный гексаферрит бария в качестве излучателей в информационно-телекоммуникационных системах, где важны низкий уровень потерь и повышение частоты ФМР, что расширяет возможности приборов и устройств на основе такого материала. В частности, переход к частотам до 100 ГГц и выше обеспечит повышение объемов передачи данных между спутниками. Это приведет к развитию телекоммуникационных услуг нового поколения на базе космических систем.

Усилия ученых направлены на увеличение максимально достигаемой степени замещения железа алюминием. Так, в работе [14] приведены результаты исследования стержней  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$ , полученных методом направленной кристаллизации, со степенью замещения  $x$  равной 0.5, 1.0, 1.5, 2.0. Однако, реализация данной методики выращивания требует применения реакторов высокого давления (до 50 атм.).

Расплавные методы лишены такого недостатка, однако для их реализации требуется значительно более высокая температура [23].

В такой ситуации оптимальным представляется выращивание данных материалов из раствора. Преимуществами данного метода являются более низкая температура процесса, что снижает испарение компонентов и обеспечивает более стабильные условия роста кристалла. Для выращивания гексаферрита бария используют как собственные флюсы ( $BaO$ ) [24], так и ряд прочих растворителей:  $Na_2O-B_2O_3$  [25],  $BaO-B_2O_3-PbO$  [26],  $BaCl_2-B_2O_3$  [27-28],  $Na_2O$  [29-31]. При этом было установлено, что при выращивании частично замещенного гексаферрита бария эффективность растворителя для разных допантов может отличаться [32]. В ранее опубликованных нами работах были представлены результаты выращивания монокристаллов гексаферрита бария из раствора на основе  $Na_2O$  с предельно достигнутой степенью замещения 1,1 [12-13].

В данной работе была исследована возможность применения в качестве растворителя оксида свинца  $PbO$  с целью определения предельно достижимой степени замещения  $Al^{3+}$  из раствора на его основе.

\* Исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 15-32-51192.



МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Смесь исходных компонентов – оксиды свинца и железа, карбоната бария – перетирали в агатовой ступе и засыпали в платиновый тигель объемом 30 мл. Тигель помещали в печь с резистивным нагревателем.

Устройство печи рассмотрено в [32]. Для гомогенизации содержимого тигля при температуре 1260 °С производили выдержку в течение 3 часов. После этого раствор охлаждали со скоростью 4.5 °С/ч до температуры 900 °С, после чего печь отключали; массовый выход составлял около 60 %; кристаллы отделяли от остатков раствора кипячением в азотной кислоте.

Для проведения исследования порошковых образцов отбирали единичные наиболее ограненные монокристаллы (не более пяти из каждого эксперимента), перетирали в агатовой ступе.

Для определения элементного состава кристаллов использовался растровый электронный микроскоп (Jeol JSM7001F с энергодисперсионным спектрометром Oxford INCA X-max 80 для элементного анализа).

Для изучения кристаллической структуры образцов применялись методы порошковой дифрактометрии (Rigaku Ultima IV; измерения проводили в диапазоне углов 10° to 80° со скоростью до 2 °/min с использованием излучения CuKα).

Подтверждением монокристалличности материала служат результаты проведения дифференциального термического анализа (Netzsch 449C Jupiter; образцы в платиновом тигле нагревали на воздухе со скоростью 2 °С/мин от 25 до 600°С; температуры Кюри определяли как среднее арифметическое температур пиков плавления и кристаллизации).

ЭКСПЕРИМЕНТ

Методом спонтанной кристаллизации из раствора были получены кристаллы размерами до 2 мм. В качестве флюса использовали оксид свинца PbO, молярная доля которого в растворе составляла 60 ат. %. В табл. 1 представлены составы исходной шихты.

Таблица 1

Состав раствора на основе оксида свинца

Расчетная формула феррита	Концентрации компонентов раствора, масс. %				Содержание Al в растворе		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaCO <sub>3</sub>	PbO	Масс. %	Ат. %	x
BaO•6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	27,383	5,640	66,977	-	-	-
BaO•1,5Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> •4,5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,482	21,058	5,783	68,677	2,37	3,43	1,10
BaO•2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> •4Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,027	18,878	5,832	69,263	3,19	4,57	1,46

В результате проведенной серии экспериментов по выращиванию объемных частично замещенных свинцом монокристаллов гексаферрита бария были получены образцы с высокой степенью замещения – до 3,6. Несмотря на частичное замещение бария катионами свинца, изменение параметров решетки и значений магнитных характеристик аналогично полученным из раствора на основе оксида натрия кристаллам [12]. С ростом концентрации

алюминия объем решетки уменьшается. Это связано с меньшим по сравнению с железом Fe<sup>3+</sup> значением радиуса катиона Al<sup>3+</sup>. Так, для случая КЧ = 4, r(Al<sup>3+</sup>) = 0.53 Å; r(Fe<sup>3+</sup>) = 0.63 Å [34].

На рис. 2 представлены дифрактограммы выращенных монокристаллов.

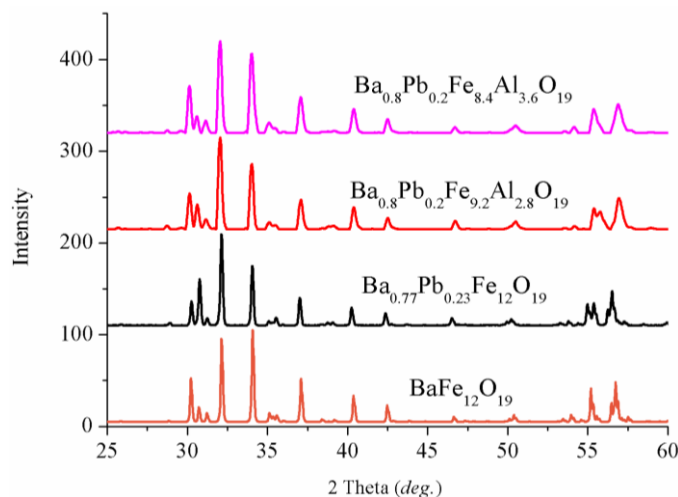


Рис. 2. Дифрактограммы порошковых образцов гексаферрита бария

Положения всех пиков дифрактограмм полученных экспериментально образцов совпадают с теоретическими данными (состав BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>). Однако, вследствие влияния текстуры образцов, соотношения интенсивностей пиков отличны: пики h = k = 0 (00l) – в первую очередь (006) 22.9882 град и (008) 30.8158 град – имеют более высокие значения интенсивностей.

В табл. 2 приведены результаты измерений концентрации алюминия, формула полученного кристаллического материала, параметры решетки, а также значения температуры Кюри. На рис. 3 представлен характерный вид кривой ДСК для образца, не содержащего алюминий. Для частично замещенных алюминием образцов пики, соответствующие температуре Кюри не обнаружены. Вероятно, это обусловлено высокой степенью замещения.

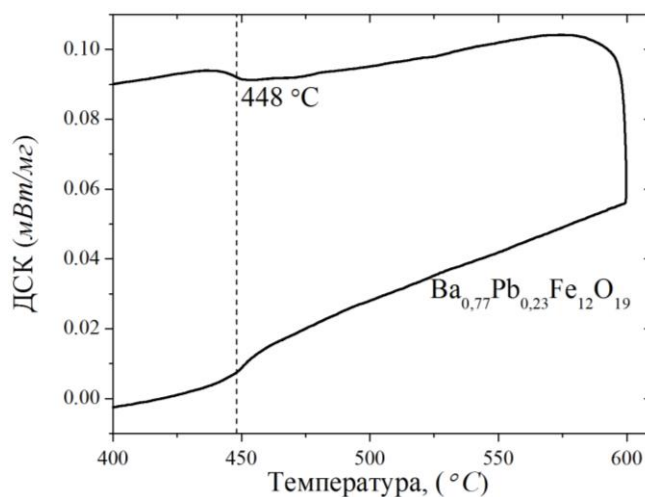


Рис. 3. Характерный вид кривой ДСК

Таблица 1

Данные о структуре и свойствах полученных кристаллов

Состав кристалла*	$a$ [Å]	$c$ [Å]	$V$ [Å <sup>3</sup> ]	$T_c$ [°C]
BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> [35-37]	5,893	23,194	697,5	457
Ba <sub>0,77</sub> Pb <sub>0,23</sub> Fe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	5,8962(4)	23,1927(13)	698,28(6)	448
Ba <sub>0,8</sub> Pb <sub>0,2</sub> Fe <sub>9,2</sub> Al <sub>2,8</sub> O <sub>19</sub>	5,859(7)	23,00(3)	683,7(10)	**
Ba <sub>0,8</sub> Pb <sub>0,2</sub> Fe <sub>8,4</sub> Al <sub>3,6</sub> O <sub>19</sub>	5,827(6)	22,972(25)	675,6(10)	**

\*химические формулы рассчитаны согласно данным EDX; \*\* методом ДСК пики, соответствующие температуре Кюри не обнаружены

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного экспериментального исследования впервые установлен комплекс физико-химических параметров, обеспечивающий стабильное образование объемных монокристаллов гексаферрита бария BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> со степенью замещения  $x$  до 3,6 из высокотемпературного раствора.

Установлено влияние замещения на параметры решетки гексаферрита бария. Так, для состава Ba<sub>0,8</sub>Pb<sub>0,2</sub>Fe<sub>8,4</sub>Al<sub>3,6</sub>O<sub>19</sub>:  $a = 5,827(6)$  Å,  $c = 22,972(25)$  Å,  $V = 675,6(10)$  Å<sup>3</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Marino-Castellanos P.A. Magnetic and microstructural properties of the Ti<sup>4+</sup>-doped Barium hexaferrite / P.A. Marino-Castellanos, J. Anglada-Rivera, A. Cruz-Fuentes, R. Lora-Serrano // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2004. – vol. 280. – P. 214-220.

[2] Geok B.T. Preparation and studies of Co(II) and Co(III)-substituted barium ferrite prepared by sol-gel method / B.T. Geok, S. Nagalingam, D.A. Jefferson. // Materials Chemistry and Physics. – 2007. – vol. 101. – P. 158-162.

[3] Zhang W. Ultra large coercivity in barium ferrite thin films prepared by magnetron sputtering / W. Zhang, B. Peng, W. Zhang, S. Zhou, H. Schmidt. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2010. – vol. 322. – P. 1859-1862.

[4] Xu H. Properties of barium hexa-ferrite thin films dependent on sputtering pressure. / H. Xu, W. Zhang, B. Peng, W. Zhang. // Applied Surface Science. – 2011. – vol. 257. – P. 2689-2693.

[5] Song Y.-Y. Millimeter wave notch filters based on ferromagnetic resonance in hexagonal barium ferrites / Y.-Y. Song, C. L. Ordóñez-Romero, M. Wu // Applied Physics Letters. – 2009. – vol. 95. – P. 142506-1-3.

[6] Harris V.G. Modern microwave ferrites // – 2012. -vol. 48 – P. 1075-1104.

[7] Vinnik D.A. Ti-Substituted BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> Single Crystal Growth and Characterization / D.A. Vinnik, D.A. Zhrebtsov, L.S. Mashkovtseva, S. Nemrava, N.S. Perov, A.S. Semisalova, I.V. Krivtsov, L.I. Isaenko, G.G. Mikhailov, R. Niewa // Crystal Growth and Design. – 2014. – vol. 14. – P. 5834–5839.

[8] Vinnik D.A. Structural and Magnetic Characterization of Co- and Ni-substituted Barium Hexaferrite Single Crystals Growth / D.A. Vinnik, D.A. Zhrebtsov, L.S. Mashkovtseva, S. Nemrava, A.S. Semisalova, D.M. Galimov, L.I. Isaenko, R. Niewa // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – vol. 628. – P. 480-484.

[9] Vinnik D.A. Growth, Structural and Magnetic Characterization of Zn-substituted Barium Hexaferrite Single Crystals

tals / D.A. Vinnik, A.S. Semisalova, A.K. Yakushechkina, S. Nemrava, S.A. Gudkova, D.A. Zhrebtsov, N.S. Perov, L.I. Isaenko, R. Niewa // Materials Chemistry and Physics. – 2015. – vol. 163. – P. 416-420.

[10] Vinnik D.A. Cu-substituted barium hexaferrite crystal growth and characterization / D.A. Vinnik, A. Tarasova, D.A. Zhrebtsov, L.S. Mashkovtseva, S.A. Gudkova, S. Nemrava, A.K. Yakushechkina, A.S. Semisalova, L.I. Isaenko, R. Niewa // Ceramics International. – 2015. – vol. 41. – P. 9172-9176.

[11] Vinnik D.A. Tungsten substituted BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> single crystal growth and characterization / D.A. Vinnik, D.A. Zhrebtsov, L.S. Mashkovtseva, S. Nemrava, A.K. Yakushechkina, A.S. Semisalova, S.A. Gudkova, A.N. Anikeev, N.S. Perov, L.I. Isaenko, R. Niewa // Materials Chemistry and Physics. – 2015. vol. 155. – P. 99-103.

[12] Vinnik D.A. Growth, structural and magnetic characterization of Al-substituted barium hexaferrite single crystals / D.A. Vinnik, D.A. Zhrebtsov, L.S. Mashkovtseva, S. Nemrava, M. Bischoff, N. S. Perov, A. S. Semisalova, I. V. Krivtsov, L. I. Isayenko, G. G. Mikhailov, R. Niewa // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – vol. 615. – P. 1043-1046.

[13] Vinnik D.A. Structural and millimeter-wave characterization of flux grown Al substituted barium hexaferrite single crystals / D.A. Vinnik, A.B. Ustinov, D.A. Zhrebtsov, V.V. Vitko, S.A. Gudkova, I. Zakharchuk, E. Lähderanta, R. Niewa // Ceramics International. – 2015. – vol. 41. – is. 10. – P. 12728-12733.

[14] Ustinov A.B. Al substituted Ba-hexaferrite single-crystal films for millimeter-wave devices / A. B. Ustinov, A. S. Tatarenko, G. Srinivasan, A. M. Balbashov // Journal of Applied Physics. – 2009. – vol. 105. – P. 105-108.

[15] Ustinov A.B. Subterahertz excitations and magnetoelectric effects in hexaferrite-piezoelectric bilayers / A.B. Ustinov, G. Srinivasan // Applied physics letters. – 2008. – vol. 93. – is. 142503. – P. 93-95.

[16] Popov M. Sub-Terahertz Magnetic and Dielectric Excitations in Hexagonal Ferrites / M. Popov, I. Zavislyak, A. Ustinov, G. Srinivasan // IEEE Transactions on Magnetics. – 2011. – vol. 47. – P. 289-294.

[17] Harward I. Physical properties of Al doped Ba hexagonal ferrite thin films / I. Harward, Y. Nie, D. Chen, J. Baptist, M.J. Shaw, E.J. Liskova, S. Visnovsky, P. Siroky, M. Lesnak, J. Pistora, Z. Celinski // Journal of Applied Physics. – 2013. – vol. 113. – P. 043903-1-12.

[18] El-Sayed S.M. Magnetic behavior and dielectric properties of aluminum substituted M-type barium hexaferrite / S.M. El-Sayed, T.M. Meaz, M.A. Amer, H.A. El Shersaby // Physica B: Condensed Matter. – 2013. – vol. 426. – P. 137–143.

[19] Trukhanov A.V. Crystal structure and magnetic properties of the BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0.1-1.2$ ) solid solutions / A.V. Trukhanov, V.O. Turchenko, I.A. Bobrikov, S.V. Trukhanov, I.S. Kazakevich, A.M. Balagurov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – vol. 393. – P. 253-259.

[20] Moitra A. Defect formation energy and magnetic properties of aluminum-substituted M-type barium hexaferrite / A. Moitra, S. Kim, S. Kim, S.C. Erwin, Y. Hong, J. Park // Computational Condensed Matter. – 2014. – vol. 1. – P. 45-50.

[21] Chen D. Curie temperature and magnetic properties of aluminum doped barium ferrite particles prepared by ball mill method / D. Chen, I. Harward, J. Baptist, S. Goldman, Z. Celinski // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – vol. 395. – P. 350-353.

[22] Chen D. Microstructure and magnetic properties of Al-doped barium ferrite with sodium citrate as chelate agent / D. Chen, Y. Liu, Y. Li, K. Yang, H. Zhang // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2013. – vol. 337. – P. 65-69.

[23] Balbashov A.M. Apparatus for growth of single crystals of oxide compounds by floating zone melting with radiation heating / A.M. Balbashov, S.K. Egorov // Journal of Crystal Growth. – 1981. – vol. 52. – P. 498-504.

[24] Wittenauer M.A. Growth and characterization of high purity single crystals of barium ferrite / M.A. Wittenauer, J.A. Nyenhuis, A.I. Schindler, H. Sato, F.J. Friedlaender, J. Truedson, R. Karim, C.E. Patton // Journal of Crystal Growth. – 1993. – vol. 130. – P. 533-542.

[25] Watanabe K. Growth of minute barium ferrite single crystals from a  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$  flux system // Journal of crystal growth. – 1996. – vol. 169. – P. 509-518.

[26] Aidelberg J. Cellular growth in  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  crystals solidified from flux solvent / J. Aidelberg, J. Flicstein and M. Schieber // Journal of Crystal Growth. – 1974. – vol. 21. – P. 195-202.

[27] Shlyk L.  $\text{BaZnRu}_5\text{O}_{11}$ : Novel Compound with Frustrated Magnetic Lattice Based on Distorted Kagome Networks / L. Shlyk, S. Strobel, E. Rose, R. Niewa // Solid State Science. – 2012. – vol. 14. – P. 281-286.

[28] Shlyk L. Ruthenate-ferrites  $\text{AMRu}_5\text{O}_{11}$  (A = Sr, Ba; M = Ni, Zn): Distortion of kagome nets via metal-metal bonding / L. Shlyk, S. Strobel, Th. Schleid, R. Niewa // Zeitschrift für Kristallographie. – 2012. – vol. 227. – P. 545-551.

[29] Gambino R.J. Growth of Barium Ferrite Single Crystals / R.J. Gambino, F. Leonhard // Journal of American Ceramic Society. – 1961. – vol. 44. – P. 221-224.

[30] Винник Д.А. Получение кристаллов феррита бария из раствора / Д.А. Винник, Л.С. Машковцева, Д.А. Жеребцов, В.В. Дьячук, Г.Г. Михайлов // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Metallurgiya. – 2011. – № 36 (253). – С. 41.-44.

[31] Vinnik D.A. Growing doped barium ferrite single crystals using the flux method / D.A. Vinnik, D.A. Zhrebtsov, L.S. Mashkovtseva // Doklady physical chemistry. – 2013. – vol. 449. – P. 39-40.

[32] Licci F. Growth and characterization of  $\text{Ba}(\text{Mn,Ti})_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$  crystals / F. Licci, T. Besagni // Materials Research Bulletin. – 1987. – vol. 22. – P. 467-476.

[33] Винник Д.А. Резистивная печь для выращивания монокристаллов // Бутлеровские сообщения. – 2014. – Т. 39. – № 9. – С. 153.-154.

[34] Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // Acta Crystallographica. – 1976. – vol. A32. – P. 751-767.

[35] Townes W.D. The crystal structure and refinement of ferromagnetic barium ferrite,  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  / W.D. Townes, J.H. Fang, A.J. Perrotta // Zeitschrift für Kristallographie. – 1967. – vol. 125. – P. 437-449.

[36] Mou F.-Z. In situ generated dense shell-engaged Ostwald ripening: A facile controlled-preparation for  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  hierarchical hollow fiber arrays / F.-Z. Mou, J.-g. Guan, Z.-g. Sun, X.-a. Fan, G.-x. Tong // Journal of Solid State Chemistry. – 2010. – vol. 183. – P. 736-743.

[37] Mohsen Q. Barium hexaferrite synthesis by oxalate precursor route // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – vol. 500. – P. 125-128.

## Growing of Aluminum Substituted Barium Hexaferrite Single Crystal from Lead Oxide Solution

Vinnik D.A.

South Ural State University  
(national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[denisvinnik@gmail.com](mailto:denisvinnik@gmail.com)

Gudkova S.A.

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)  
Dolgoprudny, Russian Federation  
[svetlanagudkova@yandex.ru](mailto:svetlanagudkova@yandex.ru)

Niewa R.

Institute of Inorganic Chemistry,  
University of Stuttgart  
Stuttgart, Germany  
[rainer.niewa@iac.uni-stuttgart.de](mailto:rainer.niewa@iac.uni-stuttgart.de)

**Abstract.** The results of aluminum substituted barium hexaferrite  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  single crystals growth are presented. The lead oxide was used as flux. The temperature was 1260 ° C. The crystals have the hexagonal plates shape up to 2 mm. Maximum substitution level  $x = 3.6$  was achieved. The structure of grown samples was determined. X-ray diffraction analysis revealed cell

parameters change of the aluminum substituted samples which are in good agreement with literature data.

**Keywords:** barium hexaferrite, crystal growth, aluminum substituted barium hexaferrite, magnetism, single crystals structure.



# Изучение условий образования кристаллов карбида кремния в металлическом расплаве сложного состава\*

Трофимов Е.А., Самойлова О.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[tea7510@gmail.com](mailto:tea7510@gmail.com)

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты термодинамического моделирования и экспериментального исследования, имевшие целью определение условий синтеза кристаллов карбида кремния в металлических расплавах сложного состава. Для термодинамического моделирования использован программный пакет «FactSage». Построенные фазовые диаграммы, представленные в форме поверхностей ликвидуса, позволяют не только определить состав металла с минимальной температурой плавления, но и наглядно представить диапазоны концентраций и температур, для которых равновесным продуктом взаимодействия компонентов металла будет являться карбид кремния. Результаты проведённых экспериментальных работ также подтверждают возможность выращивания кристаллов карбида кремния в объёме комплексных металлических расплавов при относительно низких температурах. Результаты исследования полученного образца сложного сплава (посредством растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6460LV, оснащенного спектрометром энергетической дисперсии фирмы «Oxford Instruments» для проведения качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа) позволили обнаружить кристаллы, соответствующие по составу SiC.

**Ключевые слова:** карбид кремния, металлический расплав, термодинамическое моделирование, экспериментальное исследование.

## ВВЕДЕНИЕ

Системы вида Me-Si-C, включающие металлический расплав, являются основой перспективной методики выращивания кристаллов карбида кремния [1, 2]. Потребности развития такого рода технологий диктуют необходимость поиска составов металла с относительно низкими температурами плавления. При этом металлический расплав должен сохранять способность растворять кремний и углерод в существенных количествах. Использование в качестве растворителя одного металла не позволяет добиться оптимального сочетания свойств растворителя. Усложнение состава металлического расплава за счёт введения в него нескольких элементов подгруппы железа и подобных им может позволить добиться требуемого эффекта. Для поиска новых составов относительно легкоплавких металлических расплавов (катализаторов роста кристаллов карбида кремния) целесообразно использование проекций поверхностей ликвидуса систем Fe-(...)-Si-C [3, 4].

Целью настоящей работы стало теоретическое и экспериментальное изучение условий синтеза кристаллов карбида кремния в металлических расплавах сложного состава.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для термодинамического моделирования использован блок «Phase Diagram» программного пакета «FactSage» (версия 6.4) производства «Thermfact» (Канада) и «GTT Technologies» (Германия).

На начальном этапе [4] с помощью баз данных FSstel; FSupsi, SGTE2011 и SGPS были проведены расчёты диаграмм состояния ряда двойных систем (Fe-Si, Fe-C, Si-C, Ni-Si, Ni-C, Co-Si, Co-C, Mn-Si, Mn-C, Fe-Ni, Fe-Co, Fe-Mn, Co-Ni, Mn-Ni, Mn-Co). Осуществлено сопоставление результатов расчёта с опубликованными в литературе данными о диаграммах состояния двойных систем. Диаграммы систем Fe-Si, Fe-C, Ni-Si, Ni-C, Co-C, Mn-C, Fe-Ni, Fe-Co, Fe-Mn, Co-Ni, Mn-Co с приемлемым качеством описываются с использованием базы FSstel.

Использование рассмотренных вариантов параметрического обеспечения для описания системы Si-C не позволяет получить диаграмму, количественно соответствующую данным [5]. Вместе с тем они позволяют получить результаты, близкие к данным работы [6].

Использование для моделирования системы Co-Si базы SGTE2011 позволяет более подробно и качественно описать фрагмент диаграммы, связанный с фазовыми переходами Co<sub>2</sub>Si [7]. Однако точность, с которой система описывается посредством базы FSstel, также может быть признана достаточной для целей настоящего исследования.

Фазовая диаграмма, которая рассчитана с использованием данных FSstel для системы Mn-Si, практически соответствует данным работы [8] и по сравнению со справочными данными [9] выглядит несколько упрощённой.

Наконец, диаграмма системы Mn-Ni, рассчитанная посредством FSstel, фактически воспроизводит результат расчёта L. Kaufman [10]. Использование базы SGTE2011 позволяет описать некоторые участки диаграммы корректнее, но в этом случае рисунок диаграммы не полностью соответствует известным экспериментальным данным [11].

В целом, сопоставление полученных диаграмм двойных систем с данными по диаграммам состояния двойных систем, представленными в справочниках и оригинальных публикациях, позволило сделать вывод о том, что в данном случае для построения диаграмм более сложных систем целесообразно использовать базу данных FSstel. В ходе дальнейших расчётов использована именно эта база.

Была проведена работа по поиску в базах SGTE2011, SGPS, FSupsi и FactPS соединений, содержащих три и бо-

\* Исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 13-08-00545.



лее элемента, принадлежащих системе Fe-Ni-Co-Mn-Si-C и отсутствующих в базе FSstel. Данных, которые следовало бы использовать в процессе дальнейших расчётов в ходе этих поисков, обнаружено не было.

Ключевой системой для технологии выращивания карбида кремния является система Fe-Si-C. Диаграмма состояния (проекция поверхности ликвидуса) этой системы представлена на рис. 1.

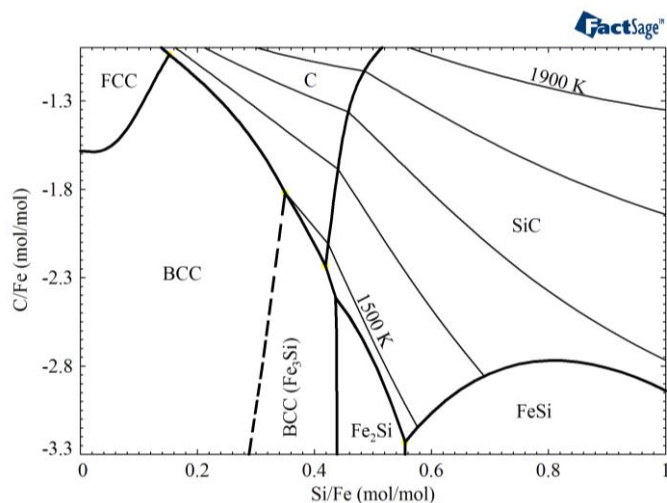


Рис. 1. Проекция поверхности ликвидуса системы Fe-Si-C

Для удобства представления результатов расчёта на этой и последующих диаграммах концентрация углерода на оси ординат и концентрация кремния на оси абсцисс показаны в виде отношения количеств этих элементов, приходящихся на 1 моль металла-растворителя (чистого металла или смеси металлов). Концентрация углерода представлена в форме десятичного логарифма этой величины. Все диаграммы рассчитаны для давления равного 1 бар. Тонкими линиями показаны изотермы – линии равновесия металлического расплава с твёрдыми фазами. Поскольку наибольшее значение для рассматриваемой технологии имеют области равновесия металла с карбидом кремния и графитом – изотермы для рассчитанных диаграмм нанесены именно в этих двух областях, а также в области сосуществования жидкого металла с кристаллизовавшимся металлом.

Помимо упомянутых областей, на диаграмме имеется область равновесия жидкого металла с твёрдым металлом с ОЦК кристаллической решёткой и области равновесия металлического расплава с различными силицидами железа.

Из рисунка диаграммы следует, что нижняя (по температуре) граница области сосуществования металлического расплава с SiC практически соответствует участку изотермы для 1500 °K.

В какой степени добавление четвёртого элемента позволяет снизить минимальную температуру области сосуществования жидкого металла с SiC, можно судить по диаграммам, представленным на рис. 2-4. На этих рисунках приведены проекции поверхностей ликвидуса для систем Fe-Ni-Si-C, Fe-Co-Si-C и Fe-Mn-Si-C. Во всех случаях расчёт проводился для условий, когда в составе системы количества атомов железа и другого металла равны.

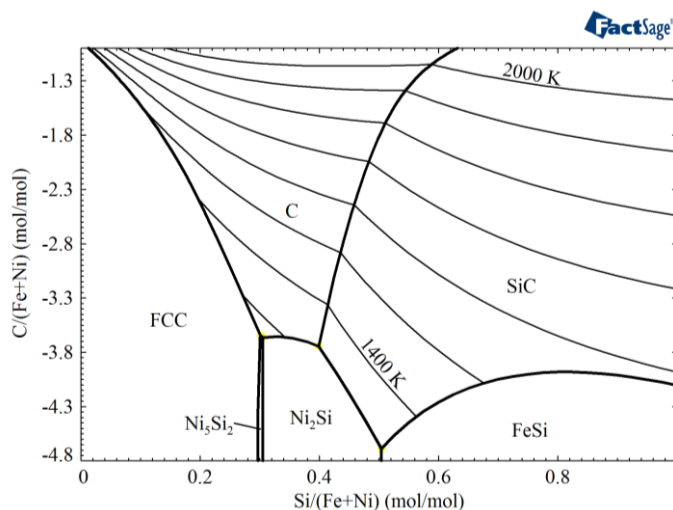


Рис. 2. Проекция поверхности ликвидуса системы Fe-Ni-Si-C для случая, когда в составе металлического расплава количества атомов железа и никеля равны

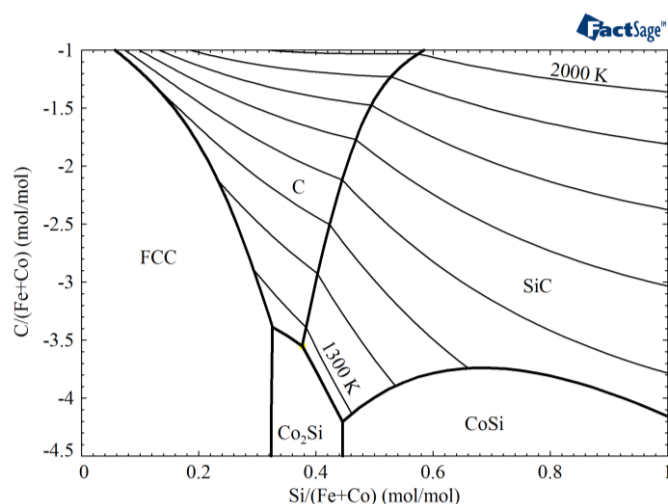


Рис. 3. Проекция поверхности ликвидуса системы Fe-Co-Si-C для случая, когда в составе металлического расплава количества атомов железа и кобальта равны

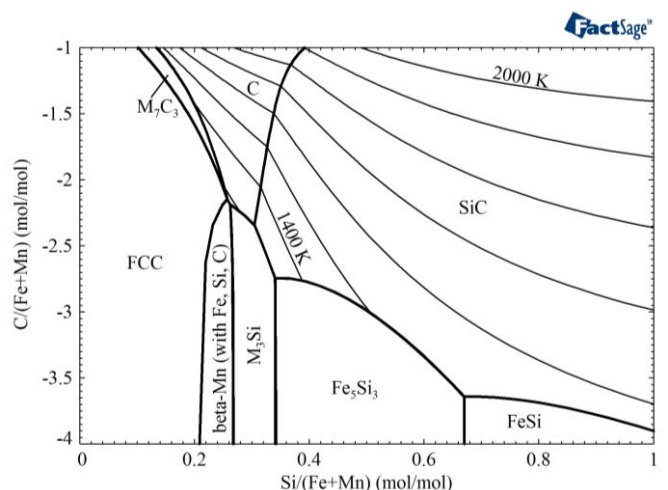


Рис. 4. Проекция поверхности ликвидуса системы Fe-Mn-Si-C для случая, когда в составе металлического расплава количества атомов железа и марганца равны

Наконец, на рис. 5 представлена поверхность ликвидуса для системы Fe-Ni-Co-Mn-Si-C. Расчёт проводился для условий равного содержания атомов железа, никеля, кобальта и марганца в системе.

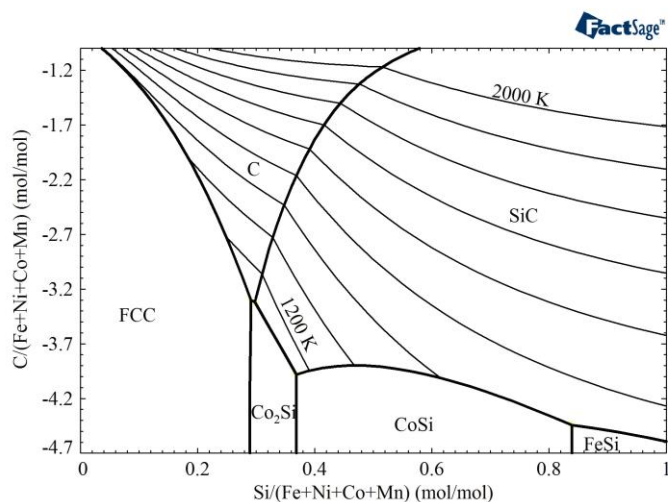


Рис. 5. Проекция поверхности ликвидуса системы Fe-Ni-Co-Mn-Si-C для случая, когда в составе металлического расплава присутствуют равные количества атомов железа, никеля, кобальта и марганца

В дополнение к построению фазовых диаграмм с помощью блока «Equilib» программного пакета «FactSage» осуществлено моделирование процесса выделения фаз при кристаллизации металлического расплава (модель Scheil-Gulliver) для изученных систем. На рис. 6 представлены некоторые результаты такого моделирования для систем Fe (1 моль)-Si (0.6 моль)-C (0.1 моль) и Fe (0.25 моль)-Ni (0.25 моль)-Co (0.25 моль)-Mn (0.25 моль)-Si (0.6 моль)-C (0.1 моль).

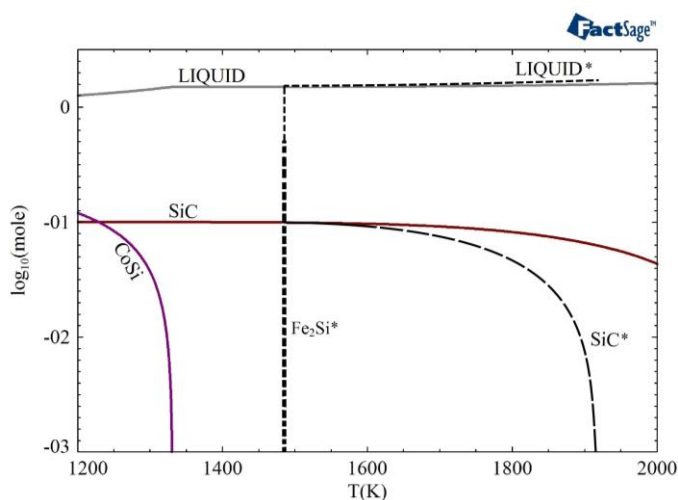


Рис. 6. Результаты моделирования процесса выделения фаз при кристаллизации металлического расплава (модель Scheil-Gulliver) для систем Fe (1 моль)-Si (0.6 моль)-C (0.1 моль) (фазы, отмеченные \*) и Fe (0.25 моль)-Ni (0.25 моль)-Co (0.25 моль)-Mn (0.25 моль)-Si (0.6 моль)-C (0.1 моль)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

С целью определения возможности выращивания кристаллов карбида кремния из сложного расплава, включающего железо, никель, кобальт, марганец, кремний и углерод, проведено экспериментальное исследование. Расплав, полученный из смеси гранул лигатур, включающих Fe-Ni-Co-Mn-Si и Fe-Ni-Co-Mn-C, медленно охлаждался в печи сопротивления с 1473 °K до 1073 °K в течение 5 часов. Электронномикроскопическое (посредством растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6460LV, оснащенного спектрометром энергетической дисперсии фирмы «Oxford Instruments») для проведения качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа) исследование структуры и состава изломов, полученных при разрушении слитка, а также микрошлифа слитка позволило обнаружить кристаллы SiC. Некоторые примеры обнаруженных кристаллов представлены на микрофотографиях (рис. 7-10). Состав (мас. %) матрицы, определённый посредством рентгеноспектрального микроанализа, колеблется в пределах: 7-14 C, 20-26 Si, ~17-18 Mn, ~16 Fe, ~15-16 Co, ~16-17 Ni).

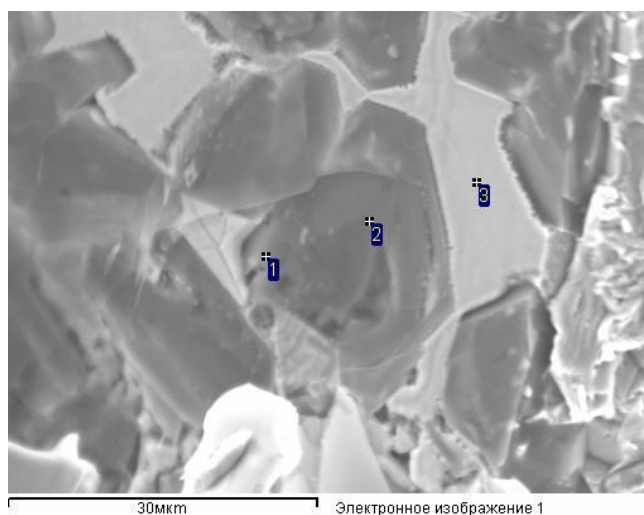


Рис. 7. Кристалл SiC, образовавшийся из расплава системы Fe-Ni-Co-Mn-Si-C. Результат исследования микрошлифа. Точки 1 и 2 – кристалл SiC. Точка 3 – матричный металлический сплав

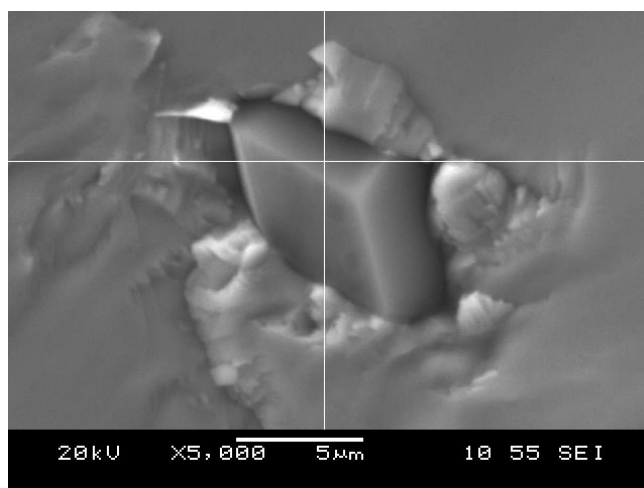


Рис. 8. Кристалл SiC, образовавшийся из расплава системы Fe-Ni-Co-Mn-Si-C. Результат исследования излома

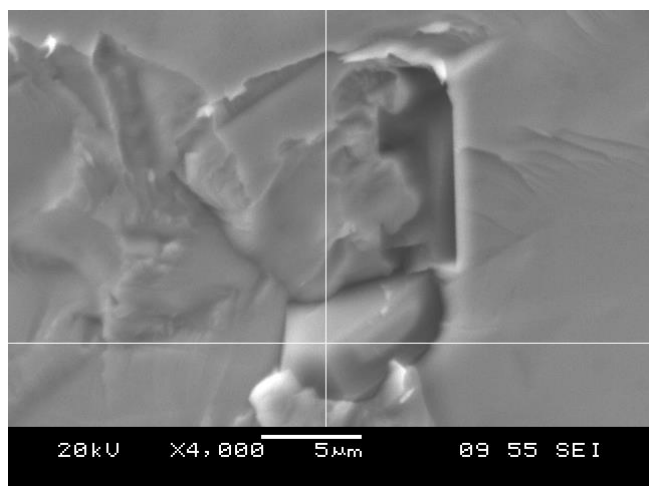


Рис. 9. Кристалл SiC, образовавшийся из расплава системы Fe-Ni-Co-Mn-Si-C. Результат исследования излома

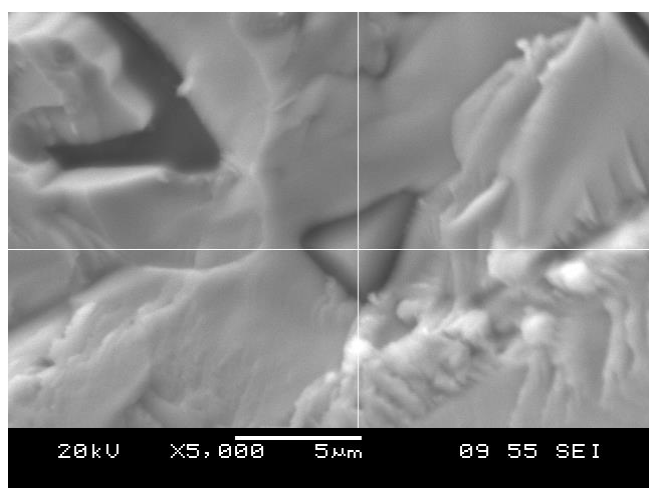


Рис. 10. Кристалл SiC, образовавшийся из расплава системы Fe-Ni-Co-Mn-Si-C. Результат исследования излома

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление результатов термодинамического моделирования для систем, включающих четыре элемента (рис. 2-4), с результатами моделирования трёхкомпонентных систем (в частности, системы Fe-Si-C, рис. 1), демонстрирует, что во всех изученных случаях добавление четвертого элемента приводит к следующим эффектам:

- 1) температурный предел сосуществования металла и карбида кремния смещается вниз на 150-200 °K (максимальный эффект у системы с кобальтом);
- 2) твёрдыми металлическими фазами, находящимися в равновесии с жидким металлом при определённых сочетаниях концентраций компонентов, являются сплавы с ГЦК кристаллической решёткой (а в системе с марганцем с расплавом сосуществует ещё и твёрдый раствор на основе бета-Mn);
- 3) среди других твёрдых фаз, находящихся в равновесии с металлическим расплавом, появляются различные силициды добавленных элементов;
- 4) снижение температурного предела сопровождается понижением растворимости углерода в металлическом расплаве.

Учитывая результаты моделирования четырёхэлементных систем, можно было предположить, что для дальнейшего понижения температуры плавления металлического расплава, в ходе реакций компонентов которого может образовываться твёрдый карбид кремния, необходимо использовать металл более сложного состава.

Результаты моделирования системы Fe-Ni-Co-Mn-Si-C, которые в виде диаграммы представлены на рис. 5, подтверждают это предположение. Минимальная температура в этом случае (для равных содержаний железа, никеля, кобальта и марганца) составляет величину ниже 1200 °K.

Представленные в форме поверхностей ликвидуса результаты расчёта позволяют не только определить состав металла с минимальной температурой плавления, но и наглядно представить диапазоны концентраций и температур, для которых равновесным продуктом взаимодействия компонентов металла будет являться карбид кремния.

Полученные в процессе работы результаты экспериментального исследования как минимум на качественном уровне подтверждают результаты проведённого термодинамического анализа. Формирование кристаллов карбида кремния в объёме металлического расплава, температура которого была 1473 °K и ниже, свидетельствует о возможности существенного снижения температуры проведения процесса выращивания кристаллов из металлического расплава и, следовательно, о перспективности работ в этом направлении.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе термодинамического моделирования и экспериментального исследования изучены условия синтеза кристаллов карбида кремния в металлических расплавах сложного состава. Построенные фазовые диаграммы, представленные в форме поверхностей ликвидуса, позволяют не только определить состав металла с минимальной температурой плавления, но и наглядно представить диапазоны концентраций и температур, для которых равновесным продуктом взаимодействия компонентов металла будет являться карбид кремния. Результаты проведённых экспериментальных работ также подтверждают возможность выращивания кристаллов карбида кремния в объёме комплексных металлических расплавов при относительно низких температурах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kawanishi S. Equilibrium phase relationship between SiC and a liquid phase in the Fe-Si-C system at 1523-1723 K / S. Kawanishi, T. Yoshikawa, T. Tanaka // *Materials Transactions*. – 2009. – Vol. 50, is. 4. – P. 806-813.
2. Yoshikawa T. Fundamental study for solvent growth of silicon carbide utilizing Fe-Si melt / T. Yoshikawa, S. Kawanishi, T. Tanaka // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2009. – vol. 165.
3. Трофимов Е.А. Термодинамический анализ условий образования карбида кремния в металлическом расплаве системы Fe-Ni-Si-C / Е.А. Трофимов, С.В. Рябошук // *Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XV Международной научной конференции (Челябинск, 24-27 сентября 2013 г.)*. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. – С. 42-43.



4. Трофимов Е.А. Термодинамический анализ условий образования карбида кремния в сложных металлических расплавах / Е.А. Трофимов, А.Ю. Габова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2015. – Т. 15, №. 1. – С. 5-10.

5. Olesinski R.W. C-Si (Carbon-Silicon) / R.W. Olesinski, G.J. Abbaschian // Binary Alloy Phase Diagrams. – Ohio: ASM International, Materials Park, 1990. – Vol. 1. – P. 882-883.

6. Scace R.I. The Si-C and Ge-C phase diagrams / R.I. Scace, G.A. Slack // Silicon Carbide, High Temperature Semiconductor: proceedings of the Conference. – Boston, 1960. – P. 24-28.

7. Ishida K. Co-Si (Cobalt-Silicon) / K. Ishida, T. Nishizawa // Binary Alloy Phase Diagrams. – Ohio: ASM International, Materials Park, 1990. – Vol. 2. – P. 1235-1239.

8. Davies R.H. Application of MTDATA to the Modeling of Multicomponent Equilibria / R.H. Davies, A.T. Dinsdale, T.G. Chart, T.I. Barry, M.H. Rand // High Temperature Science. – 1988. – Vol. 26. – P. 251-262.

9. Gokhale A.B. Mn-Si (Manganese-Silicon) / A.B. Gokhale, G.J. Abbaschian // Binary Alloy Phase Diagrams. – Ohio: ASM International, Materials Park, 1990. – Vol. 3. – P. 2602-2604.

10. Kaufman L. Coupled phase diagrams and thermochemical data for transition metal binary systems-III / L. Kaufman // Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. – 1978. – Vol. 2. – P. 117-146.

11. Gokcen N.A. Mn-Ni (Manganese-Nickel) / N.A. Gokcen // Binary Alloy Phase Diagrams. – Ohio: ASM International, Materials Park, 1990. – Vol. 3. – P. 2580-2583.

# The Study of Conditions for the Silicon Carbide Crystals Formation in the Complex Composition Metal Melt

Trofimov E.A., Samoylova O.V.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian Federation

[tea7510@gmail.com](mailto:tea7510@gmail.com)

**Abstract.** The results of thermodynamic modeling and experimental studies are presented in this article. The aim of this work is to determine the conditions of synthesis of silicon carbide crystals in the complex composition metal melts. The "FactSage" software was used for thermodynamic modeling. The phase diagrams, in the form of liquidus surfaces, allow to determine the metal composition with minimum melting temperature and present the ranges of concentrations and temperatures for which equilibrium product of the interaction between the components of the metal melt will be silicon carbide. The results of experi-

mental research confirmed the possibility of growing silicon carbide crystals in the complex metal melts at low temperatures. The study results of the obtained sample of complex alloy (by the scanning electron microscope JEOL JSM-6460LV with a spectrometer of energy dispersion of firm "Oxford Instruments" for performing qualitative and quantitative microprobe analysis) helped to reveal the crystals corresponding to SiC composition.

**Keywords:** silicon carbide, metal melt, thermodynamic modeling, experimental research.



# Белизна минералов керамики и клинкера белого портландцемента в зависимости от содержания хромофоров

Яценко Н.Д., Голованова С.П.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
г. Новочеркасск, Российская Федерация  
[natyacen@yandex.ru](mailto:natyacen@yandex.ru)

**Аннотация.** В современном строительстве большое внимание уделяется созданию архитектурно-выразительных комплексов как жилищных, так и промышленных. Реализация концепций современного архитектурного дизайна обуславливает необходимость применения эффективных конструктивных отделочных и декоративных строительных материалов. К ним относятся стеновые и облицовочные керамические материалы, белый и цветной цемент. В статье рассматривается сущность белизны и цветности керамики и белого портландцемента, представлены теоретические основы белизны и окрашивания в зависимости от их фазо-минерального состава, структуры, содержания хромофоров Fe, Mn и Ti, условий обжига и охлаждения (окислительных и восстановительных). В результате исследований с применением комплекса физико-химических методов получены данные фазового и кристаллохимического состояния ионов хромофоров в силикатах и алюминатах кальция, в алюмосиликатных минералах и стеклофазе.

**Ключевые слова:** керамика, белый портландцемент, ионы-хромофоры, белизна, окрашивание, физико-химические методы исследования, силикаты, алюминаты и алюмосиликаты кальция.

## ВВЕДЕНИЕ

При получении белого портландцемента (БПЦ) и керамических материалов и изделий (фаянсовая и фарфоровая посуда, декоративно-художественные изделия, санитарно-технические и облицовочные строительные материалы и изделия) одними из основных эстетических и функциональных свойств является белизна [1]. Она зависит от содержания окрашивающих примесей – оксидов и соединений железа, марганца, титана и других. Природные сырьевые материалы всегда содержат в том или ином количестве эти примеси: глины – примеси соединений Fe и Ti, карбонатные породы – Fe и Mn, обуславливающие окраску керамики и портландцементного клинкера [2].

Для получения керамики и БПЦ с наибольшей белизной необходимо применение эффективных способов нейтрализации окрашивающего влияния как при наличии отдельных хромофоров Fe, Mn, Ti, так и особенно при их совместном содержании. Известно, что даже бесцветные соединения указанных хромофоров, например, TiO<sub>2</sub> в присутствии других хромофорных примесей усиливают их окраску [3, 4].

## Влияние оксидов Fe, Mn и Ti на белизну и окрашивание силикатов кальция

Главными преобладающими по количеству минералами цементного клинкера, составляющими до 80 % в БПЦ,

являются 3CaO·SiO<sub>2</sub> (C<sub>3</sub>S) и β-2CaO·SiO<sub>2</sub> (β-C<sub>2</sub>S), а β-CaSiO<sub>3</sub> (β-CS) – волластонит встречается в природном сырье и образуется в различных керамических материалах и изделиях. Нами были проведены исследования коэффициента отражения (КО) этих минералов в зависимости от содержания красящих оксидов, условий обжига и охлаждения различными методами. Результаты фотометрических исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

КО минералов в зависимости от содержания оксидов Fe, Mn, Ti

Минералы	КО, %по МС-20, при содержании оксидов, мас. %*					
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	КО	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	КО	TiO <sub>2</sub>	КО
3CaO·SiO <sub>2</sub> (C <sub>3</sub> S)	-	92,5	-	92,5	-	92,5
	0,25	62,7	0,25	81,9	0,25	92,4
	0,50	59,8	0,50	78,9	-	90,3
	1,00	50,90	1,00	54,7	1,00	88,2
β-2CaO·SiO <sub>2</sub> (β-C <sub>2</sub> S)	2,00	38,6	2,00	52,1	2,00	85,2
	-	92,2	-	92,2	-	92,2
	0,25	82,8	0,25	81,4	0,25	9,21
	0,50	74,9	0,50	65,6	-	90,2
β-Ca <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>9</sub> , (β-CS)	1,00	61,7	1,00	63,3	1,00	88,3
	2,00	48,0	2,00	55,1	2,00	85,3
	-	90,5	-	91,8	-	91,8
	0,25	84,7	0,25	85,0	0,25	91,0
β-Ca <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>9</sub> , (β-CS)	0,50	67,2	0,50	80,0	0,5	90,0
	1,00	32,6	1,00	67,5	1,00	90,0
	2,0	25,4	2,0	58,3	2,0	88,4

Анализ приведенных данных показывает, что в наибольшей степени снижают КО минералов оксиды железа. Даже при минимальном содержании Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,25%, причем в большей степени у C<sub>3</sub>S. Окрашивающее влияние Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на силикатные минералы в меньшей степени, чем Fe<sub>2</sub>O. Оксид титана незначительно снижает КО силикатов Ca даже при повышенном содержании TiO<sub>2</sub> = 2%.

Это можно объяснить тем, что TiO<sub>2</sub>, содержащий ион Ti<sup>4+</sup>, не имеет на d-оболочке электронов и в связи с этим не является хромофором; при изоморфном замещении в силикатах и изовалентных ионов Si<sup>4+</sup> по схеме: Si<sup>4+</sup> ↔ Ti<sup>4+</sup>.

Интенсивное окрашивание C<sub>3</sub>S, β-C<sub>2</sub>S и β-C<sub>3</sub>S<sub>3</sub>O<sub>9</sub> оксидами Fe следует объяснить особенностями их кристаллических решеток и в связи с этими различиями кристалло-

химических превращений при изоморфных замещениях, образованием твердых растворов с хромофорными ионами и железосодержащих кластеров, резко повышающих светопоглощение [5, 6].

С учетом структуры нами был установлен механизм изоморфных замещений при образовании железосодержащих твердых растворов  $C_3S:F$ ,  $\beta-C_2S:F$  и  $\beta-Ca_3Si_3O_9:F$ . Для этого был применен избирательный к Fe-содержащим соединениям метод мессбауэровской ЯГР – спектроскопии (табл. 2).

Таблица 2

Параметры ЯГР спектров  $C_3S:F$ ;  $C_2S:F$ ;  $C_3S_3O_9:F$  с различным содержанием  $Fe_2O_3$

Количество $Fe_2O_3$ , в системе, %	Кристаллографическая позиция Fe	Параметры ЯГРС, мм/с				КЧ	Доля иона, Fe, %
		$\delta$	$\Delta E_Q$	$\Gamma$	Нэф, кЭ		
0,5 $C_3S:F$	$Fe^{3+}$ (I)	0,34	0,34	0,99	-	4	Тв. раствор $C_3S:F$
	$Fe^{3+}$ (II)	0,46	1,95	0,96	-	6; 7	
	$Fe^{2+}$ (III)	1,03	1,54	0,48	-	6; 7	
2,0 $C_3S:F$	$Fe^{3+}$ (I)	0,35	0,35	0,99	-	4	Тв. раствор $C_3S:F$
	$Fe^{3+}$ (II)	0,46	1,97	0,97	-	6; 7	
	$Fe^{3+}$ (III)	1,03	1,53	0,45	-	6; 7	
	$Fe^{3+}$ (IV)	0,45	0,68	0,34	434	4	$C_2F$
	$Fe^{3+}$ (V)	0,65	-0,59	0,33	513	6	
0,5 $\beta-C_2S:F$	$Fe^{3+}$ (I)	0,55	0,83	0,51	-	6; 8	Тв. раствор $\beta-C_2S:F$
	$Fe^{3+}$ (II)	0,52	1,36	0,52	-	6; 8	
2,0 $\beta-C_2S:F$	$Fe^{3+}$ (I)	0,55	0,83	0,51 (2)	-	6; 8	Тв. раствор $\beta-S:F$
	$Fe^{3+}$ (II)	0,52	1,36	0,52	-	6; 8	
	$Fe^{3+}$ (IV)	0,73	+0,37	0,50	536	6	
0,5 $C_3S_3O_9:F$	Дублет 1	0,38	0,89	0,55	-	6	70,36
	Дублет 2	0,25	1,59	0,54	-	6	29,64
2,0 $C_3S_3O_9:F$	Дублет 1	0,37	0,88	0,54	-	6	70,36
	Дублет 2	0,25	1,59	0,54	-	6	29,64

В результате исследований с применением метода ЯГР-спектроскопии установлены механизмы формирования железосодержащих твердых растворов  $C_3S:F$ ,  $\beta-C_2S:F$  и  $C_3S_3O_9:F$  с учетом их структуры и зависимости от содержания  $Fe_2O_3$ , объясняющие резкое снижение их КО даже при минимальном количестве  $Fe_2O_3=0,25\%$ , особенно  $C_3S:F$ , в котором происходят изоморфные гетеровалентные замещения в катионной и анионной подрешетках кристаллохимически разнородных ионов  $Ca^{2+}$  и  $Si^{4+}$  на  $Fe^{3+}$ . Это недопустимо при получении БПЦ, т.к. именно  $C_3S$  и  $\beta-C_2S$  являются главными минералами клинкера и составляют основу его фазового состава, предопределяющего белизну, прочность и другие строительно-технические свойства.

В результате исследований с применением метода ЯГР-спектроскопии установлены механизмы формирования железосодержащих твердых растворов  $C_3S:F$ ,  $\beta-C_2S:F$  и  $C_3S_3O_9:F$  с учетом их структуры и зависимости от содержания  $Fe_2O_3$ , объясняющие резкое снижение их КО даже при минимальном количестве  $Fe_2O_3=0,25\%$ , особенно  $C_3S:F$ , в котором происходят изоморфные гетеровалентные замещения в катионной и анионной подрешетках

кристаллохимически разнородных ионов  $Ca^{2+}$  и  $Si^{4+}$  на  $Fe^{3+}$ . Это недопустимо при получении БПЦ, т.к. именно  $C_3S$  и  $\beta-C_2S$  являются главными минералами клинкера и составляют основу его фазового состава, предопределяющего белизну, прочность и другие строительно-технические свойства.

Выявлено влияние оксидов марганца на белизну силикатов  $C_3S$  и  $\beta-C_2S$ . По данным авторов [8], основные типы замещений в  $C_3S$  при наличии Mn:  $Si^{4+}+Ca^{2+} \rightarrow Mn^{4+}+Mn^{2+}$ .

По нашему мнению [9], одинаковое и несколько меньше снижение КО образцов  $C_3S:Mn$  и  $\beta-C_2S:Mn$  с содержанием  $Mn_2O_3$  от 0,05 до 2,0% по сравнению с аналогичными железосодержащими фазами при окислительном обжиге и охлаждении на воздухе является следствием замещения в  $C_3S$ :  $Si^{4+}+Ca^{2+} \rightarrow Mn^{4+}+Mn^{2+}$ .

Для установления валентного и кристаллохимического состояния ионов марганца и их влияния на белизну и цвет  $C_3S$  и  $\beta-C_2S$  проведено исследование структуры и кристаллохимического состояния Mn в твердых растворах  $C_3S:Mn$  и  $\beta-C_2S:Mn$  методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), являющегося прецизионным к Mn-содержащим фазам.

Результаты исследований и расчеты их параметров позволили установить следующее. Во всех образцах  $C_3S$  и  $\beta-C_2S$  обнаружены ионы  $Mn^{2+}$ , количество которых в окислительных условиях не превышает 5-7% от массы  $Mn_2O_3$ . Другие ионы, в частности  $Mn^{4+}$  не обнаружены, так как в этих условиях анализа методом ЭПР не определяются ни  $Mn^{4+}$ , ни  $Mn^{3+}$  (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики марганецсодержащих твердых растворов  $C_3S$ ,  $\beta-C_2S$  по данным ЭПР

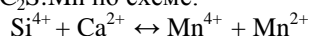
Минералы	Условия синтеза		Характеристики спектра ЭПР		Концентрация парамагнитных центров		Доля $Mn^{2+}$ , % $Mn_{сум}$
	обжиг	охлаждение	g-фактор	$A \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$	Спин/г	$Mn^{2+}$ , %	
$C_3S$ : Mn	окислительный	на воздухе	2,0092	79,3	$1,624 \cdot 10^{17}$	0,0014	2,8
	окислительный	в воде	2,0090	80,2	$0,743 \cdot 10^{17}$	0,0006	1,2
	восстановительный	в восстановительной среде	2,0067	82,3	$8,958 \cdot 10^{17}$	0,0081	16,2
			2,0067	82,3	$2,390 \cdot 10^{17}$	0,0021	4,2
$\beta-C_2S$ : Mn	окислительный	на воздухе	2,0085	80,7	$3,126 \cdot 10^{17}$	0,0029	5,7
	окислительный	в воде	2,0098	80,9	$4,231 \cdot 10^{17}$	0,0039	7,7
	восстановительный	в восстановительной среде	2,007	81,4	$6,924 \cdot 10^{17}$	0,0063	12,6
			2,0085	80,6	$8,412 \cdot 10^{17}$	0,0076	15,2

Все спектры  $Mn^{2+}$  в исследуемых образцах характеризуются шестикомпонентными линиями сверхтонкой структуры (СТС), появляющиеся за счет взаимодействия неспаренных d-электронов с ядром  $Mn^{55}$  (ядерный спин 5/2). СТС обнаруживается, как правило, во всех изучаемых минералах вследствие того, что основное состояние  $Mn^{2+}-^6S_{5/2}$  является высокоспиновым. Тонкая структура (ТС) спектров  $Mn^{2+}$  связана с расщеплением основного состояния в кристаллических полях различной симметрии [10].

Зависимость КО фаз от содержания Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Наименование фаз	Сокращенная формула	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	КО, % по МС-20
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	-	92,2
		0,5	89,6
		1,0	87,9
		2,0	72,8
Муллит	3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> (A <sub>3</sub> S <sub>2</sub> )	-	92,8
		0,50	89,0
		1,00	83,1
		2,0	75,2
Анортит	CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> (C <sub>AS</sub> <sub>2</sub> )	-	90,1
		0,5	37,0
		1,0	25,7
		2,0	20,6
Метакаолинит	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> (A <sub>S</sub> <sub>2</sub> )	-	91,8
		0,5	64,7
		3,0	36,7
		3,0	36,7
Стеклофаза клинкера БЦП	CaO-68,0; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -22,0; SiO <sub>2</sub> -10,0;	-	91,7
		0,5	85,7
		1,0	80,6
		3,0	65,9
Стеклофаза фарфора	SiO <sub>2</sub> -68,0; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -23,0; K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O-9,0;	-	91,1
		0,5	88,0
		1,0	85,4
		3,0	79,8

Как показывают результаты исследований, коэффициент отражения (КО) образцов C<sub>3</sub>S:Mn и β-C<sub>2</sub>S:Mn и их цвет зависят от содержания Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, окислительно – восстановительных условий обжига и способа охлаждения (см. табл. 3). Это хорошо согласуется с характером изовалентного изоморфизма, образования твердых растворов C<sub>3</sub>S:Mn и β-C<sub>2</sub>S:Mn по схеме:



При восстановительном обжиге образцов C<sub>3</sub>S:Mn и β-C<sub>2</sub>S:Mn и охлаждении в восстановительной среде (в печи), их КО и цвет снижаются неодинаково: у C<sub>3</sub>S:Mn в большей степени, чем у β-C<sub>2</sub>S:Mn. При закалке в воде образцы восстановительного обжига C<sub>3</sub>S:Mn уже при содержании Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,25 имеет бирюзовый цвет, а при увеличении до 0,5% он становится фиолетовым, достигая сине – черного цвета с содержанием Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 2,0 %. Марганецсодержащий белит β-C<sub>2</sub>S:Mn сохраняет белый цвет даже при вводе Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 1,0 %. Только при максимальном количестве Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 2,0 % он становится серым. Такой характер влияния восстановительной среды на КО и белизну C<sub>3</sub>S:Mn и β-C<sub>2</sub>S:Mn следует объяснить полным восстановлением Mn<sup>4+</sup> до Mn<sup>2+</sup> и замещением в β-C<sub>2</sub>S:Mn только в катионной подрешетке Ca<sup>2+</sup> ↔ Mn<sup>2+</sup>.

В C<sub>3</sub>S:Mn имеет место неполное восстановление Mn<sup>4+</sup> до Mn<sup>2+</sup> и, вероятно, частично до Mn<sup>3+</sup>, что обуславливает четырехвалентное замещение в анионной подрешетке Si<sup>4+</sup> на Mn<sup>4+</sup> и Mn<sup>3+</sup>, а в катионной Ca<sup>2+</sup> на Mn<sup>2+</sup>.

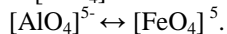
Установленные зависимости КО и белизны силикатов Ca от содержания оксидов Mn, условий обжига и охлаждения весьма важны при разработке способов управления цветом различных силикатных материалов, в том числе керамики, стекла и вяжущих материалов.

#### БЕЛИЗНА И ОКРАШИВАНИЕ АЛЮМИНАТНЫХ, АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ МИНЕРАЛОВ И СТЕКЛОФАЗ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА, ФАЗОВОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ

Исследования изменений коэффициента отражения (КО) 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и стеклофазы, входящие в состав клинкера БЦП, а также метакаолинита Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>, муллита 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>, анортита CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub> и стеклофазы, характерных фаз для фарфоро-фаянсовых и других керамических материалов и изделий в зависимости от содержания FeO<sub>3</sub>, а также от структуры этих фаз показали, что алюминатные фазы цементного клинкера 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и стеклофаза БЦП наименее окрашиваемые по сравнению с C<sub>3</sub>S:F и β-C<sub>2</sub>S:F. Только при повышении содержания Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ 2,0 % проявляется большее снижение КО, что обусловлено кристаллизацией самостоятельно железосодержащей фазы – алюмоферрита Ca состава C<sub>4</sub>AF [10].

Результаты фотометрических определений КО приведены в табл. 4.

Такой характер зависимости окрашивающей способности алюминатных фаз клинкера БЦП C<sub>3</sub>A: F и стеклофазы обусловлен изовалентным замещением ионов Al<sup>3+</sup> в анионной подрешетке C<sub>3</sub>A – кольцевой гексагональной группировки тетраэдров [AlO<sub>4</sub>]<sup>5-</sup> на ионы Fe<sup>3+</sup>



Аналогичные замещения ионов Al<sup>3+</sup> на Fe<sup>3+</sup> в виде тетраэдрических комплексов происходят и в структурной сетке стеклофазы клинкера.

Общеизвестно, что в керамике, например в фарфоре, главными фазами являются муллит, β-кварц, кристобалит, корунд и алюмосиликатная стеклофаза. Другие виды керамики – фаянс, керамическая плитка, кирпич, кроме этих фаз могут содержать метакаолинит – дегидратированное глинистое вещество после термической обработки глины, анортит (при наличии в массе CaO) или β-воластонит, гематит α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обуславливающий красную, красно-коричневую окраску.

Закономерность изменения окрашивания керамики в общем принципе аналогична рассмотренным выше для минералов – силикатов Ca, алюминатов и алюмосиликатов и образования в них структур Fe-содержащих кластеров, вызывающих сильное поглощение и резкое снижение КО.

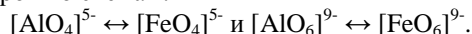
КО алюмосиликатных фаз муллита 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub> и стеклофазы состава, характерной для фарфора, при увеличении количества Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 2,0 и даже до 3,0 % (в стеклофаза) снижается незначительно (см. табл. 4).

КО у метакаолинита Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub> при содержании 0,5 % Fe<sub>2</sub>O и анортита CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub> снижается соответственно на 27,1 и 53,1 %. Такой характер зависимости КО указанных фаз может быть объяснен различным изоморфизмом образования соответствующих железосодержащих твердых растворов и кристаллохимическим состоянием ионов Fe<sup>3+</sup> с учетом структур этих фаз.

Так, при образовании твердого раствора муллита 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>:Fe наиболее вероятны изовалентные заме-



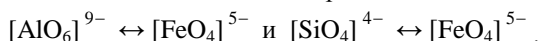
шения ионов  $Al^{3+}$  на  $Fe^{3+}$  в его структуре в виде тетраэдров и октаэдров по схемам:



Такой характер изоморфизма образования твердого раствора не приводит к деформации кристаллической решетки и дефекту электронной структуры муллита и не вызывает резкого светопоглощения и снижения КО  $Al_2O_3 \cdot F$

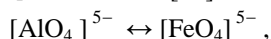
Аналогичный аспект влияния  $Fe_2O_3$  на КО стеклофазы фарфора, образовавшейся при охлаждении расплава, в котором ион  $Al^{3+}$  содержится в виде тетраэдра  $[AlO_4]^{5-}$  и замещение его происходит на  $[FeO_4]^{5-}$ .

Иная зависимость повышенного снижения КО метакаолинита  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  от содержания  $Fe_2O_3$  обусловлена, по нашему мнению, тем, что в его структуре возможны замещения – изовалентные и гетеровалентные:



Последние возможны в связи с тем, что слоистая структура метакаолинита, состоящая из слоев  $[Al(O,OH)_6]$  и  $[SiO_4]$  обуславливает уменьшенную силу связи Si-O.

В структуре стеклофаз алюмосиликатного состава фарфора и других видов керамики, в том числе керамического кирпича, в окислительных условиях обжига и охлаждения ионы  $Fe^{3+}$  замещают изовалентные ионы  $Al^{3+}$  в тетраэдрах  $[AlO_4]^{5-}$  по схеме [11]:

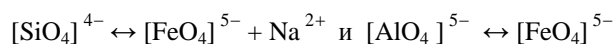


что не вызывает сильного светопоглощения и снижения КО.

Весьма важным являются подобные исследования для алюмосиликата кальция – анортита  $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ , одного из важных кристаллических фаз в структуре различных керамических материалов и изделий на основе глин с повышенным содержанием примесей или специально вводимых добавок карбоната  $CaCO_3$  для улучшения спекания и повышения прочности.

Приведенные в табл. 4 значения КО показывают, что анортит сильно восприимчив к окрашиванию оксидом  $Fe_2O_3$ , вероятно, и к другим хромоформным примесям, даже при низком содержании  $Fe_2O_3 = 0,50\%$ , что объясняется особенностями структуры его кристаллической решетки.

По нашему мнению, при наличии оксидов  $Fe_2O_3$  возможны изоморфные замещения: в пустотах кристаллической решетки  $Ca^{2+} Fe^{3+} \square$ , а также в тетраэдрах  $SiO_4$  и  $AlO_4$  по схемам:



Таким образом, комплекс весьма разнородных замещений разнотипных ионов как  $Si^{4+}$  и  $Fe^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  (радиусы которых 0,39; 0,67 и 1,02 Å соответственно -  $Si^{4+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ) наряду с изовалентным замещением  $Al^{3+} \leftrightarrow Fe^{3+}$  в ограниченном нанобъеме имеет место и гетеровалентное  $Si^{4+} \leftrightarrow Fe^{3+} \square$ , что обуславливает образование Fe-содержащего кластера, вызывающего сильное светопоглощение и резкое снижение КО.

Исследования методом мессбауэровской спектроскопии (ЯГРС) влияния оксидов  $Fe_2O_3$  на фазовое и кристаллохимическое состояние ионов  $Fe^{3+}$  с учетом особенности структуры анортита подтвердили изложенные выше представления о механизме образования его твердого железосодержащего раствора (рис. 1).

Анализ спектров ЯГРС (рис. 1) и их параметров подтверждают наличие в образцах анортита как с 1,0, так и с 2,0 %  $Fe_2O_3$  4 неэквивалентных компонент ионов  $Fe^{3+}$  в их структуре (табл. 5). Это секстеты с параметрами ЯГРС, включающих напряженность магнитного поля  $H_{эфф} = 510,8; 512,0$  кЭ, свидетельствующие о наличии магнитоупорядоченной фазы –  $\alpha-Fe_2O_3$ . Это доказывает, что даже при содержании  $Fe_2O_3 = 1,0\%$  ионы железа  $Fe^{3+}$  полностью не вошли в структуру анортита, и растворимость  $Fe_2O_3$  в анортите составляет 0,75-0,78 % по массе.

Таблица 5

Параметры ЯГРС и состояния Fe

Ко-личество $Fe_2O_3$ , %	Вид спектра	Параметры ЯГРС				КЧ Fe	Доля иона Fe, %
		мм/с			$H_{эфф}$ , кЭ		
		$\delta$	$\Delta E_Q$	$\Gamma$			
0,5	Секстет	0,25	-0,12	0,47	510,8	6	25,34
	Дублет1	0,24	0,66	0,55	-	10( $Ca^{2+}$ )	10,68
	Дублет2	0,42	1,01	0,55	-	4( $Si^{4+}$ )	16,98
	Дублет3	0,12	0,97	0,78	-	4( $Al^{3+}$ )	30,78
3,0	Секстет	0,33	-0,13	0,52	512,0	6	21,79
	Дублет1	0,18	1,28	0,77	-	4( $Al^{3+}$ )	36,44
	Дублет2	0,42	1,11	0,57	-	4( $Si^{4+}$ )	19,73
	Дублет3	0,26	0,66	0,53	-	10( $Ca^{2+}$ )	22,04

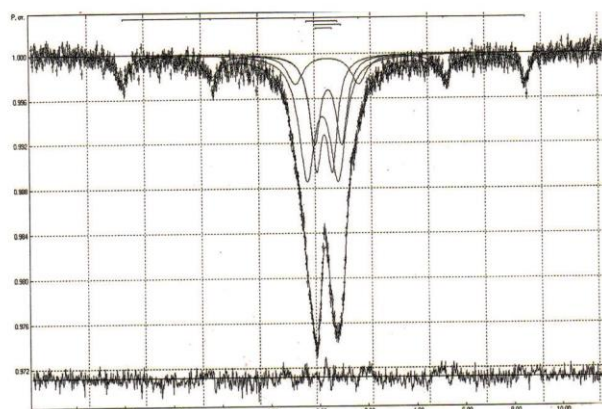
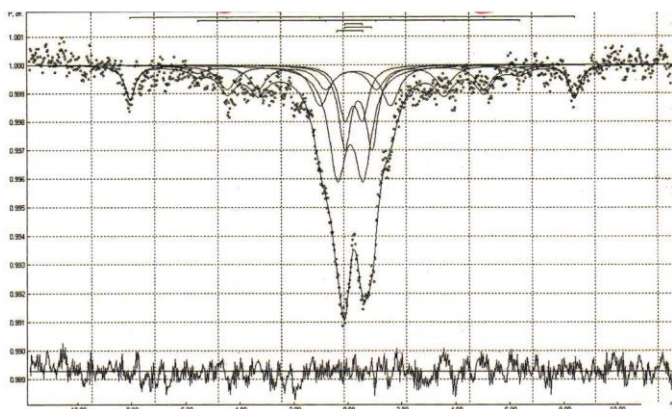


Рис. 1 ЯГРС-спектры анортита  $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ , содержащего  $Fe_2O_3$ , % по массе: а – 1,0 и б – 2,0



Кроме того по параметрам спектров ЯГРС (см. табл. 5) идентифицированы еще 3 неэквивалентных позиции ионов  $Fe^{3+}$ , представленных дублетами 1, 2 и 3, изоморфно заместивших в кристаллической решетке анортита ионы  $Ca^{2+}$ ,  $Si^{4+}$ ,  $Al^{3+}$ , образовав твердый железосодержащий раствор состава:  $[Ca_{1-x}Fe_xAl_{2-y}Fe_ySi_{2-z}Fe_z]O_8$ .

Таким образом, в результате исследований установлены механизмы формирования железо- и марганецсодержащих твердых растворов силикатов кальция с учетом их структуры.

Выявлена зависимость окрашивания анортита оксидом  $Fe_2O_3$  и установлено: резкое снижение КО минерала даже при низком содержании  $Fe_2O_3 = 0,25\%$ ; сильная восприимчивость к окрашиванию анортита оксидом  $Fe_2O_3$  обусловлена образованием железосодержащих кластеров в нанобъеме кристаллической решетки вследствие изоморфных замещений в тетраэдрах  $[SiO_4]^{4-}$  и  $[AlO_4]^{5-}$  ионов  $Si^{4+}$  и  $Al^{3+}$  и ионов  $Ca^{2+}$  в пустотах решетки  $Fe^{3+}$ , а также наличием свободного  $\alpha-Fe_2O_3$ , не вошедшего в структуру твердого раствора анортита; предельная растворимость  $Fe_2O_3$  в структуре анортита составляет 0,75-0,78 % по массе.

Следовательно, с позиции осветления окраски керамики образование железосодержащих твердых растворов волластонита и анортита с одной стороны, положительно. Однако, при повышенном количестве  $Fe_2O_3$ , эффективность нейтрализации окраски значительно уменьшается с наличием свободного  $\alpha-Fe_2O_3$  при ограниченном пределе растворимости в структурах волластонита и анортита, а также вследствие гетерогенного характера образования твердых растворов с  $Fe^{3+}$  и их кластеров.

Для технологии высококачественного БПЦ и керамики светлых тонов исключительно актуальна разработка эффективных способов обжига и отбеливания, предотвращающих их окрашивание, прежде всего оксидами железа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зубехин А.П. Белый портландцемент, его роль в архитектурно-строительном дизайне, производство и применение / А.П. Зубехин, С.П. Голованова // Цемент и его применение. – 2010. – № 3. – С. 35-37.
2. Зубехин А.П. Спектроскопические и кристаллохимические основы белизны и цветности силикатных материалов / А.П. Зубехин, С.П. Голованова, Н.Д. Яценко, А.С. Деева, В.Н. Боляк // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. – № 5. – С. 40-43.
3. Бойкова А.И. Физико-химические свойства и кристаллохимические особенности фаз портландцементного клинкера: автореф. дис. ... докт. хим. наук. – Л.: 1984. – 40 с.
4. Пашенко А.А. Теория цемента. – К.: Будевельник, 1991. – 168 с.
5. Лось М.М. Кристаллография и минералогия: Учеб. пособие. – Новочеркасск: НПИ, 1986. – 188 с.
6. Бойкова А.И. Твердые растворы цементных минералов. – Л.: Наука, 1974. – 100 с.
7. Горшков В.С. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений: Учебник для вузов / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, Н.Ф. Федоров. – М.: Высш.шк., 1988. – 400 с.
8. Репур М. Кристаллохимия компонентов портландцементного клинкера / М. Репур, А. Гинье // Химия цементного клинкера: тр. 6 Междунар. конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 25-51.
9. Зубехин А.П. Белый портландцемент / А.П. Зубехин, С.П. Голованова, П.В. Кирсанов. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2008 – 263 с.
10. Зубехин А.П. Разработка теоретических основ и технологии белого портландцемента из сырья с различным содержанием окрашивающих соединений: автореф. дис... докт. техн. наук. – М.: 1984. – 37 с.
11. Зубехин А.П. Влияние окислительно-восстановительных условий обжига на фазовый состав оксидов железа и цвет керамического кирпича / А.П. Зубехин, Н.Д. Яценко, К.А. Веревкин // Строительные материалы. – 2011. – № 8. – С. 8-11.

## White Mineral Ceramic and Clinker White Portland Cement, Depending on the Content of Chromophores

Yatsenko N.D, Golovanova S.P.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Novocherkassk, Russian Federation

[natyacen@yandex.ru](mailto:natyacen@yandex.ru)

**Abstract.** In modern construction, great attention is paid to the creation of architecturally-expressive complexes of both residential and industrial. Implementation of concepts of modern architectural design teaching slowly with the need to use effective con-information finishing and decorative construction materials. These include wall and facing ke-ceramic materials, white and coloured cement. The article deals with the essence of white and white colour of ceramics and Portland cement, the theoretical based on white and coloring depending on their phase-mineral composition, structure, content of chromophores Fe, Mn and Ti,

the process of firing and cooling (oxidizing and reducing). As a result of research with application using complex physico-chemical methods the obtained data of the phase and crystal-chemical state of ions of chromophores in the silicates and aluminates of calcium, almosi-silicate minerals and glass phase.

**Keywords:** ceramics, white cement, ions-chromophores, white, coloring, physico-chemical research methods, silicates, aluminates and aluminosilicates of calcium.

# Функциональные композиционные стеклоэмалевые покрытия для защиты стальных изделий\*

Рябова А.В., Хорошавина В.В., Давитян М.В.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
г. Новочеркасск, Российская Федерация  
[khoroshayavera@mail.ru](mailto:khoroshayavera@mail.ru)

**Аннотация.** Из всех известных технологий обеспечения коррозионной стойкости стальных изделий наиболее эффективным является силикатное эмалирование. В статье рассмотрены технологии получения функциональных композиционных стеклоэмалевых покрытий для антикоррозионной защиты стальных изделий, в частности трубопроводов, актуальность их использования, современные тенденции ресурсосбережения в данной отрасли. Эмали, которые используются в настоящее время, в основном, являются двухслойными, с достаточно высокими температурами обжига, вследствие чего, несмотря на их хорошие эксплуатационные свойства, они признаны нетехнологичными и неконкурентоспособными по стоимости. Применение ресурсосберегающих технологий позволяет снизить расход энергии и материалов на производство за счет исключения некоторых технологических стадий. В данной работе представлена разработка энергосберегающей технологии нанесения эмалевых покрытий «два слоя – один обжиг» с использованием отверждающей добавки для грунтовой эмали.

**Ключевые слова:** стеклоэмаль, стальные трубопроводы, коррозия, технология «2C1F», алюминат натрия.

## ВВЕДЕНИЕ

Коррозия металла – одна из серьезнейших проблем эксплуатации металлических конструкций любого рода. Наиболее подвержены коррозии трубопроводы и трубопроводная арматура подземных магистралей вследствие агрессивного воздействия на них эксплуатационных сред. Основными причинами коррозии трубопроводов являются грунтовые воды, температура и химический состав транспортируемых сред, а также блуждающие токи [1].

Существует много способов борьбы с коррозией металлов, но все они не являются универсальными. Выбор того или иного способа определяется его эффективностью и экономической целесообразностью [2]. Перспективным видом покрытий являются силикатные эмали – кислотостойкие, износостойкие, жаростойкие, вибростойкие и другие. Оптимальный подбор состава эмали, режимов ее нанесения и обжига обеспечивает исключительно высокие качественные показатели такой защиты. Стеклоэмалевое покрытие отличается высокой химической, термической, коррозионной и абразивной стойкостью, не допускает отложений на стенках труб, надежно работает при температурах от -50 до +350 °С, обеспечивая защиту трубопроводов от внутренней коррозии при транспортировке продуктов, а также уменьшает гидравлическое сопротивление

трубопроводов, увеличивая их пропускную способность. Функциональные композиционные стеклоэмалевые покрытия отнесены к усиленному типу и обеспечивают противокоррозионную защиту трубопроводов не менее 50 лет. Трубы, покрытые силикатными эмалями, позволяют уменьшить потери давления и энергетические затраты в 1,55 раза ниже соответствующей величины для новых стальных труб, а с учетом “зарастания” стальных труб по мере эксплуатации это соотношение возрастает. Эмалированные трубы высоко гигиеничны, т.к. практически не взаимодействуют с транспортируемой жидкостью и не растворяются в ней. Пропускная способность эмалированного трубопровода возрастает в 1,29 раза, что эквивалентно снижению диаметра трубопровода на 10-12%. Применение эмалированных труб позволяет снизить суммарную стоимость сети не менее чем на 58% (с учетом разных сроков их эксплуатации) [3-5].

Технологический процесс производства эмалированных изделий достаточно сложный и многостадийный и характеризуются существенной ресурсо- и энергоемкостью. Он включает производство стеклоэмалевых фритт, порошков, шликеров, смесей RTU (Ready to Use) и RTM (Ready to Mill), изготовление металлических заготовок и подготовку их поверхности перед эмалированием, нанесение, сушку и обжиг покрытий [6-8]. Традиционно в технологии эмалирования используется двухслойное двухобжиговое нанесение покрытий, заключающееся в том, что на металл наносится слой грунтовой эмали, закрепляется обжигом, после чего наносят покровную эмаль, которая так же в свою очередь закрепляется обжигом. Основное назначение грунта – создание прочного сцепления между металлом и стекловидным эмалевым покрытием. Являясь промежуточной прослойкой, грунт изолирует эмаль от восстанавливающего действия металла на некоторые компоненты эмали. Покровные эмали в отличие от грунтовых должны удовлетворять ряду требований, определяемых назначением эмалированного изделия. Двухслойное двухобжиговое нанесение эмалевых используется в тех случаях, когда необходимо обеспечить гарантированный длительный срок службы изделий в условиях одновременного действия нескольких факторов: агрессивная среда, температура, давление (химическая аппаратура, трубы), знакопеременное температурное воздействие, слабоагрессивные среды (посуда, сантехническое оборудование, отдельные виды бытовой техники). Традиционное эмалиро-

\* Разработка выполняется по заказу ООО «Завод эмалированных труб», г. Москва

вание благодаря высокой операционной надежности, отсутствию ограничений по конфигурации и назначению эмалированных изделий и составу покрываемого металла остается лидирующим в эмалированной промышленности. Однако, использование упомянутой технологии связано со значительными энергозатратами на две и более последовательные операции сушки и обжига сначала грунтового, а затем покровного слоев, с многочисленными дефектами покрытий, обусловленными наличием воды и глины в шликерах, и т.д. [9-12].

Технологический процесс однослойного эмалирования является менее энерго- и материалоемким по сравнению с двухслойным двухобжиговым. В этом случае эмаль выполняет функции и грунтового и покровного покрытий. Такая эмаль должна обеспечивать прочное сцепление композиции «сталь – эмаль» и одновременно иметь высокие эстетико-потребительские свойства. Однако, при синтезе составов фритт безгрунтовых эмалей очень сложно получить сразу все необходимые технико-эксплуатационные свойства покрытия, поэтому появляется потребность в дополнительной защите эмалевого покрытия.

Стремление к снижению энергоемкости процесса и разработкам ресурсосберегающих технологий эмалирования привело к разработке и внедрению технологии эмалирования «два слоя – один обжиг» (2С/1F), суть которой заключается в том, что на поверхность изделия наносится грунтовое покрытие, а затем, не проводя его закрепления обжигом, на грунтовой слой наносят покровную эмаль. Основная проблема данной технологии заключается в недопустимости взаимопроникновения грунта и покровной эмали, поэтому необходимым условием является получение невпитывающего грунтового слоя. Одним из возможных решений данной проблемы является введение в состав шликера компонентов, приводящих к холодному отверждению первого слоя. Для этого применяют фосфаты и алюминаты (алюминат натрия, соли фосфорной кислоты и т.д.) [13].

В данной работе рассмотрено влияние отверждающей добавки алюмината натрия. Впервые, влияние алюмината натрия на строительные растворы было изучено такими известными научными деятелями как А.Я. Якуб и Л.Б. Митгарц. В результате их исследований было установлено, что данное вещество является ускорителем схватывания и твердения [14]. Принцип действия такой добавки заключается в ускорении гидратации, благодаря чему ускоряется процесс образования субмикроструктурных единиц.

#### АКТУАЛЬНОСТЬ И НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ДАННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Необходимо особенно отметить важную роль функциональных композиционных стеклоэмалевых покрытий для стальных труб нефтедобывающей промышленности, которая является одной из важнейших сфер экономики России. Существуют хорошие перспективы для того, чтобы нефтяная промышленность в РФ развивалась быстро и качественно. Однако по убыткам вследствие коррозии нефтегазовая отрасль занимает одно из первых мест среди всех отраслей промышленности. Аварии из-за коррозионно-эрозионных разрушений нефтепромысловых трубопроводов приводят не только к потерям большого количества труб, простоям оборудования и недобору нефти, но и к

необратимому загрязнению окружающей среды нефтью и сточными водами. Так, в России действует около 350 тыс. км, таких трубопроводов, на которых, по официальным данным, происходит до 25 тыс. аварий ежегодно, по информации же экологов – в два раза больше. По имеющимся данным, затраты на ликвидацию неблагоприятных последствий коррозионных разрушений составляют до 30 % от затрат на добычу нефти и газа [15]. Это свидетельствует об актуальности проблемы повышения коррозионной стойкости и долговечности труб нефтяного сортамента. В настоящее время накоплен опыт применения нефтепромысловых труб из стеклокомпозиционных материалов в буровой и нефтегазодобывающей промышленности в качестве обсадных в интервале залегания продуктивного пласта для скважин глубиной до 2400 м. Наряду с этим, вопрос использования данных труб для условий, осложненных экстремальными эксплуатационными нагрузками на больших глубинах залегания разрабатываемой залежи, в условиях многолетнемерзлых пород, присутствием солевых отложений, пльвунов, химически агрессивных жидкостей, остается недостаточно изученным [16-17]. В связи с этим необходимо уделить особое внимание разработке химически стойких составов для производства эмалирования стальных труб с высокими технико-эксплуатационными характеристиками.

Эмалировочная область нуждается в разработке новых составов и ресурсосберегающих технологий нанесения стеклокомпозиционных покрытий для стальных изделий, исследовании возможностей улучшения свойств покрытий. Одним из возможных решений данной проблемы являются исследования и разработки в области технологии получения функциональных композиционных стеклоэмалей по принципу «два слоя – один обжиг» (2С/1F), в частности изучении возможности получения невпитывающего грунтового слоя с использованием алюмината натрия в качестве отверждающей добавки.

#### ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачей данного исследования является разработка технологии эмалирования стальных трубопроводов способом «два слоя-один обжиг». Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) получить водонепроницаемый грунтовой слой стеклоэмали с помощью отверждающей добавки алюмината натрия;
- 2) изучить физико-химические и технико-эксплуатационные свойства получаемого грунтового покрытия;
- 3) после нанесения и закрепления слоя покровной эмали получить качественное покрытие, обеспечивающее высокую коррозионную защиту стального изделия.

#### ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с целью работы получение водонепроницаемого грунтового слоя проводили с использованием следующих сырьевых материалов: малоуглеродистых стальных образцов (08кп), силикатной грунтовой эмали (ЭСГ-26), силикатной покровной эмали (ЭСП-200) и алюмината натрия ( $\text{NaAlO}_2$ ).

Химический состав используемой грунтовой эмали приведен в табл. 1, покровной эмали – в табл. 2.



Таблица 1

Химический состав эмали марки ЭСГ-26

Массовая доля компонентов, %								
SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
40 - 48	15 - 20	Не более 2	4 - 8	4 - 7	Не более 3	18 - 23		Не более 3

Таблица 2

Химический состав эмали марки ЭСП-200

Массовая доля компонентов, %						
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>
50,0	4,0	16,0	21,0	5,0	1,8	4

Для технологии эмалирования 2С/1F исключительное значение имеют процессы газообмена между слоями. Чтобы максимально воспрепятствовать перемешиванию слоев в результате газовой выделений в грунтовом слое и соответственно выносу грунта на поверхность, необходимо существенное снижение объема грунтового слоя. Данное обстоятельство диктует минимизацию толщины грунтового слоя. Существенное снижение толщины грунтовой эмали вызывает опасения, связанные с механизмом растворения слоя оксидной пленки на поверхности стали, и опасность растрескивания эмали [13]. В связи с этим необходимо уделить особое внимание обеспечению прочности сцепления еще на стадии подготовки металла. Для получения качественного покрытия с хорошей прочностью сцепления поверхность металла должна быть чистой, без посторонних включений и ржавчины, обезжиренной с развитым рельефом. Для получения такой поверхности сталь перед ее эмалированием подвергали специальной обработке составами растворов, приведенными в табл. 3.

Таблица 3

Составы растворов для обычной обработки стали

Операция	Состав растворов (водных), %	Температура раствора, °С	Время выдержки, мин
Обезжиривание	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -4,0; NaOH - 4,0; ж. ст. -0,3	100	6-10
Промывка	проточная вода	20-25	1-2
Травление	HCl - 20	20-25	5-10
Промывка	проточная вода	20-25	1 - 2
Нейтрализация	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -0,6; Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> -0,3	85- 100	5
Сушка	—	100	5

Для получения стекломалей необходимого химического состава составили шихту – однородную смесь исходных сырьевых материалов, взятых в расчетных количествах и обеспечивающих заданный состав эмали. Рассчитанные составы были помещены в шамотные тигли и варились в муфельной печи при температуре 1300 °С, после чего из них получили гранулят (фритты), литьем сваренных составов в воду.

Эмалевые покрытия наносили на поверхность металлических образцов в виде суспензии, называемой шликер; равномерным слоем определенной толщины. Для приготовления шликера в эмалевый гранулят добавляли воды для получения раствора необходимой консистенции, алюминат натрия измельчили до требуемой тонины и добавляли в грунтовую эмаль, после чего смесь тщательно перемешивали. Диапазон вводимого количества алюмината натрия в эмалевом грунте составил 0,5-8 % от массы шликера. На обработанные стальные образцы наносили шликер пульверизацией, так как именно данный способ предпочтителен для реализации принципа формирования покрытия от нуля до требуемой толщины. Далее образцы подверглись сушке при 70-90 °С. После полного высыхания грунтового слоя исследовалось взаимодействие полученного покрытия и воды. Результаты опыта представлены в табл. 4.

Таблица 4

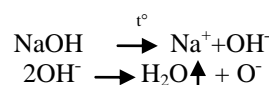
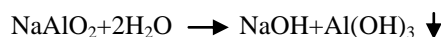
Влияние алюмината на водопроницаемость необожженной высушенной эмали

Содержание NaAlO <sub>2</sub> в грунте, %	Свойства эмалевого покрытия при воздействии воды
0,5-1	Покрытие легко смывается, при окутании эмаль не остается на образце
1-1,5	Покрытие смывается, остается незначительное количество эмали
1,5-2	При первом погружении покрытие частично смывается (по краям), при повторном – большая часть эмали удалась
2-3,5 и более	Покрытие выдерживает многократное погружение в воду, эмаль не снимается с образца

При введении NaAlO<sub>2</sub> в эмалевый шликер идет образование гидроксида алюминия Al(OH)<sub>3</sub>, который способствует получению коллоидного раствора, обладающего клеящей способностью. В результате этого эмалевое покрытие не взаимодействует с водой.

Далее образцы с высушенным слоем грунтовой эмали подверглись обжигу в электрической печи в диапазоне температур 750-950 °С. Структура обожженных образцов исследовалась методом микроскопии (увеличение ×56), результаты представлены на рис. 1.

Анализ полученных данных позволил установить следующее. Газовая фаза в виде пузырей всегда присутствует в слое грунтовой эмали, так как в процессе высокотемпературного обжига идет газовыделение компонентов стали и эмали. Добавка NaAlO<sub>2</sub> количеством более 5 % является источником интенсивного газообразования, что делает невозможным получение эмалевого слоя с высокой сплошностью покрытия.



Содержание NaAlO<sub>2</sub> в эмали в количестве 5 % и более приводит к браку покрытия, т.к. происходит вспенивание эмалевого слоя. Оптимальным является диапазон содержания NaAlO<sub>2</sub> 2,5-4%, т.к. данное количество реагента обеспечивает необходимую водонепроницаемость грунтовой эмали, равномерно распределяется в структуре слоя, не приводя к браку покрытия.



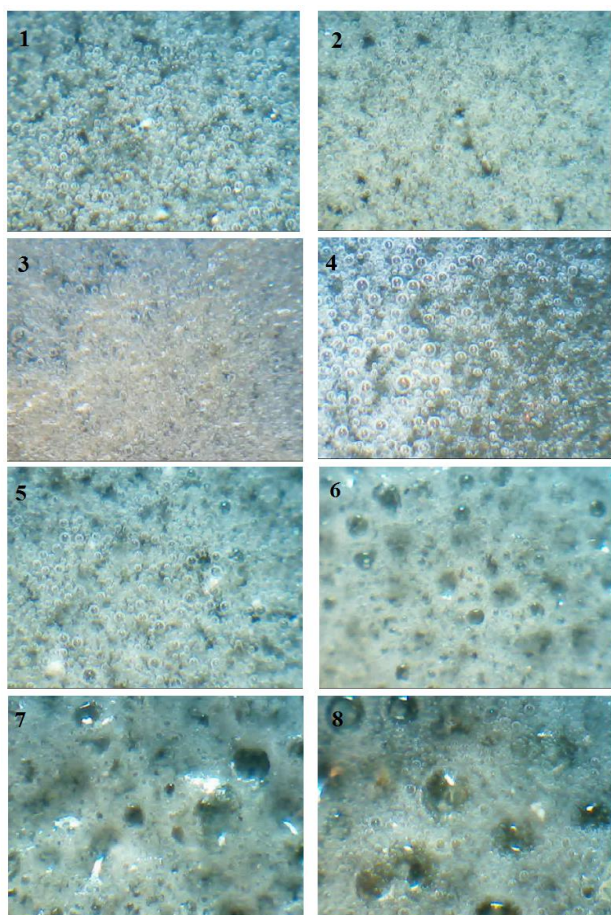


Рис. 1. Микроскопические снимки грунтовой эмали после обжига с различным количеством алюмината натрия: 1 – без  $\text{NaAlO}_2$ ; 2 – 1%; 3 – 2%; 4 – 3%  $\text{NaAlO}_2$ ; 5 – грунт, 4%  $\text{NaAlO}_2$ ; 6 – грунт, 5%  $\text{NaAlO}_2$ ; 7 – грунт, 6%  $\text{NaAlO}_2$ ; 8 – грунт, 7%  $\text{NaAlO}_2$

Для дальнейшей разработки технологии ‘два слоя – один обжиг’ были подготовлены стальные образцы с высушенным необоженным слоем грунтовой эмали, содержащим 2,5-4% алюмината натрия, после чего на образцы пульверизацией нанесли покровную эмаль марки ЭСП-200. Далее они подверглись сушке при 70-90 °С и обжигу при 830 °С. После обжига дефектов на покрытии обнаружено не было (рис. 2).

Изучение зависимости прочности сцепления в системе сталь – стеклоэмалевое покрытие от особенности процесса окисления стали, температурно-временных условий термической обработки является одним из важнейших факторов в эмалировании, в частности технологии 2С/1F. Поскольку эмаль взаимодействует с металлом при обжиге и образуется пограничная зона, обеспечивающая сцепление, то прочность связи покрытия с металлом зависит от состава, структуры этой зоны и температуры обжига.

Процесс сцепления связан с образованием двойного электрического слоя на границе эмали с оксидной пленкой, а не с чистым металлом. Важную роль в процессах взаимодействия играет кислород, а также входящие в состав эмали оксиды сцепления, за счет которых на границе раздела фаз протекают электрохимические реакции, при которых создается переходный слой, обеспечивающий прочное сцепление эмали с металлом [18-19].



Рис. 2. Эмалевое покрытие, полученное по технологии 2С/1F

В ходе исследования полученного покрытия были проведены испытания на прочность сцепления эмали со сталью. Эмалированные образцы размером 59×59 подвергали вытяжки до 7 мм. Результаты прочности сцепления в зависимости от температуры обжига образца приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты измерений прочности сцепления

Температура, °С	Индекс сцепления Н, %
750	20
800	64
850	82
900	98
950	100

По результатам изучения зависимости прочности сцепления от температуры обжига можно сделать вывод, что чем выше температура обжига эмали, тем выше прочность сцепления в системе сталь-эмаль. Это объясняется более интенсивным растворением оксидов железа в расплаве, уменьшением его вязкости и увеличением удельной электропроводности с повышением температуры. При этом возрастает количество перешедших в расплав катионов железа, улучшается смачивание металлической основы расплавом эмали. Интенсифицируется электрохимическое взаимодействие и взаимная диффузия элементов стали и эмали с образованием новых фаз. Несмотря на кратковременность указанных процессов (время обжига 3 минуты) влияние этих процессов на качество покрытия является определяющим [20].

В результате анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что оптимальной температурой обжига данной эмали является 850 °С. Это связано с тем, что хотя при более высокой температуре значение прочности сцепления более высокое, но при этом происходит высокотемпературная перекристаллизация структуры стали, результатом которой является деформация изделия, что является недопустимым.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе разработана технология эмалирования стальных изделий 2С/1F с использованием алюмината натрия в качестве отверждающей добавки для грунтового слоя. В результате исследования установлено, что грунтовой эмалевый шликер, приготовленный с добавкой 2,5-4% алюмината натрия обладает водонепроницаемостью, достаточной для нанесения слоя покровной эмали, при этом необходимость обжига грунтовой эмали отсутствует. Дальнейшее увеличение количества вводимого алюмината

приводит к браку покрытия, а именно происходит вспенивание эмалевого слоя. В ходе испытаний на прочность сцепления эмали со сталью была установлена оптимальная температура обжига данных покрытий, обеспечивающая необходимую прочность сцепления, тем самым предотвращая брак готовых эмалированных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://xn----7sbqkoi7al.xn--p1ai/Default.aspx?sid=115> (дата обращения 10.09.2015).
2. Гринева С.И. Защита от коррозии стеклоэмалевыми покрытиями: метод. указ. к лаб. раб. / С.И. Гринева, В.Н. Коробко. – СПб: СПбГТИ(ТУ), 2004. – 10 с.
3. Смирнов Л.А. Как создать надежную защиту для труб и оборудования в нефтяной промышленности// Металлы Евразии. – 2002. – №10. – С. 38.-39.
4. [http://www.ngv.ru/magazines/article/emal-protiv-aspo-i-korrozii-trub/?sphrase\\_id=1377626](http://www.ngv.ru/magazines/article/emal-protiv-aspo-i-korrozii-trub/?sphrase_id=1377626) (дата обращения 10.09.2015).
5. 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.
6. Петцольд А. Эмаль и эмалирование: справ. изд. Пер. с нем. / А. Петцольд, Г. Пёшманн. – М: Металлургия, 1990 – 576 с.
7. Анненков В.З. Об особенностях работы и модернизации производства эмалировочных предприятий Украины в современных экономических условиях // Информац. Вестник ОО "УАЭ" "Стеклоэмаль и эмалирование металлов". – 2004. – №4. – С. 17.-22.
8. Pavlas Josef. Materials for the Enamelled Coating Preparation and Its Production / Josef Pavlas, Juri Masita // Collection of lectures «Enamels and Enamelling Technology», MEFRIT, 2008. – P. 5.-15.
9. Гукасов Н.А. Энергетические возможности труб, покрытых эмалью / Н.А. Гукасов, В.И. Риккер, И.А. Каледа, В.В. Демидочкин // Проблемы энерго- и ресурсосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: Сб. научн. тр. – Пенза: ПДЗ, 2000. – С. 23.-25.
10. Гукасов И.А. О преимуществах эмалированных труб / И.А. Гукасов, В.И. Риккер, И.А. Коледа // Нефть, газ и бизнес. – 2002. – №6. – С. 48.-49.
11. Рябова А.В. Ресурсосберегающая технология белых стеклоэмалевых покрытий для стали / А.В. Рябова, В.А. Гузий, Е.В. Филатова // Строительство-98: тезисы докл. Междунар. конф. (Ростов-на-Дону, 1998 г.). – Ростов-на-Дону, 1998. – С. 170.-171
12. Варгин В.В. Эмалирование металлических изделий. – Л.: Машиностроение, 1972. – 496 с.
13. Брагина Л.Л. Технология эмали и защитных покрытий: учеб. пособие / Л.Л. Брагина, А.П. Зубехин. – Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2003. – 488 с.
14. [http://nomitech.ru/articles-and-blog/primenenie\\_dobayki\\_aluminata\\_natriya\\_v\\_kachestve\\_uskoritelya\\_skhvatyvaniya\\_tverdeniya\\_betona/](http://nomitech.ru/articles-and-blog/primenenie_dobayki_aluminata_natriya_v_kachestve_uskoritelya_skhvatyvaniya_tverdeniya_betona/) (дата обращения 10.09.2015).
15. <http://www.techros.ru/text/3030> (дата обращения 10.09.2015).
16. 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.
17. <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1487> (дата обращения 10.09.2015).
18. 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. (Новочеркасск, 10-25 апреля 1996 г.). – Новочеркасск, 1996. – С. 83.-85.
19. Большаков В.И. Эффективное покрытие для повышения эксплуатационной надёжности и срока службы труб в жёстких условиях нефтегазодобычи / В. И. Большаков, Е.В. Проскуркин, Т.А. Дергач // Металлознавство та термічна обробка металів. – 2013. – № 2-3. – С. 5.-13.
20. Рябова А.В. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию по специализации "Технология эмали и защитных покрытий" / А.В. Рябова, В.А. Гузий, Е.А. Яценко. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. – 27 с.

## The Functional Glass-Composite Coatings for Protecting Steel Products

Ryabova A.V., Khoroshavina V.V., Davityan M.V.  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)  
Novocherkassk, Russian Federation  
[khoroshayavera@mail.ru](mailto:khoroshayavera@mail.ru)

**Abstract.** Of all the technologies of corrosion resistance of steel products is the most effective silicate enameling. The article describes the technology of functional glass-composite coatings for corrosion protection of steel products, such as pipes, the relevance of their use, the current trends in the resource sector. Nowadays enamels used are mainly two-layer, with a sufficiently high firing temperature, so that despite their good performance properties, they are considered non-technological and uncompetitive cost. Application of resource-saving technologies to reduce consumption of energy and materials to

manufacture by eliminating several processing steps. This paper presents the development of energy-saving technology of applying enamel coatings «two layers-one firing» with curing additives for ground enamels.

**Keywords:** glass enamel, steel pipes, corrosion, technology «2C\1F», sodium aluminate.

# Молотый доменный гранулированный шлак и способы его активации

Трофимов Б.Я., Шулдяков К.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

г. Челябинск, Российская Федерация

[tbya@mail.ru](mailto:tbya@mail.ru), [Kirill-shuld@ya.ru](mailto:Kirill-shuld@ya.ru)

**Аннотация.** Доменный гранулированный шлак (ДГШ) является широко распространенным компонентом различных цементов и вяжущих, его гидравлическая активность зависит от многих факторов. Выявлено, что в исследуемом шлаке отсутствуют минералы, способные к гидравлическому твердению и показатели активности шлака по отечественным и зарубежным стандартам характеризуют его как малоактивный, 3 сорта. Изменения химического состава в небольших пределах, характерные для определенного шлака, практически не влияют на его активность. Тоже относится и к дисперсности шлака при его высокой степени аморфности – увеличение дисперсности повышает активность шлака, но при этом растет его водопотребность и для равноподвижных смесей более дисперсный шлак не повышает прочность растворных образцов. Поэтому, вероятно, нужно размалывать такой шлак до удельной поверхности 250–300 м<sup>2</sup>/кг, сопоставимой с дисперсностью ЦЕМ 1, и замена части цемента шлаком не будет значительно влиять на водопотребность смеси. С увеличением содержания шлака в составе вяжущего показатель эффективности шлака повышается, который достигает максимума при 70% замене цемента шлаком. Большая дозировка шлака может существенно понизить содержание гидроксида кальция в цементном камне бетона и уменьшить надежность антикоррозийной защиты арматуры в железобетонных конструкциях. В статье рассматриваются различные способы активации доменного гранулированного шлака в составе смешанного вяжущего: портландцемент ЦЕМ 1 + ДГШ. Наиболее широко используемые способы активации – применение натриевых и калиевых щелочей и растворимого стекла достаточно эффективный способ, но при этом требуются дорогостоящие искусственные компоненты и формирующиеся щелочные соединения при твердении такого вяжущего будут растворимыми. Поэтому изучалась эффективность тепловой активации ДГШ и возможность использования не дефицитных компонентов.

**Ключевые слова:** молотый доменный гранулированный шлак, оценка активности, стеклофаза, термическая активация, портландцемент, оптимум шлака в смешанном вяжущем.

## ВВЕДЕНИЕ

Применение вяжущих с ДГШ позволяет решать некоторые социальные проблемы: утилизация отходов, сокращение объемов производства клинкера, что, в свою очередь, сокращает энергоемкость производства цемента и выбросы углекислого газа в атмосферу. Введение ДГШ в состав цемента приводит к следующим изменениям свойств вяжущего по сравнению с ЦЕМ 1 [1]:

- повышает водопотребность с увеличением дисперсности шлака, удлинит сроки начала и конца схватывания, что способствует увеличению сохраняемости удобоукладываемости бетонной смеси;

- замедляет набор прочности в ранние сроки, снижает морозостойкость бетона при естественном твердении и повышает ее при пропарке;

- уменьшает теплоту гидратации, поэтому такие цементы рекомендуются при строительстве массивных сооружений [2];

- повышается стойкость цементного камня к воздействию агрессивных сред: сульфатостойкость, кислотостойкость, щелочестойкость, стойкость к морской воде, карбонизации и др.;

- за счет снижения объема капиллярных пор и повышения объема низкоосновных гидросиликатов кальция типа С-S-N (1) бетоны на таких цементах при сопоставимой степени гидратации вяжущего характеризуются повышенной морозостойкостью, водостойкостью и водонепроницаемостью.

Реакционная способность шлака зависит от химического состава, содержания стекла и тонкости помола [3]. Присутствие малого количества кристаллического материала, распределенного в стекле, улучшает размалываемость и реакционную способность шлака. Наивысшей прочностью обладают шлаки, содержащие около 5% кристаллических фаз, а увеличение последних до 35% приводит только к небольшому снижению прочности. Благоприятное влияние небольшого количества кристаллических фаз обеспечивается наличием зародышей для продуктов гидратации, что ускоряет набор прочности.

Взаимодействие между двумя компонентами вяжущего – ДГШ и портландцементом включает в себя [4]:

- первоначальную гидратацию клинкерных частиц;
- насыщение жидкой фазы щелочью Ca(OH)<sub>2</sub> и гипсом;
- ускоренное растворение шлака;
- связывание шлаком гидроксида кальция с образованием С-S-N фазы;
- ускорение взаимодействия при повышении температуры и влажности.

Поздняя прочность бетона обеспечивается без специальной активации [5]. Механическая активация, как правило, заключается в повышении дисперсности шлака до удельных поверхностей 450-550 м<sup>2</sup>/кг, что повышает водопотребность вяжущего, замедляет схватывание и твердение.

Водное твердение образцов бетона на смешанных цементах обеспечивает более высокую (по сравнению с воздушным твердением) раннюю и позднюю прочность. Максимальная прочность в 90 сут (80 МПа) получена при расходе вяжущего 380 кг, повышение расхода вяжущего до 500 кг делает бетон более чувствительным к усадке при твердении в воздушных условиях [6].



Для затвердевших смесей 1:3 (соотношение вяжущего к песку) с содержанием ДГШ в портландцементном вяжущем от 0 до 100 %, выявлено [7], что прочность образцов при сжатии и изгибе повышается с увеличением щелочи в составе жидкого стекла, максимум прочности отмечен при 100 % замещении цемента шлаком, при этом достигается минимальная глубина карбонизации через 180 суток [8]. С увеличением содержания шлака в вяжущем фиксируется меньшая экзотермия, уменьшается содержание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , которая не способствует повышению прочности бетона [9, 10]. Формирование Na-C-S-H в продуктах гидратации и более медленная гидратация способствуют снижению прочности образцов из активированных жидким стеклом смесей [11]. Замена 5 и 10 % ДГШ на пемзу повышает долговечность камня [12].

Щелочеактивированные смешанные цементы при повышенном содержании ДГШ (70-100 %) увеличивают прочность при сжатии, но повышают усадочные деформации. Поликарбоксилатные суперпластификаторы замедляют развитие усадки с незначительным эффектом при тепловлажностной обработке, улучшают работоспособность и функциональность и незначительно влияют на продукты гидратации [13].

В [14] исследовались активаторы NaOH, KOH и  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  на прочность вяжущего из ЦЕМ 1 и ДГШ. Когда применялся один активатор, то наибольший эффект был получен от  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , наименьший – от NaOH. Эффект от комбинированного активатора больше, чем от индивидуального, для некоторых сочетаний отмечено снижение прочности в поздние сроки, что объясняется влиянием дозировки шлака, видом и дозировкой активатора, а также режимом твердения.

Хотя сильные щелочные активаторы, такие как NaOH и  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  предпочтительны для получения высокой ранней прочности, в природе они не существуют и процесс их производства достаточно энергоемкий [15].

Тепловыделение при активации шлака известковым раствором меньше, чем при гидратации ДГШ с известью и гипсом вследствие образования в этом случае этtringита с последующим переходом в моногидросульфалюминат кальция [16].

Введение активатора ( $\text{CaO}$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) в бетон или раствор на вяжущем из ЦЕМ 1 и ДГШ компенсирует снижение ранней прочности, характеризуется более высокой прочностью в длительные сроки твердения и снижает усадку, пористость, карбонизацию по сравнению с образцами без активаторов [17].

При использовании  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в качестве активатора шлака выявлено, что увеличение дисперсности ДГШ увеличивает прочность без повышения pH поровой жидкости, что полезно при захоронении определенных ядерных отходов, содержащих активные металлы и смолы [15].

Увеличение содержания ДГШ в вяжущем повышает сульфатостойкость вяжущего, а химическая активация снижает ее. В продуктах коррозии формируются гидросульфалюминаты кальция и двуводный гипс [18].

Если совместно с активатором  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  вводить по 5 % от массы шлака различные минеральные добавки, то отмечаются следующие эффекты: введение кальцита увеличивает работоспособность искусственного камня, тогда как  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , зола-унос, портландцемент и микрокремне-

зем снижают ее. Введение микрокремнезема и кальцита повысило прочность при сжатии, а добавки золы, гидроксида кальция и портландцемента понизили ее. Влажностная усадка понижается при добавлении золы, гидроксида кальция, портландцемента и кальцита, а микрокремнезем повышает влажностную усадку [19].

При высоком содержании шлака в смешанном цементе (66%), активированном  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , продукты гидратации представлены гидросиликатным гелем C-S-H, этtringитом, гидрогранатом и OH-гидротальцитом. Сравнимый с портландцементным камнем потенциал самозалечивания повышается с увеличением доли шлака [20].

Результаты испытаний образцов в 90 суточном возрасте показывают, что при 15 % замещении цемента на шлак ДГШ полностью активируется и показывает на 67 % большую эффективность, чем 100 % портландцемент. Для большей степени замещения эффективность шлака уменьшается и становится как для портландцемента при 50% содержании ДГШ [4].

Активации шлака благоприятствует повышенное содержание основных оксидов шлаков, влияние содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  достаточно сложно и не один из модулей не позволяет детально сравнивать шлаки, за исключением шлаков, относительно близких по химическому составу и произведенных на одном заводе. По шлакам западной Германии выявлено, что увеличение содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  свыше 13 % способствует увеличению ранней прочности композиционного цемента, но снижает прочность в поздние сроки твердения. MgO в количестве до 11 % оказывает влияние, эквивалентное CaO. Микроэлементы имеют важное значение – влияние MnO всегда отрицательно, а  $\text{P}_2\text{O}_5$  и оксиды щелочных металлов влияют более сложно [3].

В связи с возрастающим интересом к вяжущим с ДГШ и возможностью повышения эффективности производства железобетона на кафедре «Строительные материалы» Южно-Уральского государственного университета проведены физико-химические исследования молотого доменного гранулированного шлака Челябинского металлургического комбината.

Цель исследований – выявить основные свойства шлака и возможность повышения его активности различными технологическими приемами.

#### МАТЕРИАЛЫ

Химический состав 10 различных проб шлака представлен в табл. 1

Таблица 1

Химический состав шлака

Показатель	Среднее значение, %	Диапазон колебания значения, %	Требования ТУ 0799001-991 26491-2013 [21], %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	9,89	9,7–11,8	не менее 8,0
CaO	39,43	37,2–42,6	35,0–45,0
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	0,26	0,23–0,56	0,2–1,0
$\text{K}_2\text{O}$	1,09	0,56–1,45	1,0–1,5
MgO	7,32	5,8–10,4	не более 15,0
MnO	0,56	0,33–0,74	не более 2,0
$\text{Na}_2\text{O}$	0,71	0,53–0,89	0,5–1,0
$\text{TiO}_2$	0,69	0,53–0,84	не более 4,0
$\text{SiO}_2$	40,65	37,0–41,3	35,0–45,0
$\text{S}_{\text{общ}}$	0,29	0,15–0,92	не более 1,0



Для более полной оценки качества шлака определяли дополнительные характеристики химического состава по ГОСТ 3476 и EN 197-1.

Средний модуль основности шлака составляет 0,92, что соответствует шлаку кислому, близкому к нейтральному. Диапазон возможного колебания значений модуля основности от 0,90 до 0,98.

Коэффициент качества при  $MgO \leq 10$  % составляет  $K = (CaO + MgO + Al_2O_3) / (SiO_2 + TiO_2) = 1,37$ .

По этому показателю в соответствии с ГОСТ 3476 шлак относится к 3 сорту. По остальным показателям: шлак соответствует требованиям ГОСТ 3476.

По EN 197-1 доменный гранулированный шлак должен содержать, по меньшей мере, 2/3 по массе стекловидного шлака и обладать гидравлическими свойствами, когда он должным образом активирован. У исследованного шлака эти показатели в среднем составляют  $CaO + MgO + SiO_2 = 87,4$  %,  $(CaO + MgO) / SiO_2 = 1,15$ , что соответствует требованиям EN 197-1.

По ASTM C 988 индекс шлаковой активности (slag activity index – SAI) определяется как отношение в % прочности при сжатии растворных образцов водного твердения на вяжущем из ЦЕМ 1+50 % ДГШ к прочности образцов на исходном цементе в 7 и 28 суток. Величина SAI составила в 7 суток 49 %, в 28 суток 57 %, в 180 суток 84 %, следовательно, индекс шлаковой активности со временем повышается, и в 180 суток достигает нормируемого по ASTM C 988 значения в 28 суток (не менее 75 % по средним значениям и не менее 70 % для каждого значения).

Таким образом, по химическому составу и прочности исследуемый шлак относится к малоактивному, имеющему низкие значения прочности в ранние сроки твердения, следовательно, для такого ДГШ актуальны проблемы активации.

Рентгенофазовый анализ шлака выявил содержание двух кристаллических фаз: геленита ( $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ) и гидрата геленита ( $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$ ). При этом на рентгенограмме имеется выраженная область гало, что указывает на его аморфизированное состояние. Минерал геленит при наличии активаторов твердения или при гидротермальной обработке может проявлять вяжущие свойства [8], при этом гидрат геленита в небольшом количестве образуется при обычных условиях и является стабильным соединением.

На дериватограмме выявляются потери влаги при ступенчатой дегидратации гидратированного кальциево-алюминатного силиката  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$  в температурных интервалах 520-640 °С и 650-740 °С, что подтверждает данные рентгенофазового анализа.

Среднее количество стеклофазы, определенное для 5 различных проб шлака, составило 90,6 %. Все результаты по содержанию стекловидной фазы соответствуют требованиям ТУ 0799-001-99126491-2013 [21] (не менее 66,6 %).

Гранулометрический состав шлака оценивался по результатам микроскопического анализа, ситовым методом и по величине удельной поверхности. Микроскопический анализ показал, что частицы шлака имеют неправильную форму, поверхность стекловидная, частицы пропускают свет. Частицы шлака в основном размером от 0,2 до 5 мкм, но встречаются агрегаты размером более 20 мкм.

Средний размер частиц по результатам определения удельной поверхности составляет 5,7 мкм.

Диапазон колебания значений удельной поверхности (определяли прибором ПСХ-12) составляет 342-414 м<sup>2</sup>/кг, среднее значение – 392 м<sup>2</sup>/кг.

Активность шлака оценивалась по реакции с водой, по реакции со щелочью и по результатам испытания смеси шлака с цементом в различных пропорциях. Все испытания проведены на усредненной пробе шлака со средней удельной поверхностью 392 м<sup>2</sup>/кг.

Испытания образцов из шлака (возраст испытаний: 1 сутки с момента изготовления после ТВО (по режиму в соответствии с приложением Б ТУ 0799-001-99126491)) показали, что ДГШ не обладает гидравлической активностью.

Для определения активности шлака по реакции со щелочью изготавливали образцы из растворной смеси 1:3 с использованием ДГШ и монофракционного песка, затворенной 20% водным раствором гидроксида натрия, при этом водо-вяжущее отношение составляло 0,45. Образцы после изготовления помещались в контейнер с водой для обеспечения 100 % относительной влажности и помещались на 23 часа в пропарочную камеру с температурой  $55 \pm 2$  °С, через 24 часа после затворения образцы испытывались в соответствии с требованиями ГОСТ 310.4. Средняя активность шлака по реакции со щелочью составляет 10,3 МПа, что соответствует требованиям ТУ 0799-001-99126491-2013.

Для смешанного вяжущего применялся ЦЕМ 1 42,5 производства ООО «ЮУГПК» г. Новотроицк, свойства которого соответствуют требованиям ГОСТ 10178 и ГОСТ 31108.

Песок применялся монофракционный по ГОСТ 6139-2003, добавки для активации шлака отвечали требованиям соответствующих технических условий.

Для выявления влияния условий твердения образцов из смеси ДГШ с портландцементом с разной степенью замещения изготавливались и испытывались растворные образцы 1:3 на монофракционном стандартном песке в соответствии с ГОСТ 310.4, которые испытывались после различных условий твердения. Результаты испытаний приведены на рис 1.

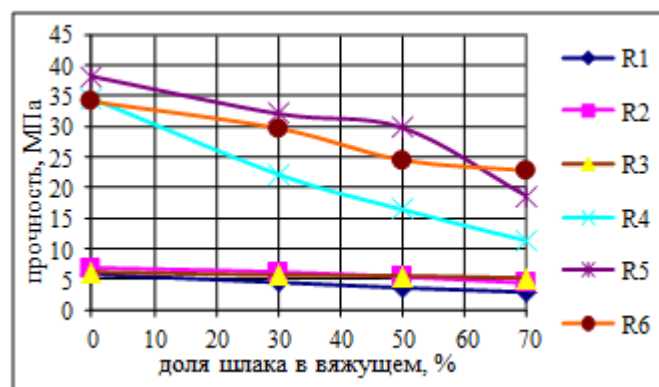


Рис. 1. Влияние замены цемента на шлак на прочность при сжатии R<sub>4</sub> – водное твердение (вод), R<sub>5</sub> – нормальное твердение (НТ), R<sub>6</sub> – ТВО и изгибе R<sub>1</sub> – вод, R<sub>2</sub> – НТ, R<sub>3</sub> – ТВО

Из полученных результатов следует:

- с увеличением доли шлака в вяжущем прочность образцов уменьшается, а отношение  $R_{изг}/R_{сж}$  при соотношении 70/30 увеличивается, что позволяет предполагать повышение содержания С-S-N в цементном камне;
- наилучшим условием твердения образцов на вяжущем с добавкой шлака является ТВО; меньшее падение прочности при изгибе также свидетельствует о повышении вязкости разрушения;
- сьем прочности с одного процента цемента максимальный для вяжущего 70/30, поэтому можно считать, что с увеличением доли шлака в вяжущем увеличивается активность портландцемента;
- состав вяжущего 70/30 является оптимальным, так как имеет наилучшие удельные прочностные показатели и минимальную стоимость, более высокая доля шлака в вяжущем может привести к потере защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре.

Для оценки влияния химического состава шлака на его активность в составе смешанного цемента были выбраны три пробы шлака имеющие максимальное содержание одного из основных активных компонентов шлака CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав отдельных проб шлака

Проба	Содержание в % по массе								
	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
1	41,8	6,3	9,6	38,9	0,7	0,5	0,6	0,8	1,5
2	36,9	8,9	11,1	41,3	0,7	0,4	0,5	0,6	0,8
3	38,1	8,4	10,3	39,5	0,8	0,6	0,3	1,1	0,6

По ГОСТ 3476-74 химический состав ДГШ оценивается по коэффициенту качества, который равняется для шлака 1 пробы 1,44, 2 пробы – 1,36, 3 пробы – 1,39, то есть все пробы соответствуют 3 сорту – коэффициент качества менее 1,45 и более 1,20.

Из смешанного вяжущего и стандартного песка изготавливали образцы-балочки 4x4x16 см, которые испытывали через 7 суток водного твердения и через 1 сутки с момента затворения смеси после ТВО (5+4+6+4 при 60 °С). Балочки испытывали на изгиб и половинки на сжатие по ГОСТ 310.4. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения прочности образцов на смешанном вяжущем в зависимости от химического состава шлака

ДГШ/ПЦ	Прочность без ТВО		Прочность после ТВО	
	R <sub>изг</sub> , МПа	R <sub>сж</sub> , МПа	R <sub>изг</sub> , МПа	R <sub>сж</sub> , МПа
шлак 1 проба				
0/100	7,0	37,6	6,32	34,4
30/70	6,43	32,7	5,39	29,1
50/50	5,61	28,2	5,41	25,7
70/30	4,39	17,1	5,16	23,3
шлак 2 проба				
30/70	6,47	32,9	5,43	28,5
50/50	5,56	27,8	5,36	24,8
70/30	4,31	15,4	5,07	22,3
шлак 3 проба				
30/70	6,45	33,4	5,65	29,2
50/50	5,64	29,7	5,37	25,8
70/30	4,72	17,8	4,92	23,9

Изменение химического состава шлака в небольших пределах практически не оказывает влияние на активность смешанного вяжущего как при тепловой обработке, так и при твердении в водных условиях при комнатной температуре.

Для определения влияния тонкости помола были выбраны три пробы шлака с удельной поверхностью 342, 358 и 373 м<sup>2</sup>/кг и дополнительно использовали тонкомолотый шлак с удельной поверхностью 412 м<sup>2</sup>/кг. Водопотребность смешанного вяжущего определялась по методике испытания нормальной густоты цемента.

Как и следовало ожидать, водопотребность смешанного вяжущего возрастает с ростом удельной поверхности шлака, так как водопотребность портландцемента составила 27,8 %, ДГШ при удельной поверхности 342 м<sup>2</sup>/кг – 31,6 %, а при удельной поверхности 412 м<sup>2</sup>/кг – 33,5 %. Максимальная водопотребность вяжущего достигается для соотношения ДГШ/ПЦ 70/30.

Для выявления влияния дисперсности шлака на свойства смешанного вяжущего изготавливали образцы-балочки (1:3) 4x4x16 см, которые испытывали через 7 сут водного твердения и через 1 сутки с момента затворения смеси после тепловлажностной обработки (5+4+6+4 при 60 °С). Балочки испытывали на изгиб и половинки на сжатие по ГОСТ 310.4. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты определения прочности образцов на смешанном вяжущем в зависимости от удельной поверхности шлака

ДГШ/ПЦ	Прочность без ТВО		Прочность после ТВО	
	Ризг, МПа	Рсж, МПа	Ризг, МПа	Рсж, МПа
шлак с удельной поверхностью 342 м <sup>2</sup> /кг				
0/100	6,78	37,8	6,38	33,6
30/70	6,31	31,7	5,34	29,2
50/50	5,62	29,4	5,18	24,4
70/30	4,23	18,1	4,76	22,9
шлак с удельной поверхностью 358 м <sup>2</sup> /кг				
30/70	6,41	33,2	5,22	27,9
50/50	5,34	29,3	5,34	24,8
70/30	4,66	17,8	4,73	23,3
шлак с удельной поверхностью 373 м <sup>2</sup> /кг				
30/70	6,52	33,4	5,46	27,7
50/50	5,43	27,6	5,34	24,3
70/30	4,84	18,8	4,62	25,2
шлак с удельной поверхностью 412 м <sup>2</sup> /кг				
30/70	6,37	32,4	5,23	28,5
50/50	5,56	29,7	5,35	26,2
70/30	4,88	17,7	4,57	24,9

Из полученных данных следует:

- положительный эффект от повышения активности шлака (растущей с увеличением удельной поверхности) уравновешивается возрастающей водопотребностью (понижающей прочностные характеристики);
- с увеличением доли шлака в вяжущем происходит снижение активности смешанного вяжущего как при пропаривании, так и при водном твердении;
- при изменении удельной поверхности шлака от 340 до 412 м<sup>2</sup>/кг его активность в смешанном вяжущем остается практически неизменной.

Таким образом, эффективность добавки шлака в смешанном вяжущем складывается из доли, соответствующей эффекту от замены части цемента, и доли от изменения прочности песчаного бетона. ГОСТ 30459-2008 не позволяет определить эффективность шлака с учетом оценки этих двух эффектов, в связи с чем предлагаем оценить эффективность применения ДГШ по экономии цемента с использованием формулы С.А.Высоцкого [22]:

$$\mathcal{E}_c = \frac{100(C_1/R_1 - n C_2/R_2)}{C_1/R_1} \quad (1)$$

где  $C_1$  – расход цемента без шлака в бетоне определенного состава, кг;  $R_1$  – прочность бетона на исходном цементе, МПа;  $C_2$  – расход смешанного вяжущего, кг;  $R_2$  – прочность бетона на смешанном вяжущем, МПа;  $n$  – доля исходного цемента в смешанном вяжущем.

Эффективность добавки шлака приведена на рис. 2, из которого следует, что эффективность повышается с увеличением доли шлака.

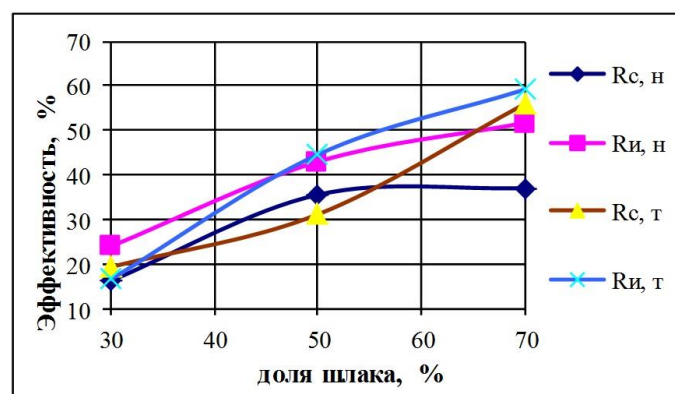


Рис. 2. Изменение эффективности добавки шлака,  $R_{c,n}$ ,  $R_{c,t}$  – эффективность по прочности при сжатии после 7 суток водного твердения и через 1 сут после начала тепловлажностной обработки,  $R_{i,n}$ ,  $R_{i,t}$  – тоже по прочности при изгибе

В рамках экспериментов изготавливали образцы-балочки 4x4x16 см из цементно-песчаной смеси Ц:П = 1:3 на стандартном монофракционном песке, которые испытывали через 4 часа после пропаривания по режиму 2+8+2 при 60 °С. Для интенсификации твердения применяли: предварительные подогрев воды затворения до 60 °С (горячее затворение), изменение температуры и длительности изотермической выдержки, введение добавок ускорителей и водоредуцирующих добавок, а также их комплексов.

Влияние повышенной температуры изотермической выдержки на прочность образцов при 70 % замещении портландцемента шлаком состава 1:3 через 1 сут с момента затворения приведено на рис. 3.

Увеличение температуры выдержки до 95 °С способствует повышению прочности при сжатии почти в 2 раза, а при изгибе – в 1,7 раза.

Влияние режима ТВО на активность смешанного вяжущего определялось по результатам испытания прочности образцов при сжатии: для режима 4+3+5+6\* прочность составила 15,9 МПа, 0+3+11+4\* – 20,2 МПа, 0+3+7+4\* – 17,2 МПа, 0+3+5+4\* – 13,4 МПа (\*в часах пред-

варительная выдержка + подъем температуры + изотермическая выдержка + остывание). Повышение длительности изотермического прогрева без предварительной выдержки позволяет повысить активность вяжущего.

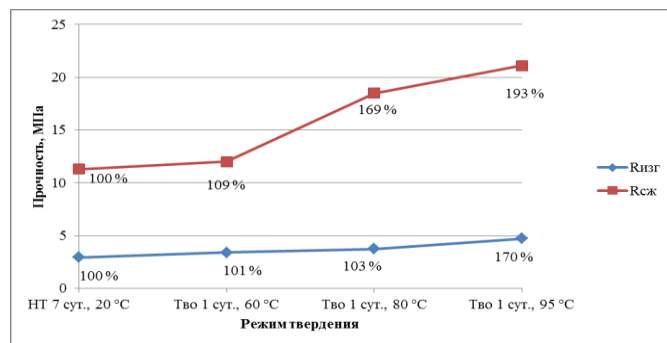


Рис. 3. Зависимость прочности от температуры изотермической выдержки

В качестве добавок-ускорителей использовали природный двуводный гипс 1 сорта по ГОСТ. Двуводный гипс перед введением в бетонную смесь предварительно измельчали до остатка на сите 008 не более 15 %. Добавку перемешивали всухую с цементом, ДГШ и песком, после чего смесь затворяли водой. ТВО по режиму 2+8+2 при 60 °С, результаты испытаний приведены на рис. 4.

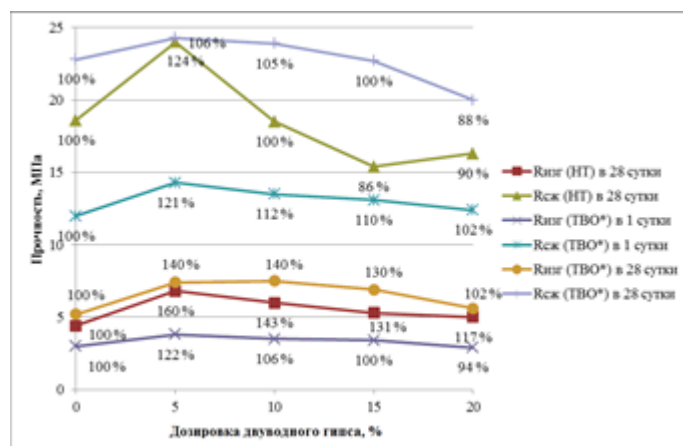


Рис. 4. Зависимость прочности образцов 70/30 от дозировки добавки двуводного гипса

Добавка двуводного гипса повышает прочность смешанного вяжущего при использовании ее в количестве 5 % как при нормальном твердении, так и при пропаривании. Наибольшее повышение прочности (более 20 %) наблюдается через 1 сут после пропаривания и через 28 суток нормального твердения образцов. Прочность при изгибе в суточном возрасте после ТВО также достигает максимума при 5% дозировке добавки, а в 28 суток нормального твердения и после пропарки достигает 140 и 160 % от прочности контрольных образцов без добавки.

Влияние различных добавок включающих МТК – метакаолин (ускоритель); МК – микрокремнезем (активная минеральная добавка), на прочность пропаренных\* образцов состава 1:3 (вяжущее 70/30) приведено в табл. 5.

Таблица 5

Результаты испытаний образцов с добавками

Добавка		Прочность		
		R <sub>изг</sub>	R <sub>сж</sub>	R <sub>изг</sub> /R <sub>сж</sub>
3%МТК+5%МК+ 0,9%СП**	ТВО 1 сут	3,7	20,0	0,19
	ТВО 28 сут	5,8	25,5	0,23
5%МТК+0,9%СП	ТВО 1 сут	3,2	14,6	0,22
	ТВО 28 сут	6,2	22,7	0,27
5%CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	ТВО 1 сут	3,8	14,3	0,27
	ТВО 28 сут	7,4	24,3	0,30
5% CaSO <sub>4</sub> ·0,5 H <sub>2</sub> O	ТВО 1 сут	3,8	13,6	0,28
	ТВО 28 сут	6,7	21,9	0,30
0,9 %СП	ТВО 1 сут	2,5	11,2	0,22
	ТВО 28 сут	5,3	20,5	0,26

\* пропаривание по режиму (2+8+2) 2 часа подъем температуры+8 часов выдержка при 60 °С +2 остывание в камере;

\*\* тонкомолотый шлак с удельной поверхностью 555 м<sup>2</sup>/кг

Таким образом, наиболее эффективным способом активации шлака в составе шлакопортландцемента (ШПЦ) является тепло-влажностная обработка, а так же повышение температуры изотермической выдержки и/или ее длительности, а применение добавок позволяет повысить прочность ШПЦ с 70 % доменного гранулированного молотого шлака на 50..67 % в 1 сутки твердения после ТВО, а в марочном возрасте на 12...30 %.

#### ВЫВОДЫ

1. Исследованный шлак отвечает требованиям ГОСТ 3476 и может быть использован как добавка в цемент, он не обладает гидравлической активностью, активизируется в смеси с портландцементом или со щелочью.
2. Изменения дисперсности шлака и химического состава практически не влияет на его активность.
3. Наиболее эффективным способом активации шлака в составе смешанного вяжущего с портландцементом является тепло-влажностная обработка, а также повышение температуры изотермической выдержки и/или ее длительности.
4. Проведенные исследования позволяют предполагать оптимальное содержание шлака в смешанном вяжущем – не более 70-80%.
5. Выявлены добавки, позволяющие повысить прочность вяжущего на ЦЕМ 1 с 70 % доменного гранулированного молотого шлака после ТВО и в марочном возрасте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Giergiczny Z. European experience of successful Portland cement with slag additive usage in construction // ALITinform. – 2013. – №4-5 – P.36-41.
2. Greet De Schutter. Hydration and temperature development of concrete made with blast furnace slag cement // Cement and concrete research. – 1999. –vol. 29, is. 1. – P. 143-149.
3. Тейлор Х. Химия цемента: перевод с английского. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
4. Rashad A.M. Hydration and properties of sodium sulfate activated slag / A.M. Rashad, Y. Bai, P.A.M. Basheer, N.B. Milestone, N.C. Coffier // Cement and concrete composites. – 2013. – vol. 37 – P. 20-29.

5. Abdelkader B. Efficiency of granulated blast furnace slag of cement according to the equivalent binder concept / B. Abdelkader, E. El-Hadj, E. Karim // Cement and concrete composites. – 2010. – vol. 32, is. 3. – P. 226-231.

6. Smolozyk H.G. The effect of chemistry of slag on the strength of blast furnace cements // Zem-Kalk-Gips. – 1978. – №31(6). – P. 294-296.

7. Bilim C. Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated furnace slag / C. Bilim, C.D. Atig // Construction and Building Materials. – 2012. – vol. 28, is. 1. – P. 708-712.

8. Islam A. The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag / A. Islam, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, I. Khair, I. Bashar // Materials and Design. – 2014. – vol. 56. – P. 833-841.

9. Chen H.J. Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag cement concretes / H.J. Chen, S.S. Huang, C.W. Tang, M.F. Malek, L-W. Ean // Construction and Materials. – 2012. – vol. 35. – P. 1063-1070.

10. Topcu I.B. High-volume ground granulated blast furnace slag concrete // Eco-Efficient concrete. – 2013. – P. 218-240.

11. Mun K.I. The effect of slaked lime, unbudrous gypsum and limestoun on properties of blast furnace slag, cement mortar and concrete / K.I. Mun, S.U. So, Y.S. Soh // Construction and Building Materials. – 2007. – vol. 21, is. 7. – P. 1576-1582.

12. Ozodabas A. Improvement of the performance of alkali activated blast furnace slag mortars with very finely ground pumice / A. Ozodabas, K. Yilmaz // Construction and Building Materials. –2013. – vol. 48. – P. 26-34.

13. Jang G.G. Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slags pastes with superplasticizers / G.G. Jang, N.K. Lee, H.K. Lee // Construction and Building Materials. – 2014. – vol. 50. – P. 169-176.

14. Sajedi F. Relationships between compressive strength of cement-slag mortars under air and water curing regimes / F. Sajedi, H.A. Rasak, H.B. Mahmud, P. Shafigh // Construction and Building Materials. – 2012. – vol. 31. – P. 188-196.

15. Sajedi F. Effect of thermal and mechanical activation methods on compressive strength of ordinary Portland cement-slag mortar / F. Sajedi, H.A. Razak // Materials & Design. – 2011. – vol. 32, is. 2. – P. 984-995.

16. Melo Neto A.A. Mechanical properties, drying and autogenous shrinkage of blast furnace slag activated lime and gypsum / A.A. Melo Neto, M.A. Cincotto, W. Repette // Cement and concrete composites.–2010.– vol. 32, is. 4. – P. 312-318.

17. Mun K.I. The effect of slaked lime, unbudrous gypsum and limestoun on properties of blast furnace slag, cement mortar and concrete / K.I. Mun, S.U. So, Y.S. Soh // Construction and Building Materials. – 2007. – vol. 21, is. 7. – P. 1576-1582.

18. Veiga K.K. Sulfate attack on a white portland cement with activated slag / K.K. Veiga, A.L.G. Gastaldini // Construction and Building Materials. – 2012. – vol. 34. – P. 494-503.

19. Rashad A. Influence of different additives on the properties of sodium sulfate activated slag // Construction and Building Materials.– 2015.– vol. 79. – P. 379-389.



20. Huang H. Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials / H. Huang, G. Ye, D. Demidot // Cement and concrete research. – 2014. – vol. 60. – P. 68-82.

21. Шлак доменный гранулированный молотый, ТУ 0799-001-99126491-2013, ООО «МЕЧЕЛ-МАТЕРИАЛЫ» 2013. – 42 с.

22. Высоцкий С.А. Эффективность тепловой обработки бетонов на шлакопортландцементах различного состава: автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва, 1978. – 28 с.

## **Ground Granulated Blastfurnace Slag and its Activation Methods**

Trofimov B.Ya., Schuldyakov K.V.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian Federation

[tbya@mail.ru](mailto:tbya@mail.ru), [Kirill-shuld@ya.ru](mailto:Kirill-shuld@ya.ru)

*Abstract.* The ground granulated slag is a wide spread component of various types of cement and binding substances. Its pozzolanic activity depends on different factors. It is searched out, that there are no minerals able to liquid maturing in the slag under consideration, the slag activity data according to domestic and foreign standards specify it as low-active, third rate. Altering of chemical composition to a small degree, specific to a definite type of slag, does not alter its activity much. The same refers to slag dispersiveness at the high rate of amorphous state – the dispersiveness rise increases slag activity and water demand, and more dispersed slag does not increase resistibility of matrix samples in high-flow concrete mix. Thus, this type of slag is supposed to be grounded up to BET surface area equal to 250-300 m<sup>2</sup>/kg, compared to dispersive capacity CEM 1, and substitution of a part of cement by slag would not work significantly on mix water demand. With increase of slag content within the cementing component the slag index of effectiveness increases and reaches

its maximum at 70 % cement replacement by slag. A large portion of slag can substantially decrease hydrate of lime in the hardened cement paste of the concrete and lessen solidity of reinforcement corrosion protection in concrete structures. The article deals with different methods of ground granulated blastfurnace slag activation within the mixed cementing substance: Portland-cement CEM1 + GGBFS. The most widely used ways of activation – the usage of sodium and potassium alkalies and liquid glass is quite effective, but it demands expensive artificial components and alkali compounds forming at hardening of such a cementing component would be soluble. Thus, the effectiveness of GGBFS thermal activation and possibility of abundant components usage.

*Keywords:* Ground granulated blastfurnace slag, activity evaluation, chemical composition, glass phase, thermal activation, activators, standard sand, Portland-cement, compression and bending strength, slag optimum in mixed cementing.

# Экономичные керамические формы в литье по выплавляемым моделям

Знаменский Л.Г., Ивочкина О.В., Варламов А.С.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[olga@lit.susu.ac.ru](mailto:olga@lit.susu.ac.ru)

**Аннотация.** При производстве отливок из сплавов химически активных металлов широко используют керамические корундовые формы на гидролизованном растворе этилсиликата, которые обладают недостаточной инертностью к заливаемым сплавам. Это связано с наличием в форме высокого содержания свободного кремнезема, являющегося в условиях вакуума сильным окислителем таких компонентов сплава как алюминий и титан. Для решения указанной проблемы предложено использование в качестве бескремнеземного связующего керамических корундовых форм алюмоборфосфатного концентрата, химически отверждаемого периклазом. Использование комбинации указанных формовочных материалов позволяет не только обеспечить химическую инертность форм, но и управлять самим процессом формообразования. Разработанная технология обеспечивает ускорение цикла изготовления форм в 4...6 раз, повышение прочности формоболочек, снижение себестоимости литья из жаропрочных сплавов. Это создает условия для значительного улучшения качества и повышение экономической эффективности изготовления точных отливок из химически активных металлов и сплавов.

**Ключевые слова:** литье по выплавляемым моделям, керамическая форма, алюмоборфосфатный концентрат, корунд, периклаз, жаропрочный никелевый сплав.

## ВВЕДЕНИЕ

В стратегических областях промышленности, таких как аэрокосмический комплекс, машиностроение и приборостроение, широко используются детали из сплавов химически активных металлов (жаропрочные никелевые и титановые сплавы, сложнoleгированные стали и другие). При этом прогрессивным способом, обеспечивающим высокую точность заготовок, является литье по выплавляемым моделям (ЛВМ). Одна из основных проблем ЛВМ химически активных металлов заключается в необходимости повышения инертности керамических форм по отношению к заливаемому сплаву в условиях вакуума.

## АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В литейных процессах сплавов химически активных металлов широко используют керамические корундовые формы на гидролизованном растворе этилсиликата (ГРЭС), которые, до недавнего времени, в целом, удовлетворяли требованиям производства.

Электрокорунд в качестве наполнителя, представленный, главным образом, фазой  $\alpha$ - $Al_2O_3$ , является одной из самых устойчивых оксидных систем при вакуумной плавке и заливке жаропрочных сплавов. Недостаточная инертность оболочек, изготовленных на этилсиликатном связующем к заливаемым сплавам, содержащим химически

активные компоненты, связана с наличием в форме высокого содержания свободного  $SiO_2$ . Кремнезем, содержащийся в облицовочных слоях формы, является в этих условиях сильным окислителем таких компонентов сплава как алюминий и титан, взаимодействуя с ними с образованием  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$ , формирующих пленки.

В зоне контакта расплавленного металла с формой в результате окисления кремнеземом компонентов сплава, выделяющийся кремний, имея малый атомный радиус, близкий по значению к атомному радиусу никеля, и высокую в нем растворимость (до 15%) способен насыщать залитый в форму металл. Наличие локальных включений Si и Fe в поверхностном слое отливки обедняет ее основными легирующими элементами – Cr, Co, W, Mo. Следует отметить, что снижение концентрации кобальта в жаропрочных сплавах уменьшает температуру растворения  $\gamma'$ -фазы и нарушает равномерность ее выделения при термообработке, ухудшая жаропрочность.

Насыщение литой поверхности кремнием резко снижает возможность повторного использования металла, так как при переплаве приводит к насыщению им расплава во всем объеме. Следовательно, кремний, содержащийся в сплаве выше допустимых пределов, в зоне насыщения изменяет характер микроструктуры сплава, что отрицательно сказывается на служебных свойствах отливок. Изучение общей дефектности отливок из жаропрочных никелевых сплавов, получаемых по выплавляемым моделям в этилсиликатных керамических формах, показало, что наибольшая доля брака приходится на точечные дефекты, поражающие литую поверхность, выражающиеся в виде фонового свечения при проведении ЛЮМ-контроля отливок.

Кроме того, этилсиликат – один из самых дорогостоящих и экологически опасных формовочных материалов в литейном производстве, а сам процесс формообразования с его применением трудоемок и длителен [1].

Для повышения химической инертности форм были предприняты попытки заменить этилсиликатное связующее другими материалами, например растворами азотнокислых солей кальция, гидроксида магния. Однако, для жаропрочных никелевых сплавов эти материалы неприемлемы, т.к. они имеют очень жесткие требования по содержанию примесей, в частности кальция и магния. При этом соединения этих элементов обладают высокой упругостью пара и крайне неустойчивы в вакууме.

Известны процессы подготовки бескремнеземного связующего «АЛЮМОКС», основанные на взаимодействии алюмоорганического соединения со спиртом и хелатиру-

ющим агентом [2]. Однако его приготовление имеет ресурсозатратный характер и характеризуется сложностью, многооперационностью, длительностью. При этом для обеспечения требуемых прочностных характеристик керамических форм необходимы повышенные температуры прокалики (1300...1400°C), что делает процесс их изготовления энергоемким.

Перспективным представляется использование в качестве бескремнеземного связующего керамических корундовых форм алюмоборфосфатного концентрата (АБФК), химически отверждаемого периклазом [3]. Использование комбинации указанных формовочных материалов позволяет не только обеспечить химическую инертность форм, но и управлять самим процессом формообразования.

В связи с этим представлялось целесообразным изучить структуру и физико-механические характеристики керамических оболочек на бескремнеземном связующем нового поколения – АБФК, и на основе полученных данных разработать технологию изготовления оболочковых керамических форм, обеспечивающую высокое качество отливок и универсальность по отношению к заливаемому сплаву наряду со снижением ресурсозатратности, повышением экологичности и сокращением производственного цикла изготовления отливок.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изготовления керамических форм с повышенными физико-механическими свойствами и технологическими характеристиками необходимыми для изготовления отливок по выплавляемым моделям был проведен ряд научных исследований, в ходе которых получен состав суспензии. Данный состав включил в себя: связующее на основе водного раствора АБФК и электрокорундовый наполнитель. Зернистый обсыпочный материал – периклаз. Основными критериями при оптимизации состава были: продолжительность цикла формообразования – 40...60 мин, прочность форм при изгибе – 4...5 МПа, газопроницаемость форм – 7...10 ед. В табл. 1 представлены основные параметры корундовых суспензий на АБФК и обсыпок.

Применение водного раствора АБФК и его отвердителя (периклаза) обеспечивает ускоренный цикл формообразования (40...60 мин) и исключение длительной сушки изготавливаемых форм и стержней вследствие химического затвердевания смеси. На рис. 1 приведена структура керамической формы, снятая на электронном растровом микроскопе JEOL JSM 6460LV с волновым анализатором.

На рис. 2 представлена дилатодиаграмма образца, изготовленного из разработанной смеси с применением электрокорунда в качестве наполнителя.

Таблица 1

Параметры корундовых суспензий на АБФК и обсыпок

Наименование параметра	Значение параметра
1. Плотность АБФК, кг/м <sup>3</sup>	1300...1400
2. Количество связующего раствора, %	30...35
3. Удельная поверхность корунда, см <sup>2</sup> /г	2500...3500
4. Дисперсность периклазовой обсыпки, мм	0,3...0,4

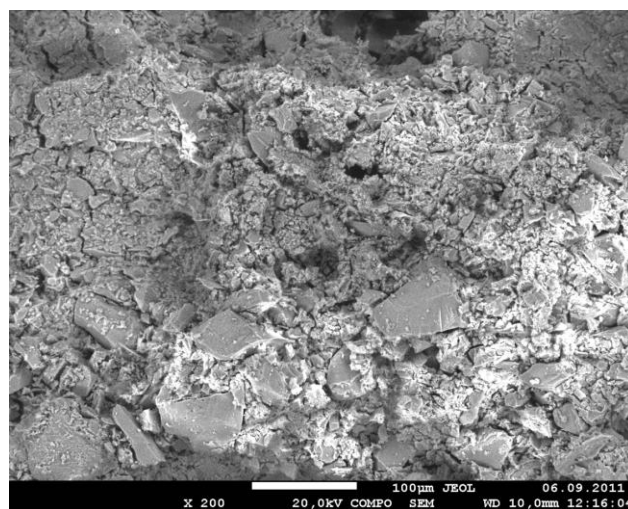


Рис. 1. Структура керамической формы (×200)

Дилатометрию формовочных смесей проводили на дилатометре «PAULIK» (Венгрия). Для этого образцы диаметром 5 мм и высотой 25 мм нагревали на воздухе со скоростью 10 °С/мин, регистрировали со временем Δl в зависимости от температуры Т (кривая Т) расширение (кривая TL) и рассчитывали относительное изменение размеров образцов в % при нагреве. Точность измерений составляла +0,1 %. Коэффициент термического линейного расширения (КТЛР) образцов при температурах 20...620 °С и 20...830 °С составляет  $1,61 \cdot 10^{-6}$  и  $3,97 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  соответственно. Разработанный состав формовочной смеси характеризуется “плавным” увеличением размеров образцов при температурах 20...600 °С, что создает условия для повышения трещиностойкости форм при нагреве, позволяет ускорить процесс прокалики и снизить энергоемкость производства отливок. Кроме того, плавное изменение размеров образцов позволяет при прокалике устанавливать формы в горячую печь без ущерба их целостности.

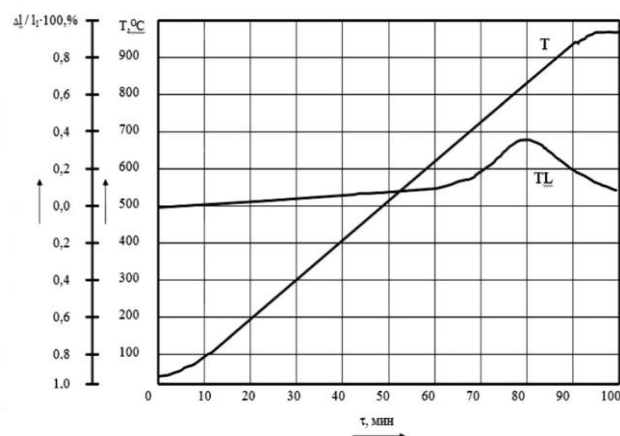


Рис. 2. Дилатометрия разработанной смеси

При проведении экспериментов было зафиксировано увеличение прочности керамических образцов при повышенных температурах и снижение ее значений на 20...30 % ниже начальных после охлаждения. В связи с этим представлялось целесообразным определить влияние температурных условий на прочность керамических образцов из разработанной смеси.

Были проведены исследования по определению горячей прочности образцов и прочности после прокатки при температуре 950 °С и последующего охлаждения. Для этого подготовленные образцы помещались в специальную лабораторную установку, в которой нагревались до определенной температуры и под действием изгибающих усилий разрушались. Приложенное усилие фиксировалось по приборной шкале. Установлено, что прочность форм после изготовления соответствует 4...5 МПа, при температуре 950 °С достигает максимального значения (6...7,5 МПа), а после полного охлаждения до 25 °С достигает значений 2...3 МПа и стабилизируется.

Высокая «сырая» прочность образцов, а также ее увеличение при прокатке, позволяют сделать вывод о возможности использования разработанной смеси для изготовления керамических оболочковых многослойных форм высокого качества и использования их для получения точных отливок из различных сплавов, в том числе, высокотемпературных и химически активных. В то же время, наблюдаемое разупрочнение форм после прокатки и охлаждения снижает трудоемкость процесса выбивки и очистки отливок от остатков керамики.

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Практическая оценка влияния состава керамической оболочки на АБФК-связующем на качество отливок «колесо рабочее» и «турбоколесо» из сплава ВЖЛ12У-ВИ проводилась в условиях ОАО СКБ «Турбина» (г. Челябинск). Результаты показали, что отливки, полученные по выплавляемым моделям в такие формы, имеют более высокое качество поверхности, в частности, существенно снижается ее фоновое свечение при исследовании методом капиллярной люминесценции. Кроме того, постоянная величина вакуума при заливке свидетельствует о стабильности компонентов форм и их низкой газотворности. Указанные достоинства формооболочек на АБФК в совокупности способствуют снижению их термохимической активности.

В табл. 2 представлено изменение химического состава образца сплава ВЖЛ12У-ВИ по основным легирующим элементам в поверхностном слое на глубине 10, 20 и

30 мкм. Анализ приведенных данных показывает, что в поверхностном слое во время заливки не происходило химических реакций, сопровождающихся растворением компонентов формы в объеме металла, о чем свидетельствует относительная стабильность состава сплава в исследуемой зоне.

Таким образом, зафиксирована химическая инертность относительно жаропрочного никелевого сплава форм, изготовленных по разработанной технологии на АБФК и возможность замены процесса с применением гидролизованного этилсиликата. Это позволит снизить дефектность отливок по неметаллическим включениям и засорам.

В табл. 3 представлены результаты испытаний технологии изготовления керамических оболочковых форм на АБФК в сравнении с базовой на гидролизованном растворе этилсиликата-40 (условное содержание SiO<sub>2</sub> в связующем 12 % для изготовления отливок из жаропрочных никелевых сплавов.

Разработанная технология обеспечивает ускорение цикла изготовления форм в 4...6 раз и повышение прочности формооболочек. Это создает условия для значительного улучшения качества и повышения экономической эффективности изготовления точных отливок из химически активных металлов и сплавов. Кроме того, следует учитывать, что алюмоборфосфатный концентрат является недорогим, недефицитным, экологически чистым материалом.

#### Выводы

В статье представлено одно из решений важнейшей технологической задачи в литье по выплавляемым моделям по полной замене дорогостоящего, экологически вредного органического этилсиликата, требующего проведения длительной операции гидролиза с применением пожароопасного этилового спирта. Разработанная технология позволяет изготавливать качественные оболочковые керамические формы на дешевом безопасном алюмоборфосфатном концентрате, причем, с физико-механическими свойствами, не уступающими этилсиликатным формам, а по выбиваемости, газопроницаемости, скорости формообразования существенно их превышающими. В результате создаются условия для улучшения качества изготовления точных отливок ответственного назначения, в том числе из химически активных сплавов.

Таблица 2

Химический состав поверхностного слоя образца из сплава ВЖЛ12У-ВИ

Глубина сканирования, мкм	Содержание элементов, %									
	Al	Si	P	S	Ti	V	Cr	Co	Ni	W
10	5,50	0,020	0,046	0,0030	4,36	0,79	10,07	14,65	62,24	1,51
20	5,67	0,018	0,051	0,0010	3,43	0,89	9,23	14,61	62,83	2,45
30	5,47	0,021	0,042	0,0013	3,50	0,85	9,94	14,84	62,74	1,82



Таблица 3

Свойства керамических форм и отливок, затраты на их изготовление

Наименование свойств	Базовая технология	Разработанная технология [4]
1. Газопроницаемость керамической оболочки, ед.	2...4	7...8
2. Продолжительность изготовления оболочки, ч	24	4...6
3. Прочность образцов на изгиб, МПа	2,8...3,0	4,5...5,0
4. Прочность образцов на изгиб после прокалики при 900 °С, МПа	4,0...4,8	6,8...7,5
5. Остаточная прочность (выбиваемость) образцов, МПа	3,3...3,5	2,0...2,5
6. Толщина видоизмененного слоя на поверхности отливок, мкм	50...80	0...10
7. Затраты на изготовление 1 кг форм, руб.	92,81	64,40
8. Затраты на изготовление 1 т отливок, тыс. руб.	6680,23	4965,45

ЛИТЕРАТУРА

1. Чуркин Б.С. Специальные способы литья: учебник. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. – 731 с.
2. Моисеев В.С. Повышение качества литых лопаток ГТД / В.С. Моисеев, М.С. Варфоломеев, А.С. Муркина, Г.И. Щербакова // Литейщик России. – 2012. – № 5. – С. 36-38.
3. Илларионов И. Е. Металлофосфатные связующие и смеси: монография. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 1995. – 524 с.
4. Знаменский Л.Г., Ивочкина О.В., Верцюх С.С. Способ изготовления форм по выплавляемым моделям (варианты) // Патент России № 2478453. 2013. Бюл. № 10.

# Economical Ceramic Molds in Investment Casting

Znamenskij L.G., Ivochkina O.V., Varlamov A.C.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian Federation

[olga@lit.susu.ac.ru](mailto:olga@lit.susu.ac.ru)

**Abstract.** Ceramic corundum molds on hydrolysed ethyl silicate solution which have insufficient inertness to poured alloys are widely used in the production of castings from reactive metals alloys. This is due to the presence of free silica, which is a strong oxidant of such alloy components as aluminium and titanium in vacuum conditions, in the form of a high content. To solve the indicated problem it was suggested using aluminium-borophosphate concentrate, chemically cured with periclase, as a silica free binder of ceramic corundum molds. The use of the combination of the indicated mold materials allows not only to enable chemical inertness of the molds, but to operate the process

of mold forming. Developed technology provides the acceleration of the mold manufacturing cycle in 4...6 times, increase the strength of the mold covers, reduction of the heat-resistant alloy casting cost. It enables significant improvement of the quality and increase of the economic efficiency of manufacturing of precision casting from reactive metals and alloys.

**Keywords:** investment casting, ceramic mold, aluminium-borophosphate concentrate, corundum, periclase, heat-resistant nickel alloy.

# Компьютерное моделирование литья титан-алюминиевого интерметаллидного сплава

Кулаков Б.А., Дубровин В.К., Карпинский А.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация

[kulakovba@susu.ac.ru](mailto:kulakovba@susu.ac.ru)

**Аннотация.** Рассмотрен процесс моделирования центробежного литья интерметаллидных титан-алюминиевых сплавов на примере турбинной лопатки тракта низкого давления газотурбинного двигателя. Изначально при разработке технологии производства отливки были проведены предварительные теоретические расчеты и опытные заливки. Полученные результаты позволили задать ряд граничных условий для проведения компьютерного моделирования заливки и затвердевания. Для моделирования была использована система компьютерного моделирования литейных процессов ProCast. С помощью этой системы были проверены различные варианты расположения отливки в форме и конфигураций литниково-питающей системы. В ходе моделирования выявлены такие недостатки, как образование усадочных дефектов в бандажной полке и (или) в замке лопатки; либо, при увеличении размеров прибылей или уменьшении количества отливок в форме, значительное уменьшение технологического выхода годного. В итоге с учетом результатов проведенных компьютерных экспериментов удалось определить наиболее рациональную литниковую систему для получения отливок из интерметаллидных титан-алюминиевых сплавов методом центробежного литья.

**Ключевые слова:** центробежное литье, компьютерное моделирование, интерметаллиды, титановый сплав, литниковая система, лопатка турбинная, двигатель газотурбинный.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время с развитием технологий все более возрастают требования к изделиям машиностроения. В частности, к отливкам, к их качеству, химсоставу, механическим свойствам и себестоимости. С целью выполнения этих требований в разработке современных технологических процессов литья целесообразно использовать CAE моделирующие программные комплексы [1-3]. CAE комплексы работают совместно с CAD системами, в которых предварительно создается 3D модель отливки вместе с литниковой системой. Процессы моделирования основываются на физических законах гидравлики и теплопередачи. При наличии каких либо реальных практических данных их рекомендуется учитывать при задании граничных условий для моделирования.

В авиационном моторостроении существует тенденция перевода материалов деталей на новые титановые интерметаллидные сплавы, имеющие невысокую плотностью и способные работать при температурах до 750 °С.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Процесс компьютерного моделирования литья из таких сплавов был изучен на примере одной из наиболее перспективных отливок из титан-алюминиевого интерме-

таллидного сплава – турбинной лопатки тракта низкого давления газотурбинного двигателя. Эта лопатка имеет тонкое и длинное перо, которое практически невозможно пролить при заполнении формы металлом под действием гравитационных сил. Кроме того в начале пера имеется массивный тепловой узел – замок для присоединения лопатки к диску, а на конце бандажная полка, также имеющая большой объем металла. Турбинная лопатка, по модели которой осуществлялся процесс моделирования, имеет массу 550 грамм и общую длину 310 мм.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Литье турбинных лопаток из титановых интерметаллидных сплавов ведется в вакуумных плавильно-заливочных установках, в которых металл заполняет форму под действием центробежных сил. Для моделирования заливки и затвердевания такой лопатки был выбрана система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) ProCast. Эта система позволяет проводить моделирование процесса центробежного литья, а также в базе данных ProCast присутствуют необходимые материалы, в частности, интерметаллидный сплав и керамическая форма.

При расчетах в СКМ ЛП ProCast используется метод конечных элементов, что в отличие от метода конечных разностей обеспечивает более точную геометрию модели после создания объемной сетки. Это особенно важно в тонких частях отливки, где даже небольшие нарушения геометрии значительно сказываются на полученных результатах. Программа также позволяет рассчитать тепловые поля в отливке и форме, оценить напряжения, возникающие в отливке и металлической оснастке. Кроме этого программный комплекс способен рассчитать циклические нагрузки при центробежном литье. Течение расплава рассчитывается полным уравнением Навье-Стокса и может проводиться вместе с анализом температуры и напряжений. Комплекс проводит анализ турбулентных потоков, позволяет получить представление о характере заполнения формы расплавом, размывании формы, воздушных карманах, засорах, непроливах и холодных спаях.

Предварительные теоретические расчеты [4] и практические данные показали, что прибыль необходимо располагать ближе к оси вращения по отношению к питаемому узлу отливки, необходимая скорость вращения для заливки полости формы составляет около 200 об/мин. При меньшей скорости вращения наблюдались непроливы в форме, особенно в пере лопатки, максимальная толщина которого 2,5 мм. Если задать скорость вращения более 200

об/мин, то возрастает давление на стенку формы и при наличии термоудара повышает вероятность ее разрушения. При задании граничных условий в ProCast ориентировались на полученные практические и теоретические данные.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Моделирование проводилось для скорости вращения 200 об/мин по часовой стрелке, металл заливался в уже раскрученную до максимального числа оборотов форму, температура расплава перед заливкой – 1640 °С, температура формы – 700 °С. Использовались стандартные материалы, представленные в базе данных ProCast – сплав «Ti\_45.5at%Al\_8at%Nb» и керамическая оболочковая форма «Refractory Alumia».

С помощью ProCast были проверены различные варианты расположения отливки в форме и конфигурации ЛПС. По результатам моделирования выявлены такие недостатки, как образование усадочных дефектов в бандажной полке и (или) в замке лопатки; либо, при увеличении размеров прибылей или уменьшении количества отливок в форме, значительное уменьшение технологического выхода годного (ТВГ), что экономически нецелесообразно.

По результатам проведенных компьютерных экспериментов удалось определить наиболее рациональную литниковую систему для получения отливок из интерметаллидных титан-алюминиевых сплавов методом центробежного литья.

В таком варианте используется прибыль минимально необходимых размеров, при этом, чтобы прибыль качественно сработала, лопатка располагается в форме так, чтобы бандажная полка вместе с установленной на ней прибылью была приближена к оси вращения. Питатель подводится в замок лопатки и имеет коническую форму. Эти меры позволили вывести усадочные раковины из замка и бандажной полки, соответственно, в питатель и в прибыль. С целью повышения ТВГ в одном блоке размещается 16 лопаток, как показано на рис. 1. ТВГ при этом составляет 58,5 %, что почти в 3 раза больше, чем при схеме, когда в форме располагается по 4 отливки – по одной на литниковом ходе. Основные размеры блока отливок приведены на рис. 2.

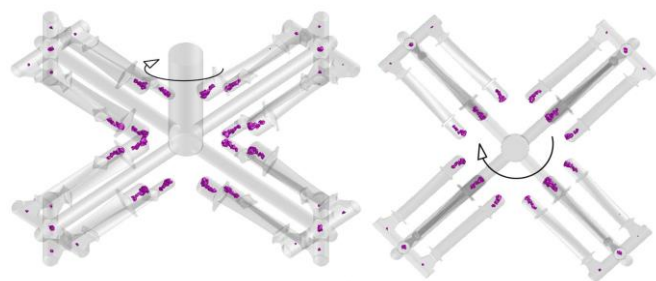


Рис. 1. Схема расположения лопаток и усадочных раковин с обратным направлением заполнения

Как видно (см. рис.1) при использовании данной литниковой системы тело отливок получается без усадочных раковин. Усадка (см. рис.1, темные участки) наблюдается только в прибылях и литниковых ходах.

Результаты моделирования показали, что на протяжении всего периода заполнения формы температура расплава была выше температуры ликвидус (1586 °С по данным ProCast), то есть металл полностью, без затруднений заполняет форму.

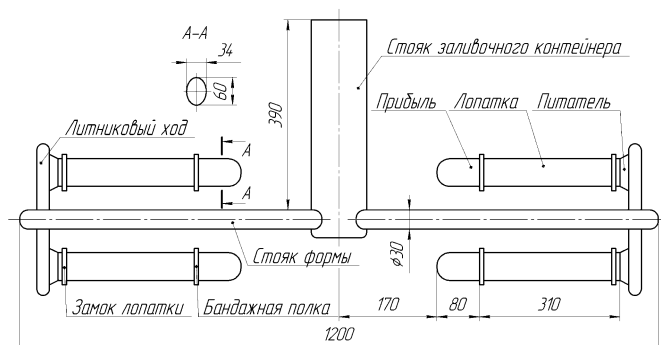


Рис. 2. Основные размеры блока отливок

Моделирование гидравлических процессов показало, что расплав течет в форме без завихрений, по ламинарному режиму. Заполнение происходит от дальней стенки полости формы к центру вращения всех отливок, что обеспечивает их одинаковые физико-механические свойства (рис. 3).

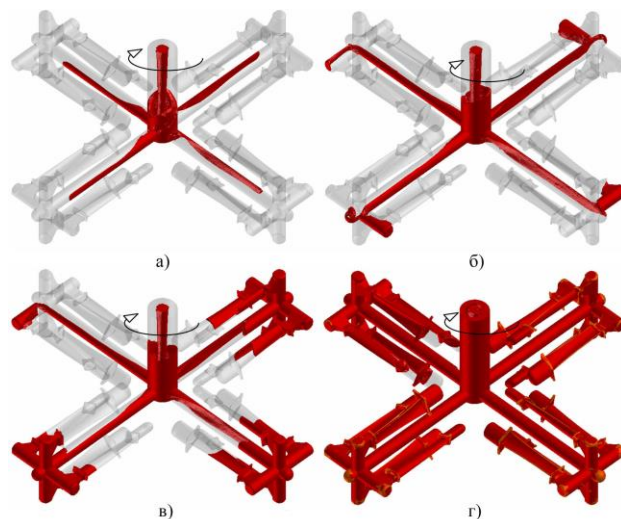


Рис. 3. Этапы процесса заполнения полости формы для 16 отливок: а – 0,39 с; б – 0,94 с; в – 1,95 с; г – 3,88 с

Полностью кристаллизация металла в полостях отливок, питателей, литниковых ходов и стояка формы происходит после 102 секунды моделирования, однако в стояке заливочного контейнера жидкая фаза присутствует дольше из-за его значительного объема.

Результаты моделирования также показали, что увеличение скорости вращения формы с 200 до 400 об/мин приводит к повышению скорости потока металла с 9,4 м/с до 18,7 м/с, давления металла на стенки формы с 5 до 12 бар, турбулизации потока металла. На процессы формирования усадочных дефектов увеличение скорости вращения влияния практически не оказывает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стоит отметить, что в реальных условиях заливки форм результаты могут несколько отличаться от полученных моделированием, так как программный комплекс ProCast не учитывает ряд свойств литейной формы и сплава (к примеру, точный состав формовочной смеси), что может незначительно изменить характер движения расплава и интенсивность теплоотвода через форму. Разработанная литниковая система более всего подходит для тонкостенных отливок типа крыльчаток, лопаток и им подобным. Для обеспечения направленной кристаллизации отливки рекомендуется располагать ее массивными узлами к оси вращения, а также обеспечить металлостатический подпор для каждой отливки в форме ее литниковой системой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлинич С.П. Интерметаллид Ti-Al начинает путь в российскую авиацию / С.П. Павлинич и др. // Литейщик России. – 2014. – №3. – С. 24-27.
2. Yanga L. Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high Nb-TiAl alloy / L. Yanga and etc. // Intermetallics. – 2015. – Vol. 66. – P. 149-155.
3. Nourbakshnia N. Numerical simulation and experimental investigation of the failure of a gas turbine compressor blade / N. Nourbakshnia, S. Ziaei-Rad, A. Kermanpur, H. Sepehri Amin // Key Engineering Materials. – 2008. – Vol. 385-387. – P. 401-404.
4. Кулаков Б.А. Влияние расположения отливок на параметры заполнения форм при центробежном литье / Б.А. Кулаков, А.А. Чесноков, В.К. Дубровин, А.В. Карпинский // Литейщик России. – 2014. – №3. – С. 24-27.

## Computing Simulation of Casting Using Titanium Aluminide Intermetallic Alloys

Kulakov B.A., Dubrovin V.K., Karpinskiy A.V.  
South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[kulakovba@susu.ac.ru](mailto:kulakovba@susu.ac.ru)

**Abstract.** The simulation process of centrifugal casting using titanium aluminide intermetallic alloys has been described in the context of the low-pressure duct turbine blade designed for the gas-turbine engine. Initially, the preliminary theoretical calculations have been performed together with experimental casting when developing the casting production technologies. Obtained results allowed setting a range of the boundary conditions for computing simulation of pouring and solidification. ProCast the computing simulation system for the casting processes has been used. The various alternatives of the casting layout in the mold as well as the gating system configurations have been examined by applying this system. In the course of simulation process such faults have been detected as formation of shrinkages into the

shroud platform and (or) blade footing; or significant decrease in technological yield when the risers' dimensions expand or the casts' number decreases in the mold. Considering the results of the performed computer experiments, the most efficient gating system has been ultimately defined to obtain the casts using titanium aluminide intermetallic alloys by centrifugal casting.

**Keywords:** centrifugal casting, computing simulation, intermetallics, titanium alloy, gating system, turbine blade, gas-turbine engine



# Совершенствование тренажеров осуществляющих имитацию на Земле перемещений в условиях невесомости и пониженной гравитации\*

Пятибратов Г.Я., Бекин А.Б., Богданов Д.Ю.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
г. Новочеркасск, Российская Федерация

[g.pyatibratov@mail.ru](mailto:g.pyatibratov@mail.ru)

**Аннотация.** В работе рассмотрены особенности создания и функционирования систем перемещения объектов в рабочем пространстве тренажеров для подготовки космонавтов к выполнению работ по внекорабельной деятельности в условиях невесомости и пониженной гравитации. Рассмотрены принципы построения систем управления горизонтальными перемещениями космонавтов при имитации движений в условиях невесомости и пониженной гравитации. Обоснована необходимость применения электромеханических систем для компенсации сил трения и сил инерции от дополнительно присоединённых к объекту обезвешивания масс при создании перспективных тренажеров. Предложена структура системы управления, которая содержит обратные связи по току и скорости электродвигателя, а также по усилию в ременной передаче и углу отклонения канатной передачи от вертикали. Предоставлены результаты синтеза структуры системы управления перемещениями космонавтов в рабочем пространстве тренажеров, а также параметры корректирующих устройств, обеспечивающих демпфирование упругих колебаний в механизмах.

**Ключевые слова:** тренажер, имитация невесомости, электропривод, синтез, система управления усилиями.

## ВВЕДЕНИЕ

Для выполнения программ по освоению Солнечной системы (околоземного пространства, поверхностей Луны и Марса) космонавты должны получить необходимые навыки и пройти обучение на специально созданных для этого тренажных комплексах. Поэтому для повышения уровня подготовки космонавтов к работе в условиях невесомости или пониженной гравитации, необходимы тренажеры с высокими качественными характеристиками и широкими функциональными возможностями.

При обучении космонавтов элементам внекорабельной деятельности (ВКД) при длительном пребывании в штатных скафандрах с использованием различного оборудования, предназначенного для работы в открытом космосе или на планетах, силы гравитации на которых меньше сил гравитации на Земле, целесообразно использовать тренажеры с электромеханическими системами перемещения объектов (СПО) [1]. В таких тренажерах имитация движений космонавта в условиях невесомости или пониженной гравитации, осуществляется системой компенсации силы

тяжести и других составляющих усилий, препятствующих движению космонавта.

При создании СПО сложное пространственное перемещение космонавта в рабочем пространстве тренажера разделено на вертикальные и горизонтальные составляющие, а также на вращения и качения относительно центра масс. Воспроизведение вертикальных перемещений космонавта в скафандре с требуемыми скоростями и ускорениями, а также компенсацию его веса (полную или частичную) обеспечивает система вертикальных перемещений (СВП), которая реализована с использованием гибкого подвеса, обычно, в виде стального каната. Воспроизведение горизонтальных перемещений космонавта в скафандре обеспечивает система горизонтальных перемещений (СГП).

В тренажерах с электромеханическими СПО воспроизведение перемещений космонавта в скафандре с требуемыми скоростями и ускорениями определяется только мышечными усилиями космонавта. При этом важной задачей СГП является компенсация сил трения в её механизмах и минимизация влияния на параметры движения космонавта в скафандре моментов инерции дополнительно присоединенных к объекту обезвешивания масс.

## АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В настоящее время в ФГБОУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» (Звездный городок, Московская область) эксплуатируется тренажер «Выход-2». Данный тренажер используется для отработки космонавтами операций по выходу в открытый космос и внекорабельной деятельности в условиях невесомости, а также для осуществления работ по управлению системами скафандра в штатных и нештатных ситуациях [2].

Тренажер «Выход-2» имеет по две независимо работающих СВП и СГП, в которых сложное пространственное перемещение космонавта в скафандре разделено на вертикальные и горизонтальные составляющие. На тренажёре «Выход-2» движения космонавта в скафандре общей массой до 250 кг в условиях невесомости выполняются при значении усилий (30-40) Н, что позволяет космонавту перемещаться с максимальными скоростями до 0,4 м/с и ускорениями до 0,2 м/с<sup>2</sup> [3].

\* Результаты работы получены при поддержке проекта № 2878 «Развитие теории и практики создания электротехнических систем тренажёрных комплексов и мобильных объектов», выполняемого в рамках базовой части государственного задания № 2014/143.

На рис.1 показан Внешний вид тренажера «Выход-2».



Рис. 1. Внешний вид тренажера «Выход-2»

Каждая СВП тренажера «Выход-2» реализована с использованием частотно-регулируемого электропривода (ЭП) с синхронным электродвигателем с постоянными магнитами (СДПМ). Высокоточная система регулирования усилия в канатной подвеске скафандра обеспечивает вертикальные перемещения космонавта в скафандре с требуемыми скоростями и ускорениями в рабочей зоне только за счет мышечных усилий, а также требуемую степень обезвешивания. Анализ и выполненные эксперименты показали, что технические решения по реализации СВП тренажера «Выход-2» могут быть успешно применены при создании перспективного тренажера [4].

Механизмы перемещения моста и тележки тренажера «Выход-2» выполнены с применением пневматических опор на воздушной подушке, что позволяет обеспечить коэффициент трения 0,004-0,005 и уменьшить силы трогания при совершении космонавтом горизонтальных перемещений. Однако с увеличением ускорений при горизонтальном перемещении космонавта в скафандре значительно возрастает влияние сил инерции тележки и, особенно, моста на параметры его движения. Поэтому СГП перспективных тренажеров необходимо выполнять с использованием активных способов компенсации сил инерции от дополнительно присоединенных к объекту обезвешивания масс.

Анализ перспективных задач подготовки космонавтов показал, что тренажер «Выход-2» не имеет возможности обеспечить имитацию движений космонавта в скафандре, аналогичных движениям в гравитационных условиях Луны и Марса [5]. Поэтому для создания тренажеров нового поколения, предназначенных для подготовки космонавтов к выполнению лунной и марсианской программ необходимо создать СГП, способную обеспечить перемещение космонавтов с повышенными скоростями и ускорениями.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Выполненный анализ [6] показал, что перспективный тренажер для подготовки космонавтов должен обеспечивать перемещения космонавта в скафандре с максимальными вертикальными скоростями и ускорениями до 1,8 м/с и до 5,8 м/с<sup>2</sup>, горизонтальными – до 2,1 м/с и до 7,4 м/с<sup>2</sup>.

В работе [7] для минимизации масс, дополнительно присоединенных к объекту обезвешивания, в СГП создаваемых тренажеров рекомендуется использовать ЭП с ременными передачами, что позволит повысить качество имитации перемещений космонавта в скафандре соответствующих реальным условиям. С этой целью рекомендованы следующие подходы реализации СВП и СГП:

- а) электромеханический модуль СВП рекомендуется вынести на конструкцию моста, запасовку каната осуществить с использованием полиспафта;
- б) электромеханический модуль СГП тележки рекомендуется вынести на конструкцию моста;
- в) электромеханический модуль СГП моста рекомендуется вынести на конструкцию СПО.

Данное конструктивное решение позволяет существенно уменьшить механическую инерционность приводов СГП, но может привести к появлению упругих колебаний в ременной передаче. В связи с этим появляется необходимость исследования систем управления электроприводов СГП с учётом упругих свойств механизмов. При этом из-за изменения эквивалентной жёсткости ременной передачи изменяются обобщенные параметры объекта управления, которые зависят от положения космонавта в рабочем пространстве тренажера.

Сложные кинематические схемы механизмов СГП с большими передаточными числами обуславливают значительные силы трения. Так как механическая инерционность электроприводов тележки и моста разная, то необходимо в системе управления СГП предусмотреть способы и средства для выравнивания ошибок по скорости и ускорению для этих координат. Применение канатных передач в СВП приводит к качаниям космонавта на гибком подвесе. Движения космонавта в скафандре осуществляется только под действием его мышечных усилий, что определяет необходимость решения задачи синтеза СГП по возмущающему воздействию.

С учётом перспективных задач подготовки космонавтов к действиям в условиях невесомости и пониженной гравитации и особенностей функционирования СГП определим рациональную структуру системы управления.

#### ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ КОСМОНАВТОВ

При решении задачи синтеза структуры СГП необходимо рассмотреть сложный, с несколькими внутренними перекрёстными обратными связями, нелинейными характеристиками и изменяющимися параметрами объект управления, который обладает колебательными свойствами и работает в условиях случайных силовых воздействий. Для повышения качества имитации перемещений космонавта в скафандре в условиях невесомости и пониженной гравитации необходимо:

- 1) обеспечить уменьшение влияния упругих колебаний усилий в ременных передачах СГП тележки и моста;
- 2) компенсировать силы трения покоя и движения в механизмах;
- 3) минимизировать влияние механической инерционности электропривода тележки и моста на ошибку по ускорению;
- 4) устранить качания космонавта на гибком подвесе.

Проблема структурного синтеза систем автоматического управления сложна и в настоящее время не имеет общего решения. Поэтому определение структуры СГП и обоснование применения необходимых обратных связей выполним с учётом их функционального назначения и возможностей практической реализации.

В качестве примера рассмотрим СГП тележки в которой электропривод реализован с применением СДПМ серии High Dynamic фирмы Siemens типа 1FK7033-5AF21 (380 Вm; 314 рад/с; 1,2 Н·м;  $J_D = 0,27 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>;  $m_D = 3,1$  кг). Ременная передача выполнена с использованием зубчатого ремня ALPHA Linear H50 фирмы Optibelt.

Для получения обобщенных результатов все скорости отнесены к скорости холостого хода СДПМ  $\omega_{до}$ , а все моменты и силы – к номинальному моменту  $M_{ДН}$ . При этом с целью приведения угла отклонения каната СВП от вертикали при перемещении тележки к относительным единицам рекомендуется использовать базовое значение:

$$\alpha_{Б\_X} = \frac{M_{ДН\_X}}{(m_0 + m_{\Pi}) \cdot g \cdot \rho_X} \quad (1)$$

В табл. 1 приведены параметры обобщенной математической модели СГП тележки, необходимые для решения задачи синтеза системы управления горизонтальными перемещениями космонавта в скафандре.

С целью уменьшения влияния электромагнитной инерционности ЭП, ослабления нежелательного влияния противоЭДС, стабилизации электромагнитного момента электродвигателя (ЭД) и реализации функций токоограничения предлагается использовать отрицательную обратную связь (ООС) по току ЭД. При этом рекомендуется использовать пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) тока [8], обеспечивающий быстрое действие ЭП необходимое для активного демпфирования упругих колебаний в ремённой передаче.

Таблица 1

Параметры обобщенной математической модели СГП тележки

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Механическая постоянная времени ЭММ, с	$T_X$	0,039
Механическая постоянная времени тележки, с	$T_T$	0,368
Механическая постоянная времени объекта, с	$T_{о\_X}$	3,017
Постоянная времени, учитывающая диссипативные свойства ременной передачи, с	$T_{д\_ДТ}$	0,006
Постоянная времени, учитывающая упругие свойства ременной передачи, с	$T_{с\_ДТ}$	0,005
Постоянная времени, учитывающая диссипативные свойства качаний объекта, с	$T_{д\_ГО}$	0,001
Постоянная времени, учитывающая качания объекта, с	$T_{с\_ГО}$	0,27
Постоянная времени, учитывающая инерционность преобразователя, с	$T_{п\_X}$	0,00075
Электрическая постоянная времени электродвигателя, с	$T_{э\_X}$	0,0049
Электрический коэффициент передачи электродвигателя, о.е.	$k_{э\_X}$	29,73

В соответствии с рекомендациями реализации контура регулирования тока ЭД при активном демпфировании упругих колебаний усилия параметры ПИ-регулятора тока в виде:

$$W_{PT}(s) = \frac{0,0049 \cdot s + 1}{0,0446 \cdot s} \quad (2)$$

Для уменьшения колебаний динамической составляющей усилия в ремённой передаче необходимо использовать гибкую ООС по усилию, которая позволит повысить надёжность и долговечность работы механизма. Выбор структуры и параметров корректирующего устройства (КУ) необходимо определять в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [9], в виде:

$$W_{KVI\_X}(s) = \frac{0,03 \cdot s}{0,005 \cdot s + 1} \quad (3)$$

Рассмотрим структурную схему системы управления горизонтальными перемещениями тележки с ООС по току ЭД и с ООС по усилию в ременной передаче, показанную на рис. 2.

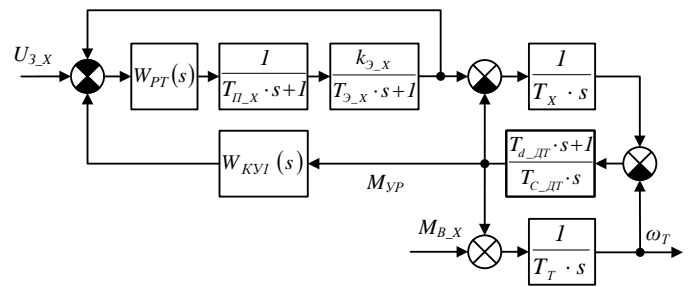


Рис. 2. Структурная схема СГП тележки с ООС по усилию в ременной передаче

На рис. 3 приведены результаты активного демпфирования упругих колебаний усилия в ременной передаче СГП тележки при внешнем ступенчатом возмущающем воздействии  $M_{в, X} = 1,23$  о.е. продолжительностью 1 с действующем на тележку.

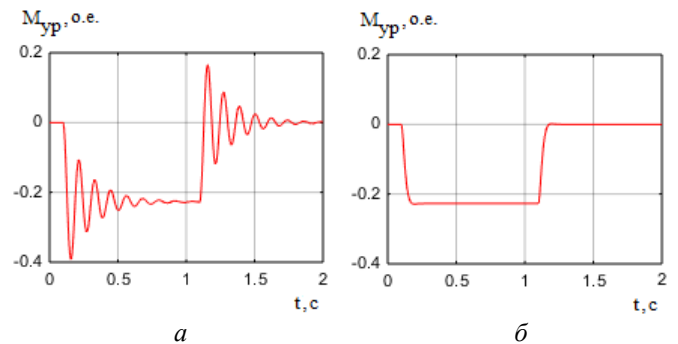


Рис. 3. Переходные процессы по моменту от усилия в ременной передаче  $M_{уп}$  в СГП тележки: а – без ООС по усилию; б – с ООС по усилию

На рис. 3, а наибольшее амплитудное значение колебаний усилия в ременной передаче составляет 72 % от установившегося значения, а время переходного составляет 0,5 с. Использование ООС по усилию в ременной передаче и КУ с рекомендуемыми параметрами позволяют полностью демпфировать колебания (рис. 3б). При этом время переходного процесса составляет 0,08 с, что в 6,25 раза меньше, чем в системе без ООС по усилию.

Рассмотрим структурную схему системы управления горизонтальными перемещениями космонавта в ска-



фандре, показанную на рис. 4, которую рекомендуется применять при значительной жесткости ременной передачи привода СГП тележки, например, при использовании ремня ALPHA Linear H150.

Главная отрицательная обратная связь по углу отклонения каната СВП от вертикали обеспечивает получение заданных статических и динамических показателей работы СГП. Синтез структуры и параметров корректирующего устройства с использованием фактических значений угла предлагается выполнять с применением графоаналитических методов и обратных частотных характеристик по методике, приведенной в работе [10] или с использованием методов оптимального управления [11].

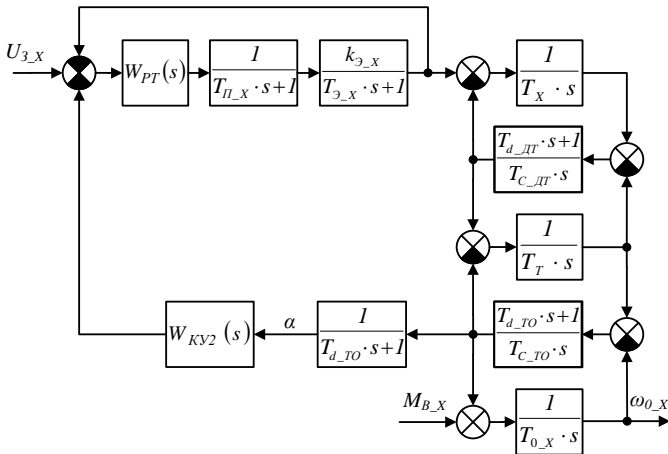


Рис. 4. Структурная схема СГП тележки с ООС по углу отклонения каната СВП от вертикали

В соответствии методикой синтеза приведенной в [10] получена передаточная функция корректирующего устройства по углу отклонения каната СВП от вертикали

$$W_{KV2}(s) = 4 + 4,5 \frac{1}{s} + \frac{2 \cdot s}{0,005 \cdot s + 1} \quad (4)$$

На рис. 5 приведены результаты уменьшения упругих колебаний угла отклонения каната при ступенчатом возмущающем воздействии  $M_{B,x} = 1,23$  о.е. продолжительностью 10 с приложенным к объекту обезвешивания.

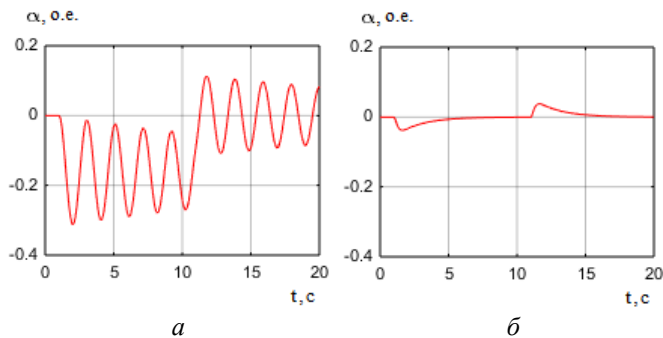


Рис. 5. Переходные процессы угла отклонения каната: а – без ООС по углу; б – с ООС по углу

На рис. 5, а установившееся значение угла отклонения каната составляет 0,16 о.е., а перерегулирование достигает 96 %. При этом упругие колебания угла носят слабозатухающий характер. Использование ООС по углу и КУ с

рекомендуемыми параметрами позволяют минимизировать отклонения каната СВП от вертикали (рис. 5, б). Перерегулирование составило 4 %, а время переходного процесса 3 с.

Рассмотрим структурную схему системы управления горизонтальными перемещениями космонавта в скафандре, показанную на рис. 6, которую рекомендуется применять при использовании в ременной передаче привода СГП тележки менее жесткого ремня, например, при использовании ремня ALPHA Linear H50. В этом случае целесообразно применять обратную связь по усилию в ременной передаче и корректирующее устройство с передаточной функцией  $W_{KV1}(s)$ .

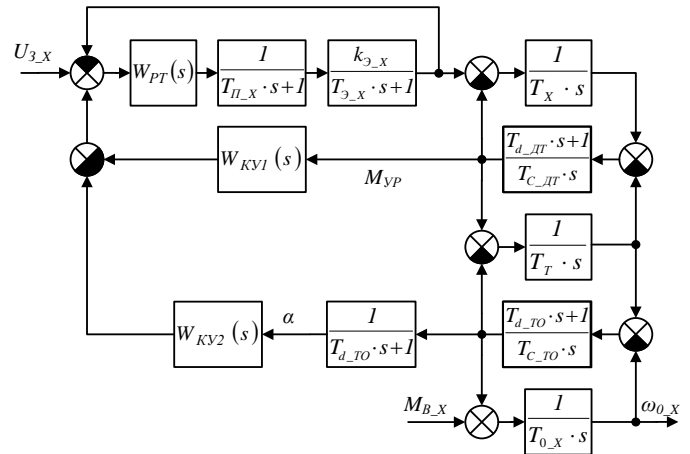


Рис. 6. Структурная схема системы управления горизонтальными перемещениями космонавта

На рис. 7 приведены переходные процессы по усилию в ременной передаче при ступенчатом внешнем возмущающем воздействии на обезвешиваемый объект.

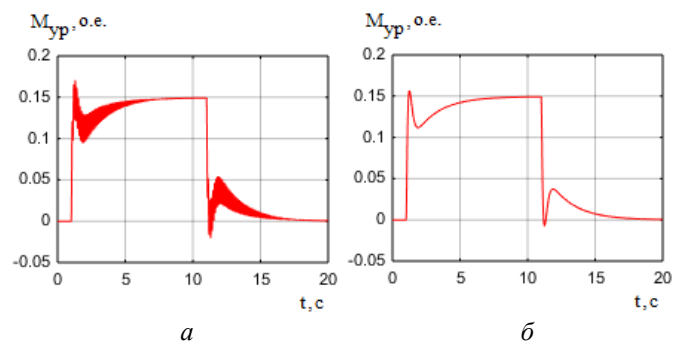


Рис. 7. Переходные процессы по моменту от усилия в ременной передаче  $M_{yp}$  в СГП тележки с ООС по углу: а – без ООС по усилию; б – с ООС по усилию

В системе с ООС по углу отклонения каната СВП без ООС по усилию имеются колебания в ременной передаче СГП тележки частотой 4 Гц (рис. 7, а). Однако при введении ООС по усилию данные колебания полностью устраняются (рис. 7, б).

Для компенсации нежелательного влияния противоЭДС двигателя на процессы управления в СГП рекомендуется использовать положительную обратную связь по скорости электродвигателя [10].



Для идентичности параметров движения космонавта в рабочем пространстве тренажёра по разным направлениям, реализуемых электроприводами горизонтальных перемещений тележки и моста, рекомендуется использовать обратную связь по ускорению двигателя, что позволит обеспечить одинаковые ошибки по ускорению для всех координат системы [11].

Для компенсации влияния сил вязкого трения в механизмах на работу СГП необходимо использовать положительную обратную связь по скорости двигателя, а для уменьшения сил сухого трения предлагается использовать нелинейное управление с переключающейся структурой. Рекомендации по реализации и настройке систем при компенсации сил трения в механических передачах приведены в работе [12].

При практической реализации многоконтурной системы управления СГП необходимо согласовать быстродействие всех контуров регулирования. Внедрение предлагаемых способов и технических решений реализации позволит создавать современные тренажёры для подготовки космонавтов к решению задач освоения космоса.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов выполненных исследований позволяет сделать следующие основные выводы:

1. При создании СГП перспективных тренажёров для подготовки космонавтов к действиям в условиях невесомости и пониженной гравитации необходимо применять активные способы компенсации сил трения и сил инерции от дополнительно присоединённых к объекту обезвешивания масс.

2. В общем случае, система управления горизонтальными перемещениями космонавта в скафандре должна иметь обратные связи по току двигателя, усилию в ремённой передаче механизма передвижения тележки или моста, по скорости и ускорению электродвигателя, а также главную обратную связь по углу отклонения каната механизма СВП от вертикали.

3. Предлагаемая структурная схема СГП с рекомендованными параметрами регуляторов и корректирующих устройств позволяет обеспечить требуемое качество управления перемещениями космонавта в рабочем пространстве перспективного тренажёра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пятибратов Г.Я. Способы реализации и направления совершенствования тренажёров для подготовки космонавтов к работе в невесомости / Г.Я. Пятибратов, О.А. Кравченко, В.П. Папирык // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – №5. – С. 70-76.

2. <http://www.gctc.ru/main.php?id=2894> (дата обращения 25.07.2015).

3. Барыльник Д.В. Силокомпенсирующие системы с электроприводами переменного тока тренажёрных комплексов подготовки космонавтов / Д.В. Барыльник, Г.Я.

Пятибратов, О.А. Кравченко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012.

4. Пятибратов Г.Я. Проблемы и перспективы создания тренажёра для подготовки космонавтов к действиям на планетах с пониженной гравитацией / Г.Я. Пятибратов, Н.А. Сухенко, Д.В. Богданов, Н.А. Бачмановский // Пилотируемые полёты в космос: матер. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. (Звёздный городок, 27 ноября 2013 г.). – Звёздный городок, 2013. – С. 256-258.

5. Пятибратов Г.Я. Задачи совершенствования тренажёра «Выход 2» для решения задач по оценке физической готовности космонавтов к деятельности на Марсе / Г.Я. Пятибратов, Д.В. Барыльник, А.Б. Бекин, Н.Р. Жамалетдинов // Пилотируемые полёты в космос: матер. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. (Звёздный городок, 27 ноября 2013 г.). – Звёздный городок, 2013. – С. 258-260.

6. Пятибратов Г.Я. Электромеханические системы специальных тренажёров, обеспечивающих отработку космонавтами перемещений на планетах с пониженной гравитацией / Г.Я. Пятибратов, А.М. Киво, О.А. Кравченко // АЭП - 2012: тр. VII Междунар. (XVI II Всерос.) науч. конф. по автоматизированному электроприводу. (Иваново, 2–4 октября 2012 г.). – Иваново, 2012. – С. 612-616.

7. Бекин А.Б. Обоснование рациональной конструкции и выбор электроприводов тренажёров для подготовки космонавтов к действиям в условиях пониженной гравитации / А.Б. Бекин, Г.Я. Пятибратов, О.А. Кравченко, Д.Ю. Богданов // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. (Омск, 21-23 мая 2015 г.). – Омск, 2015.

8. Пятибратов Г.Я. Возможности применения электроприводов для активного ограничения колебаний упругих механических передач // Изв. вузов. Электромеханика. – 1990. – №10. – С. 89-93.

9. Пятибратов Г.Я. Синтез систем подчиненного регулирования электроприводов, минимизирующих динамические нагрузки в упругих механических передачах // Изв. вузов. Электромеханика. – 1982. – №3. – С. 296-303.

10. Пятибратов Г.Я. Принципы построения и реализации систем управления усилиями в упругих передачах электромеханических комплексов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1998. – №5-6. – С. 73-83.

11. Кравченко О.А. Принципы построения и реализации систем компенсации силы тяжести / О.А. Кравченко, Г.Я. Пятибратов, Н.А. Сухенко, А.Б. Бекин // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2013. – №2. – С. 32-35.

12. Кравченко О.А. Компенсация влияния сил трения на качество работы электромеханических комплексов / О.А. Кравченко, Г.Я. Пятибратов // Новые технологии управления движением технических объектов: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (Новочеркасск: 1999 г.). – Новочеркасск, 1999. – С. 26-28.

# **Retrofit Simulators to Train Cosmonauts for Working in Non-Gravity and Reduced Gravity Environment**

Pyatibratov G.Ya., Bekin A.B., Bogdanov D.Yu.  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)  
Novocherkassk, Russian Federation  
[g.pyatibratov@mail.ru](mailto:g.pyatibratov@mail.ru)

*Abstract.* The paper describes implementation and operation features of the object transfer systems in simulators working space for training cosmonauts to fulfill extravehicular activity in non-gravity and reduced gravity environment. The control system design concepts of cosmonauts' horizontal movements under non-gravity and reduced gravity environment simulation were studied. The necessity was proved to apply electromechanical systems for friction and inertial force compensation by additionally joined masses to the non-gravity object while implementing advanced simulators. The control system structure was devel-

oped; it contains feedbacks of current, speed and electric drive shaft accelerations, as well as of belt transmission force and cable deflection angle of power drive out of perpendicular position. The paper presents the synthesis results of cosmonauts' movement control system structure in simulators working space, as well as correcting device parameters providing damping of springy oscillations in machinery.

*Keywords:* simulator, non-gravity simulation, electric drive, synthesis, efforts control system.

# Синтез системы управления движением объекта на гибком подвесе при действии внешних сил\*

Пятибратов Г.Я. Богданов Д.Ю. Бекин А.Б.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
г. Новочеркасск, Российская Федерация

[g.pyatibratov@mail.ru](mailto:g.pyatibratov@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены электромеханические системы с упругими связями, у которых параметры движения должны определяться внешним силовым воздействием. Приведены подходы к разделению сложного движения таких систем на составляющие. Сформулированы требования к системам управления горизонтальными перемещениями объектов на гибком подвесе. Приведена структурная схема электромеханической части системы горизонтального перемещения объекта для исследования влияния на её работу возмущающего воздействия. Обоснована целесообразность использования графоаналитических методов и обратных частотных характеристик для синтеза системы управления. Определена структура корректирующего устройства и даны рекомендации по выбору его параметров. Приведены результаты моделирования работы системы управления с синтезированным корректирующим устройством. Даны рекомендации по применению адаптивного управления системами горизонтальных перемещений объектов на гибком подвесе. Сопоставлены результаты работы системы с рекомендуемыми рациональными параметрами корректирующего устройства и с применением адаптивного управления.

**Ключевые слова:** гибкий подвес, система управления, математическая модель, корректирующее устройство, адаптация.

## ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении различных технологических машин и комплексов можно выделить электромеханические системы (ЭМС), параметры движения которых, должны определяться не управляющим, а внешним силовым воздействием. Регулируемый электропривод (ЭП) таких систем должен с высокой точностью управлять усилиями в исполнительном органе и компенсировать силы трения, упругие и гравитационные силы, силы инерции присоединённых масс, которые действуют на объект. При выполнении условия компенсации всех составляющих усилий, препятствующих движению объекта, при приложении к нему незначительных дополнительных усилий, он приходит в движение, параметры которого (ускорение, скорость, перемещение) определяются значением и длительностью приложения внешнего силового воздействия. Указанные особенности функционирования имеют:

- сбалансированные манипуляторы, используемые для автоматизации ручного труда при перемещении грузов значительной массы [1];

- медицинские тренажёры, которые используются для восстановления нарушенных функций опорно-двигательного аппарата пациентов и ускорения их реабилитации при ходьбе [2];

- специальные стенды для отработки на Земле изделий космической техники [3];

- тренажёры для обучения космонавтов выполнению действий в условиях невесомости или пониженной гравитации [4].

В рассматриваемых системах требуемые пространственные перемещения объекта обеспечиваются путём разделения их на составляющие в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также на вращение и качание объекта относительно его центра масс. На практике наиболее часто разделение движений объекта на составляющие в вертикальной плоскости выполняют с применением канатных передач, а требуемые горизонтальные перемещения объекта реализуют с использованием тележек и мостов.

Стремление к минимизации массы рассматриваемых механизмов приводит к снижению жесткости их передач и конструкций, что определяет необходимость учета отрицательного влияния упругости механических связей на работу ЭМС.

Анализ различных подходов к реализации пространственных перемещений объектов показал, что для построения рассматриваемых ЭМС необходимо применять многокоординатные системы управления, обеспечивающие необходимые степени подвижности [5]. При этом для качественного управления сложным движением объекта необходимо решить задачу синтеза локальных систем.

Часто особенностью конструкции рассматриваемых механизмов является применение гибкого подвеса для вертикального перемещения объектов, необходимость учёта упругости механических передач и изменение параметров объекта управления, что усложняет синтез систем управления. Принципы построения и особенности реализации систем вертикальных перемещений (СВП) объектов рассмотрены в работе [6]. Задача синтеза системы управления усилиями в канатной передаче СВП с применением теории оптимального управления решена в [7].

Для развития теории и практики создания рассматриваемых ЭМС представляет интерес решение задачи синте-

\* Результаты работы получены при поддержке проекта № 2878 «Развитие теории и практики создания электротехнических систем тренажёрных комплексов и мобильных объектов», выполняемого в рамках базовой части государственного задания № 2014/143.

за управляющих воздействий для системы горизонтальных перемещений (СГП) объекта на гибком подвесе при приложении к нему внешних силовых воздействий.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем случае целью управления СГП является перемещение объекта на гибком подвесе без качаний и колебаний с требуемыми параметрами движения, определяемыми внешним силовым воздействием. При этом требуемые показатели функционирования СГП обеспечиваются благодаря согласованному управлению движением тележки и моста.

Анализ показал, что наиболее сложно задача управления СГП решается при создании перспективных тренажеров для имитации движений космонавтов в невесомости или условиях пониженной гравитации [8]. Рассмотрим особенности решения задачи синтеза структуры и параметров корректирующего устройства СГП тренажёра обеспечивающего перемещение космонавта в скафандре под действием собственных мышечных усилий с параметрами движения как в реальных условиях. Система горизонтальных перемещений объекта перспективного тренажера должна иметь следующие параметры: максимальная масса объекта (космонавт в скафандре) 200 кг, требуемое его перемещение в любом направлении 8 м с максимальной скоростью 2,1 м/с и ускорением до 7 м/с<sup>2</sup>.

При решении задачи необходимо учитывать особенности объекта управления, которые определяют методологию синтеза управляющих воздействий:

- движение космонавта в рабочем пространстве тренажёра происходит только под действием его мышечных усилий, что определило необходимость исследования системы по возмущающему воздействию;
- высокоточная компенсация сил трения и инерционных сил от дополнительно присоединённых к объекту масс потребует значительных коэффициентов усиления, что создаёт проблему обеспечения устойчивости системы управления;
- влияние на работу СГП гибкого подвеса определяет необходимость активного демпфирования с помощью ЭП упругих колебаний объекта;
- при изменении длины подвеса происходит изменение параметров учитывающих упруго-диссипативные свойства объекта управления в функции положения космонавта, что может потребовать адаптивного управления СГП.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ

С учётом особенностей рассматриваемых ЭМС в работе [9] приведено обобщенное линеаризованное математическое описание СГП полученное с учётом упругости механических передач и качаний объекта на гибком подвесе. При описании механической части системы (МЧС) использовались следующие допущения: силы и моменты приложены к недеформируемым сосредоточенным массам; элементы конструкции моста и тележки под действием внешних сил не деформируются, мост и тележка имеют одну степень подвижности; направляющие, по которым обеспечивается перемещение моста и тележки, расположены в горизонтальной плоскости, силы трения не зависят от положения моста и тележки; канат невесом и в процессе работы всегда натянут; при работе механизма

СВП радиус барабана и точка схода с него каната остаются постоянными; центр масс объекта обезвешивания всегда находится на прямой, являющейся продолжением каната.

На рис. 1 с использованием преобразования Лапласа приведена структурная схема ЭМС СГП по возмущающему воздействию. Прямой канал представлен в виде структуры МЧС, учитывающей влияние упругих связей определяющих качание объекта, а в обратном канале показана электрическая часть системы, свойства которой учитываются передаточными функциями замкнутого контура регулирования тока (ЗКТ)  $W_{ЗКТ}(s)$ , синтезируемого корректирующего устройства (КУ)  $W_{КУ}(s)$  и датчика угла  $W_{ДУ}(s)$  отклонения каната подвеса объекта от вертикали.

Для возможности обобщения результатов исследований математическое описание ЭМС представлено с использованием относительных единиц. Для этого момент двигателя  $M_D$ , момент в упругом элементе  $M_y$ , внешний момент  $M_B$  определены в долях от номинального момента двигателя  $M_H$ ; скорость вращения вала механизма  $\Omega_M$  – в долях от скорости идеального холостого хода двигателя  $\Omega_0$ ; угол  $\alpha$  отклонения объекта от вертикали – в долях от базового угла отклонения  $\alpha_0$  равного углу отклонения объекта при зафиксированных тележке и мосте при действии внешнего усилия определяемого базовым значением момента

$$\alpha_0 = M_H / \rho P_o,$$

где  $\rho$  – радиус приведения,  $P_o$  – вес объекта.

На рис. 1 обозначено:  $T_o, T_M$  – механические постоянные времени объекта и механизма;  $T_c, T_d$  – постоянные времени характеризующие эквивалентную жёсткость и демпфирующие свойства объекта управления.

Свойства МЧС описывается передаточной функцией

$$W_{МЧС}(s) = \frac{1/\gamma}{T_y^2 s^2 + T_d s + 1}, \tag{1}$$

где  $\frac{1}{\gamma} = \frac{T_M}{T_M + T_o}$  – коэффициент усиления МЧС;

$T_y = \sqrt{\frac{T_c T_M T_o}{T_M + T_o}}$  – постоянная времени собственных упругих колебаний объекта.

Для решения задачи синтеза выполнено упрощение системы управления ЭП для чего свернули контур регулирования тока и его свойства учитываются передаточной функцией  $W_{ЗКТ}(s) = 1/(T_{ЗКТ} \cdot s + 1)$ , где  $T_{ЗКТ}$  – постоянная времени замкнутого контура регулирования тока. Динамические свойства датчика угла отклонения объекта от вертикали так же описываются передаточной функцией аperiодического звена с постоянной времени  $T_{ДУ}$ .

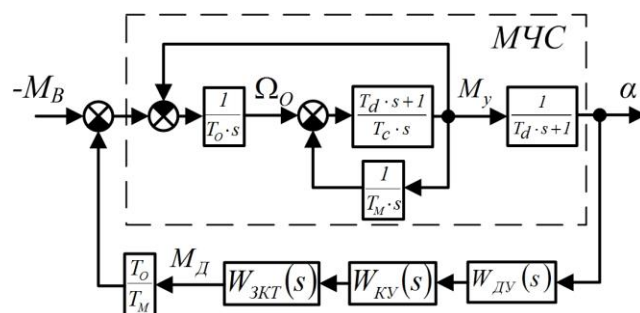


Рис. 1. Структурная схема исследуемой ЭМС



## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Рассмотренные особенности конструкции и функционирования СГП значительно усложняют решение задачи синтеза требуемых управляющих воздействий. В работе [10] обоснована целесообразность и приведена методология применения частотных характеристик для исследования и синтеза ЭМС имеющих значительные колебания на резонансных частотах. Анализ возможных структур КУ показал, что в общем случае оно должно обладать интегро-дифференцирующими свойствами. Выполненные в работе [6] исследования показали, что в общем случае при достаточном быстродействии ЗКТ датчика угла когда их частоты пропускания сигнала в несколько раз превышают собственную частоту колебаний объекта на гибком подвесе качественную работу СГП можно обеспечить, применяя КУ с передаточной функцией

$$W_{KY}(s) = k_{KY} \left( 1 + \frac{k_I}{k_K T_I s} \right) \frac{k_K T_D s + 1}{k_K T_A s + 1} \quad (2)$$

Особенностью рассматриваемой СГП является изменение в процессе её работы постоянных времени  $T_C$  и  $T_d$  характеризующих упругие и диссипативные свойства системы. Исследования показали, что значения  $T_C$  и  $T_d$  изменяются в зависимости от длины подвеса объекта по нелинейному закону, что может потребовать адаптивного управления СГП при реализации которого необходимо изменять постоянные времени КУ, для чего в передаточную функцию (2) введен коэффициент  $k_K$ .

Коэффициент  $k_{KY}$  определяет точность регулирования угла его требуемое значение можно определить по заданному статизму  $\delta_y = \alpha(0) M_B(0)$  по выражению  $k_{KY} = (T_M/T_O)(1/\delta_y - \gamma)$ .

Наличие в законе управления интегрирующей составляющей с постоянной времени  $T_I$  придает астатизм системе регулирования угла. Рекомендуется принимать  $T_I \geq (2-4)T_y$ . Однако необходимо иметь ввиду, что при использовании такого способа повышения точности регулирования угла требуется высокая стабильность измерителей угла, и возникают значительные трудности с обеспечением устойчивости системы. Поэтому при практической реализации КУ рекомендуется принимать  $k_I = 0$ .

Постоянные времени  $T_D$ ,  $T_A$  и их отношение  $k_\omega = T_D/T_A$  в наибольшей степени влияют на качество регулирования угла в исследуемой системе. Поэтому их необходимо выбирать из условия обеспечения максимально возможных запасов устойчивости системы при ее работе в условиях реально существующих помех. Рекомендуется принимать такое значение  $T_D$ , чтобы резонансная частота ЭМС СГП с учетом действия КУ попадала в середину частотного диапазона от  $\omega_D = 1/T_D$  до  $\omega_A = 1/T_A$ , где осуществляется дифференцирование сигнала датчика угла. С учетом этих рекомендаций получим

$$T_D = (T_O T_C / k_{KPY})^{1/2} k_\omega^{1/4}. \quad (3)$$

Рекомендуется принимать  $k_\omega = 4-8$ .

Постоянная времени  $T_A = T_D/k_\omega$  определяет значение коэффициента передачи канала регулирования угла (КРУ) при  $\omega \gg \omega_n$ . При реализации и настройке КУ значение  $T_A$  необходимо уточнить с учетом условий эксплуатации конкретной системы, электромагнитной совместимости её

элементов и влияния помех, обусловленных реально существующими электрическими и магнитными полями. При выборе коэффициента  $k_\omega$  необходимо стремиться к повышению помехоустойчивости системы.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Исследуем работу СГП на примере управления механизмом тележки перспективного тренажёра при длине подвеса, когда упругая связь имеет минимальную жесткость. В этом случае свойства МЧС определяют постоянные времена  $T_O = 3,017$  с,  $T_M = 0,407$  с,  $T_y = 0,311$  с,  $T_C = 0,270$  с и  $T_d = 0,003$  с.

При создании СГП применён частотно-регулируемый ЭП серии Sinamics-S120 (фирма «Siemens») с системой управления Simotion D435 и датчик угла, реализованный с использованием цифрового фотоэлектрического преобразователя угла типа ЛИР-237А (фирма «СКБ ИС» г. Санкт-Петербург).

Результаты решения задачи синтеза КУ обеспечивающего требуемые горизонтальные перемещения объекта на гибком подвесе без колебаний выполним для ЭМС с однократно интегрирующей системой подчинённого регулирования координат ЭП при настройке регулятора тока на модульный оптимум. В этом случае свойства ЭП будут учитываться ЗКТ имеющим полосу пропускания частот  $\omega_m$ . Такое техническое решение обеспечит полосу пропускания частот ЭП и ДУ в несколько раз превышающую частоту качаний объекта в замкнутой СГП  $\omega_n$ .

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к рассматриваемой СГП тренажёра система регулирования должна обеспечить статизм по углу  $\delta_y = 0,02$  при минимизации амплитуды резонансных колебаний угла отклонения канатной передачи от вертикали.

Для получения необходимых частотных характеристик исследуемой СГП преобразование Фурье к передаточным функциям структурной схемы приведенной на рис. 1. В соответствии с методикой, предложенной в работе [11], при решении задачи синтеза структуры и параметров канала активного демпфирования качаний объекта на гибком подвесе необходимо сопоставить логарифмическую амплитудную частотную характеристику (ЛАЧХ) МЧС  $L_{MЧС}(\omega) = 20 \lg[\text{mod} W_{MЧС}(j\omega)]$  и обратную ЛАЧХ канала активного демпфирования качаний объекта  $L_{KPY}^{-1}(\omega) = -20 \lg[\text{mod} W_{KPY}(j\omega)]$ , где комплексный коэффициент передачи  $W_{MЧС}(j\omega)$  определяется по выражению (1), а  $W_{KPY}(j\omega)$  по следующему выражению:  $W_{KPY}(j\omega) = (T_O/T_M) W_{ЗКТ}(j\omega) W_{KY}(j\omega) W_{ДУ}(j\omega)$ .

На начальном этапе решения задачи синтеза КУ необходимо определить требуемый коэффициент усиления КРУ. В зависимости от заданного статизма по углу  $\delta_y$  требуемое значение  $k_{KPY} = 1/\delta_y - \gamma$ . Реально в рассматриваемых ЭМС  $\gamma < 1/\delta_y$  и поэтому обратная ЛАЧХ  $L_{KPY}^{-1}$  будет проходить намного ниже оси абсцисс и пересекать ЛАЧХ  $L_{MЧС}$  на частоте  $\omega_n$ , которая намного больше резонансной частоты МЧС  $\omega_y$ , что позволяет при синтезе КУ использовать асимптотическую ЛАЧХ  $L_{A MЧС}$ . В рассматриваемом диапазоне частот при синтезе КУ СГП асимптотическая ЛАЧХ МЧС  $L_{A MЧС}$  и обратная ЛАЧХ КРУ  $L_{KPY}^{-1}$  могут быть определены по следующим выражениям:

$$L_{A\text{МЧС}}(\omega) = 20\lg(1/\gamma) - 40\lg\left(\sqrt{(T_y\omega)^2 + 1}\right). \quad (4)$$

$$L_{\text{КРП}}^{-1}(\omega) = -20\lg(k_{\text{КРП}}) - 20\lg\left(\text{mod}\left[\left(1 + \frac{k_I}{k_K T_I(j\omega)}\right) \frac{T_D k_K(j\omega)}{T_A k_K(j\omega) + 1}\right]\right) \quad (5)$$

На рис. 2 показаны частотные характеристики исследуемой СГП иллюстрирующие решение задачи синтеза требуемого КУ: точная ЛАЧХ МЧС  $L_{\text{МЧС}}(\omega)$ , асимптотические ЛАЧХ МЧС  $L_{A\text{МЧС}}(\omega)$  и КРП  $L_{\text{КРП}}(\omega)$ , а также результирующая ЛАЧХ  $L_{\text{РЕЗ}}(\omega)$  показывающая изменение угла в исследуемой СГП с синтезированным КУ. Интегрирующая составляющая часть ЛАЧХ  $L_{\text{КРП}}^{-1}$  показана штрих-пунктирной линией.

В рассматриваемом примере  $1/\gamma = 0,1189$ ;  $\omega_y = 3,21$  рад/с. В результате решения задачи синтеза КУ получены следующие его параметры  $k_{\text{КРП}} = 5,62$ ;  $k_I = 0$ ;  $T_D = 0,1977$  с;  $T_A = 0,0494$  с.

На рис. 3 приведены результаты моделирования исследуемой СГП. На рис 3 а показаны переходные процессы в исходной механической части системы, а на рис. 3 б в системе с синтезированным КУ. Переходные процессы получены при приложении ступенчатого внешнего воздействия соответствующего усилию в 200 Н.

Статическая ошибка регулирования угла в разомкнутой СГП составила 12%, а в системе с синтезированным КУ 2%. При этом время переходного процесса уменьшилось с 189 с. до 0,52 с. Перерегулирование в СГП с КУ составило 14,5%.

При значительном изменении в процессе работы ЭМС длины подвеса возникает необходимость применения адаптивного управления реализуемого путём изменения коэффициента  $k_K$ , например, уменьшая его при уменьшении длины каната механической передачи в процессе движения объекта.

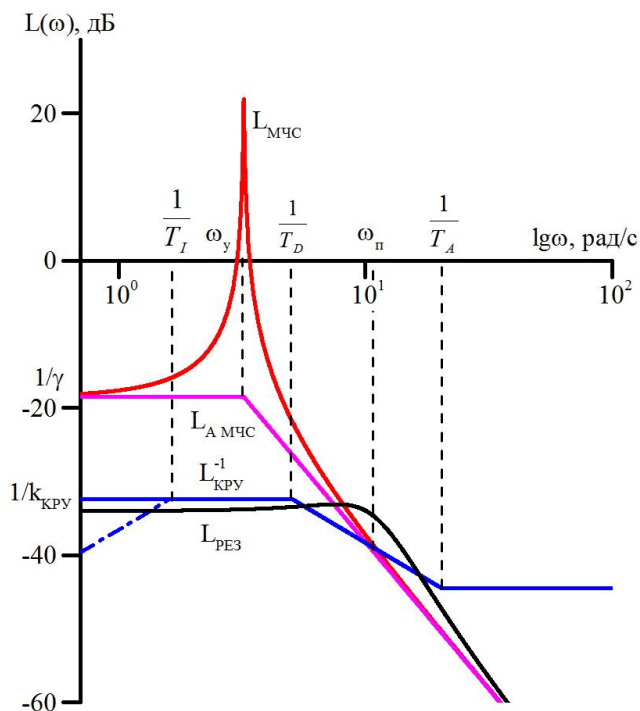


Рис. 2. Частотные характеристики синтеза корректирующего устройства

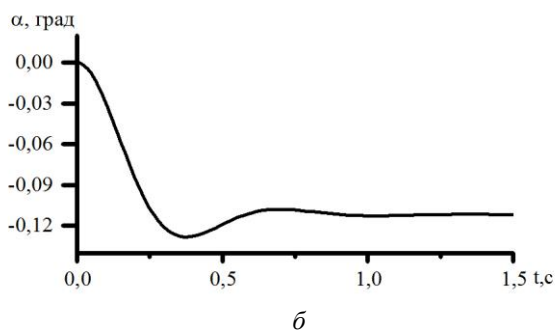
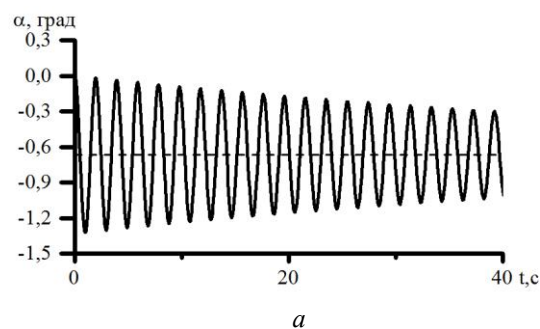


Рис. 3. Переходные процессы в исходной механической части системы (а) и с в системе с синтезированным КУ (б)

Если при минимальной жесткости передачи, характеризуемой постоянной времени  $T_{C\text{ max}}$ , принять  $k_K = 1$ , то при реализации адаптивного управления необходимо с уменьшением  $T_C$  изменять значение  $k_K$  в соответствии с зависимостью  $k_K = (T_C / T_{C\text{ max}})^{1/2}$ .

Если не применять адаптивное управление, то рекомендуется определять параметры КУ при максимальном значении  $T_{C\text{ max}}$ . В этом случае приемлемые результаты можно получить и при минимальных значениях  $T_{C\text{ min}}$ . Результаты моделирования исследуемой СГП для минимальной длины подвеса с  $T_{C\text{ min}} = 0,0169$  с при применении адаптации и без неё показаны на рис. 4.

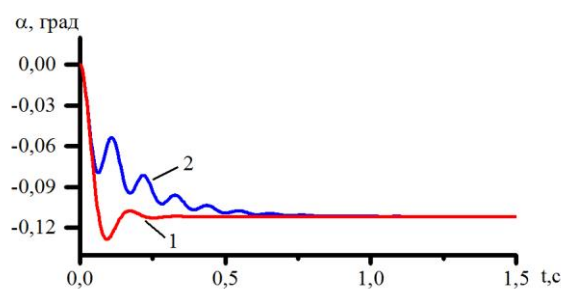


Рис. 4 Переходные процессы при минимальной длине подвеса: 1 – при применении адаптивного управления; 2 – при настройке на максимальную длину подвеса

Исследования показали, что при недостаточном быстродействии ЭП или значительной инерционности датчика усилия необходимо применять КУ с дифференцированием более высокого порядка. Методика определения структуры и параметров такого КУ приведена в работах [6,12].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов выполненных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. В механизмах, реализованных с применением гибкого подвеса объектов при изменении внешних силовых

воздействий возникают слабо затухающие колебания затрудняющие работу СГП.

2. Для исключения качаний объекта на гибком подвесе необходимо осуществить управление электроприводами исполнительных механизмов с использованием принципа слежения за перемещением объекта.

3. Для качественного управления горизонтальными перемещениями объекта на гибком подвесе предлагается реализовать систему управления с обратной связью по углу отклонения каната от вертикали.

4. Синтез канала управления углом отклонения гибкого подвеса от вертикали рекомендуется выполнять с применением обратных частотных характеристик системы управления электропривода.

5. Корректирующее устройство в системе горизонтальных перемещений объектов на гибком подвесе должно обладать интегро-дифференцирующими свойствами. При этом участок частотной характеристики КУ, на котором производится дифференцирование сигнала датчика угла должен выбираться исходя из требуемого качества работы и помехозащищенности системы.

6. При значительном изменении длины подвеса в процессе вертикальных перемещений объекта КУ должно обладать адаптивными свойствами. В случае, когда адаптивное управление не может быть осуществлено, рациональной применять настройку КУ на наименьшую жесткость канатной передачи соответствующей максимальной длине подвеса.

7. Система горизонтальных перемещений объекта с синтезированным КУ обеспечивает качественное управление движением объекта на гибком подвесе при резких изменениях внешних силовых воздействий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пятибратов Г.Я. Электромеханические силокомпенсирующие системы подъёмно-транспортных манипуляторов / Г.Я. Пятибратов, Н.А. Сухенко // Вестник ЮУрГУ серия "Энергетика". – 2014. – Т. 14, №4. – С. 67 – 75.

2. Алтунян Л. Л. Проблемы и задачи совершенствования медицинских тренажеров с электромеханическими системами разгрузки веса пациентов / Л.Л. Алтунян, А.А. Даньшина, Н.А. Сухенко // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. Т. 2, №3. – С. 1 – 7.

3. Пятибратов Г.Я. Состояние, проблемы и пути совершенствования систем имитации невесомости для наземной отработки изделий космической техники / Г.Я. Пятибратов, В.П. Папирняк, В.Г. Полежаев, А.И. Супчев // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. – 1995.– №3-4.– С. 39–49.

4. Кравченко О.А. Создание и опыт эксплуатации силокомпенсирующих систем, обеспечивающих многофункциональную подготовку космонавтов к работе в невесомости / О.А. Кравченко, Г.Я. Пятибратов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – №2. – С. 42 – 47.

5. Кравченко О.А. Принципы построения, реализация и перспективы развития многокоординатных силокомпенсирующих систем тренажёрных комплексов / О.А. Кравченко, Г.Я. Пятибратов // АЭП -2012 тр. VII Международ. (XVI II Всерос.) науч. конф. по автоматизированному

электроприводу. (Иваново, 2-4 октября 2012 г.). – Иваново, 2012. – С. 495 – 499.

6. Пятибратов Г.Я. Принципы построения и реализации систем управления усилиями в упругих передачах электромеханических комплексов // Изв. вузов. Электромеханика.– 1998.– №5-6.– С. 73–83.

7. Кравченко О.А. Синтез оптимального регулятора усилий в электромеханических системах с упругими связями / О.А. Кравченко, Г.Я. Пятибратов // Изв. вузов. Электромеханика.– 1998.– №4.– С. 58–63.

8. Пятибратов Г.Я. Проблемы и перспективы создания тренажёра для подготовки космонавтов к действиям на планетах с пониженной гравитацией / Г.Я. Пятибратов, Н.А. Сухенко, Д.Ю. Богданов, Н.А. Бачмановский // Пилотируемые полёты в космос: матер. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. (Звёздный городок, 27 ноября 2013 г.). – Звёздный городок, 2013. – С. 256 – 258.

9. Кравченко О.А. Математическая модель электромеханической многокоординатной силокомпенсирующей системы / О.А. Кравченко, Д.Ю. Богданов, Д.В. Барыльник // Вестник ЮУрГУ серия "Энергетика". – 2014. – Т. 14, №1. – С. 71 – 78.

10. Пятибратов Г.Я. Синтез систем подчиненного регулирования электроприводов, минимизирующих динамические нагрузки в упругих механических передачах / Г.Я. Пятибратов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1982.– №3. – С. 296–303.

11. Пятибратов Г.Я. Методология комплексного исследования и проектирования электромеханических систем управления усилиями в упругих передачах механизмов // Деп. в ВИНТИ. – 29.06.1999. – №2119–В99. – 154 с.

12. Пятибратов Г.Я. Создание и внедрение систем управления усилиями в упругих передачах и исполнительных устройства электромеханических комплексов / Г.Я. Пятибратов, О.А. Кравченко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – №1. – С. 45 – 56.

# **Synthesis of an Object Moving Control System with Flexible Suspension Under the Action of External Forces**

Pyatibratov G.Ya., Bogdanov D.Yu., Bekin A.B.  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)  
Novocherkassk, Russian Federation  
[g.pyatibratov@mail.ru](mailto:g.pyatibratov@mail.ru)

*Abstract.* The paper presents electromechanical systems with flexible linkage, which movement parameters shall be specified by external force impact. Approaches to the compound movement division of such systems into components are given. Requirements to the control system of object horizontal moving with flexible suspension are formulated. The block diagram of electromechanical part of object horizontal moving system to research the impact of disturbing effect on its work is presented. Feasibility of using grapho-analytical methods and inverse frequency characteristics of control system synthesis is proved. The structure of corrective device is defined and selection guideline of

its parameters is given. The results of control system operation simulation with the synthesized corrective device are described. Recommendations for using adaptive control of object horizontal movement systems with flexible suspension are given. The results of system operation are compared with the recommended rational parameters of the corrective device and with application of adaptive control.

*Keywords:* flexible suspension, control system, mathematical model, corrective device, adaptatio.



# Исследование электропривода насосных установок, выполненного на базе асинхронного двигателя двухстороннего питания

Бочкарев И.В.

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,  
г. Бишкек, Кыргызская Республика

**Аннотация.** Исследован электропривод насосных установок, выполненный на базе асинхронного электродвигателя двухстороннего питания с учетом несинусоидальности напряжения питания ротора. Проведена оценка влияния способа модуляции выходного напряжения ТПЧ и режима работы двигателя на степень искажения токов при помощи интегральной характеристики – коэффициента искажения тока. Предложен новый закон регулирования реактивной мощности – регулирование при поддержании номинального тока ротора  $I_2 = I_{2n} = \text{const}$ . Показано, что при этом законе обеспечиваются наиболее высокие суммарные энергетические показатели во всем рабочем диапазоне регулирования частоты вращения насосной установки. Полученные теоретические результаты подтверждены экспериментальными исследованиями.

**Ключевые слова:** насосная станция, центробежный насос, асинхронный двигатель двухстороннего питания, мощность скольжения, преобразователь частоты, коэффициент искажения токов, коэффициент мощности

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных цехов в технологической цепочке целого ряда предприятий является цех водоснабжения, от которого в значительной степени зависит эффективность работы всего предприятия. Именно к таким предприятиям относятся металлургические и металлообрабатывающие заводы, которые являются одними из основных потребителей воды. Поскольку насосные установки являются высокоэнергоемкими механизмами, то от совершенства системы их электропривода во многом зависит эффективное использование значительных объемов энергии.

В подавляющем большинстве случаев электропривод насосных установок построен на основе широко распространенного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. При этом большинство водоснабжающих насосных станций (ВНС) оснащены нерегулируемыми насосными агрегатами, регулирование производительности и давления которых осуществляется комбинированным способом: ступенчатое регулирование путем отключения – включения насосных агрегатов и плавное регулирование с помощью дроссельного органа (заслонки, клапана). Эти способы экономически невыгодны [1].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведенные исследования показывают, что обычно в системах водоснабжения требуется достаточно узкий диапазон регулирования частоты вращения насоса (от 50 до 100 %). При таком диапазоне наиболее конкурентоспо-

собным по технологичности и энергетическим характеристикам является каскадная схема электропривода на базе асинхронного двигателя двойного питания (АДДП), представляющего собой двигатель с фазным ротором, обмотки статора которого подключаются к сети 6/10 кВ, а обмотка ротора – к преобразователю частоты. В каскадных схемах преобразованию подвергается только мощность скольжения, пропорциональная скольжению АДДП и мощности статора. При этом преобразователь низковольтный (до 1000 В), что позволяет реализовать практически любые мощности электропривода без усложнения силовой схемы преобразователя, причем возможность регулирования реактивной мощности по цепи статора позволяет обеспечить работу с высоким коэффициентом мощности. Именно поэтому такие системы в ВНС предпочтительней, чем частотнорегулируемый асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Поэтому работы по переводу ВНС на энергосберегающие электроприводы (ЭЭП) являются актуальными.

Принципиальная схема регулируемого электропривода центробежного насоса (ЦН) приведена на рис. 1.

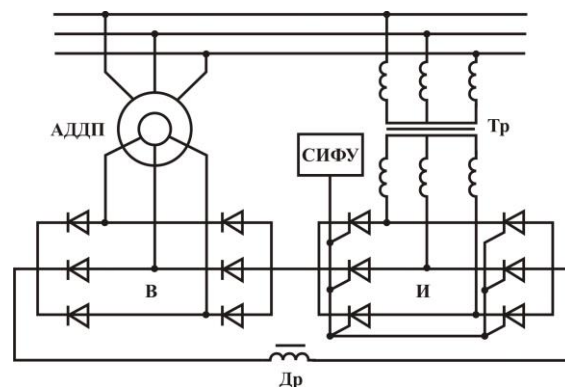


Рис. 1. Принципиальная схема регулируемого электропривода центробежного насоса

Здесь обмотка статора АДДП подключена к сети переменного тока, к которой его роторная цепь присоединяется через выпрямитель В, инвертор И и согласующий трансформатор Тр. Необходимость установки трансформатора Тр объясняется тем, что обмотки статоров АД большой мощности, которые используются в ВНС, выполняются на высокое напряжение (3, 6, 10 кВ), а обмотка ротора по условиям надежности – на низкое напряжение. Для сглаживания выпрямленного тока и нормальной работы инвертора И включен дроссель Др.

Регулирование величины скольжения ротора электродвигателя осуществляется путем введения дополнительной противо-ЭДС в цепь ротора, получаемой регулированием угла  $\beta$  включения тиристорных инверторов. Таким образом, в ЭЭП на базе АДДП обеспечивается выпрямление напряжения ротора электродвигателя выпрямителем В, сглаживание выпрямленного напряжения дросселем Др и последующее преобразование в переменное напряжение частотой 50 Гц тиристорным инвертором И. С выхода инвертора преобразованная мощность скольжения электродвигателя возвращается через высоковольтный трансформатор Тр в сеть.

Наличие в кривой выходного напряжения преобразователя высших гармонических составляющих напряжений и токов вызывает добавочные потери в обмотках и стали АДДП и Тр, что приводит к их перегреву и отрицательно влияет на энергетику ЭЭП в целом. Для снижения несинусоидальности напряжений и токов используются различные схемные решения (например, увеличение «пульсности» преобразователей), фильтры, специальные алгоритмы управления. Правильный выбор и расчет этих мероприятий должен предусматривать анализ гармонического состава напряжений и токов при различных законах управления МДП. Поскольку основным режимом работы привода ЦН является продолжительный с практически неизменной нагрузкой, то это позволяет ограничиться исследованием стационарных электромагнитных процессов в двигателе и преобразователе.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Регулирование выходной частоты, фазы и величины напряжения НПЧ, определяемое законом регулирования АДДП, может быть осуществлено в схемах с полностью

управляемыми силовыми ключами. Одним из таких вариантов является регулирование выходного напряжения НПЧ путем широтно – импульсной модуляции. Отметим, что, в отличие от систем ШИМ, применяемых в преобразователях частоты со звеном постоянного тока [2], модуляции подвергается не само входное напряжение ПЧ, а переключающие функции групп вентилялей. Такой способ формирования выходного напряжения в дальнейшем обозначим как ШИМП.

Для получения аналитических выражений, описывающих токи АДДП, воспользуемся положениями метода векторно – гармонического анализа.

В [3] выходное напряжение  $U_2$  НПЧ с ШИМП определено, как

$$U_2 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{ex.m} \left[ \frac{r}{2} \sin \omega_2 t + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{Pk} \frac{\cos[(Pk \pm 1) \arccos(\frac{r}{2})]}{Pk \pm 1} \times \sin[Pk \omega_1 + (Pk \pm 1) \omega_2] t \right] \quad (1)$$

где  $U_{ex.m}$  - амплитуда напряжения  $U_2$ ;  $P$  – пульсность НПЧ;  $\omega_1, \omega_2$  – входная и выходная частота НПЧ;  $r = 2\pi U_2 K_T / (3\sqrt{3} U_1)$  – глубина регулирования напряжения;  $K_T$  - коэффициент трансформации трансформатора.

Амплитуда первой гармонической выходного напряжения

$$A_1 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{ex.m} \frac{r}{2} \quad (2)$$

Кривые выходного напряжения НПЧ представлены на рис. 2.

Для дальнейших расчетов представим выходное напряжение НПЧ в виде обобщенного вектора в синхронной системе координат. Введем обозначения:

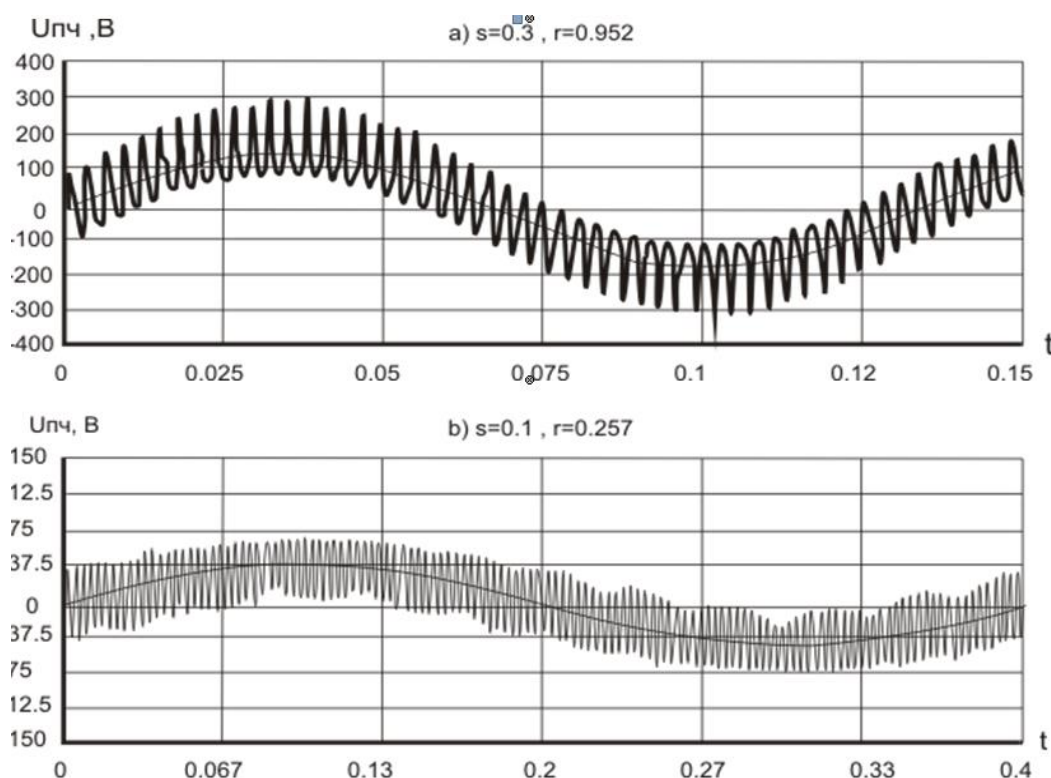


Рис. 2. Выходное напряжение НПЧ с ШИМ при различных режимах работы ЦН

$$A_{pn} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{ex.m} (-1)^{Pn} \frac{\cos[(Pn+1)\arccos(\frac{r}{2})]}{Pn+1};$$

$A_{nn} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{ex.m} (-1)^{Pn} \frac{\cos[(Pn-1)\arccos(\frac{r}{2})]}{Pn-1}$  - амплитуды гармоник напряжения прямой (с частотой  $Pk\omega_1 + (Pk+1)\omega_2$ ) и обратной (с частотой  $Pk\omega_1 + (Pk-1)\omega_2$ ) последовательности.

Тогда проекции обобщенного вектора напряжения преобразователя  $U_2$  на синхронные оси  $x, y$  будут равны

$$\left. \begin{aligned} U_{2x} &= \sum_{n=1}^{\infty} (A_{pn} + A_{nn}) \sin[Pn(\omega_1 + \omega_2)t] \\ U_{2y} &= -A_1 - \sum_{n=1}^{\infty} (A_{pn} - A_{nn}) \cos[Pn(\omega_1 + \omega_2)t] \end{aligned} \right\} (3)$$

Поскольку в приводах ВНС используются двигатели большой мощности, примем активное сопротивление фазы статора  $r_1 = 0$ . Из (3), найдем проекции обобщенного вектора тока статора на синхронные оси:

$$i_{1xp} = -k_s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{pn}}{r_2^2 + \omega_{2pn}^2 L_2^2 \sigma^2} [r_2 \sin(Pn(\omega_1 + \omega_2)t) - \omega_{2pn} L_2 \sigma \cos(Pn(\omega_1 + \omega_2)t)]$$

$$i_{1xn} = -k_s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{nn}}{r_2^2 + \omega_{2nn}^2 L_2^2 \sigma^2} [r_2 \sin(Pn(\omega_1 + \omega_2)t) + \omega_{2nn} L_2 \sigma \cos(Pn(\omega_1 + \omega_2)t)]$$

$$i_{1yp} = k_s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{pn}}{r_2^2 + \omega_{2pn}^2 L_2^2 \sigma^2} [\omega_{2pn} L_2 \sigma \sin(Pn(\omega_1 + \omega_2)t) + r_2 \cos(Pn(\omega_1 + \omega_2)t)]$$

$$i_{1yn} = k_s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{nn}}{r_2^2 + \omega_{2nn}^2 L_2^2 \sigma^2} [\omega_{2nn} L_2 \sigma \sin(Pn(\omega_1 + \omega_2)t) - r_2 \cos(Pn(\omega_1 + \omega_2)t)]$$

где  $L_2$  – полная эквивалентная индуктивность фазы ротора.

Проекции обобщенного вектора тока ротора определяются, как

$$i_{2xp} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{pn}}{r_2^2 + \omega_{2pn}^2 L_2^2 \sigma^2} [r_2 \sin(Pn(\omega_1 + \omega_2)t) - \omega_{2pn} L_2 \sigma \cos(Pn(\omega_1 + \omega_2)t)]$$

$$i_{2xn} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{nn}}{r_2^2 + \omega_{2nn}^2 L_2^2 \sigma^2} [r_2 \sin(Pn(\omega_1 + \omega_2)t) + \omega_{2nn} L_2 \sigma \cos(Pn(\omega_1 + \omega_2)t)]$$

$$i_{2yp} = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{pn}}{r_2^2 + \omega_{2pn}^2 L_2^2 \sigma^2} [\omega_{2pn} L_2 \sigma \sin(Pn(\omega_1 + \omega_2)t) + r_2 \cos(Pn(\omega_1 + \omega_2)t)]$$

$$i_{2yn} = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{nn}}{r_2^2 + \omega_{2nn}^2 L_2^2 \sigma^2} [\omega_{2nn} L_2 \sigma \sin(Pn(\omega_1 + \omega_2)t) - r_2 \cos(Pn(\omega_1 + \omega_2)t)]$$

Обратные преобразования полученных выражений позволяют получить мгновенные значения токов АДДП в реальных системах координат. На рис.3 представлены кривые токов статора и ротора АДДП при работе на центробежный насос при использовании НПЧ с ШИМ (при скольжении  $S = 0,3$  и глубине регулирования напряжения  $r = 0,95$ ). Расчеты проведены для шестипульсовой схемы НПЧ. В качестве объекта исследования выбран АДДП, разработанный на базе асинхронного двигателя типа АК-13-59-94 мощностью  $P = 1200$  кВт,  $U = 3000$  В,  $n_1 = 1500$  об/мин.

Гармонический состав и значения высших гармонических токов в значительной мере определяются величиной скольжения (частотой вращения рабочего колеса насоса), глубиной регулирования первой гармоники напряжения,

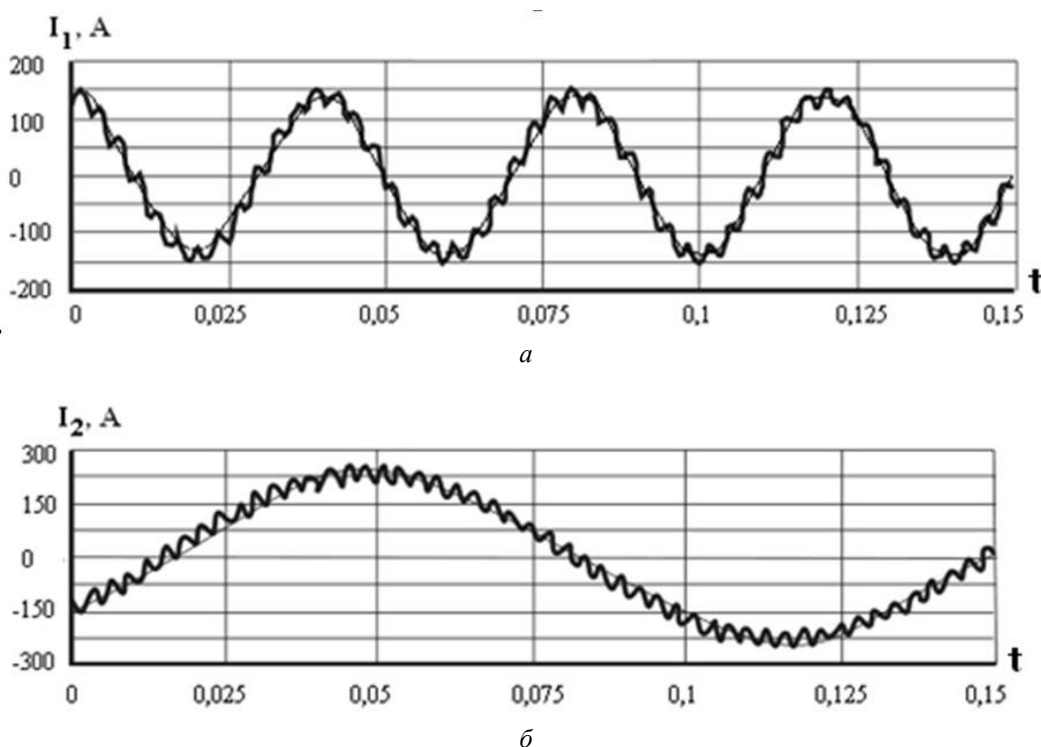


Рис. 3. Токи статора (а) и ротора (б) АДДП при питании от НПЧ с ШИМ

то есть параметрами функций регулирования АДДП: действующего значения  $U_2$  и фазы  $\delta$  напряжения, подводимого к ротору от ТПЧ. Вектор  $U_2$  обычно отстает от вектора напряжения сети  $U_1$  на угол  $\delta$ . Тогда составляющие напряжений можно записать в виде

$$U_{1x} = U_1; \quad U_{1y} = 0; \quad U_{x2} = U_2 \cos \delta; \quad U_{y2} = U_2 \sin \delta. \quad (4)$$

Проведенный анализ показал, что регулирование АДДП обычно проводится по следующим законам:

- реактивная мощность, потребляемая со стороны статора, равна нулю  $Q_1 = 0$ . Эффективность такого режима объясняется следующим: так как частота скольжения  $f_s$  значительно меньше частоты сети  $f_1$ , то для создания одного и того же магнитного потока реактивная мощность со стороны ротора требуется меньшая, чем со стороны статора;
- реактивная мощность, потребляемая со стороны ротора, равна нулю  $Q_2 = 0$ . Эффективность этого режима заключается в том, что в этом случае требуется минимальная номинальная мощность НПЧ;
- регулирование по минимуму электрических потерь мощности  $\Delta P = \min$ . Этот режим обеспечивается за счет перераспределения реактивных составляющих токов статора и ротора.

Величины  $U_2$  и  $\delta$ , которые соответствуют конкретному режиму работы ТМ, можно определить путем совместного решения уравнений активных и реактивных составляющих токов и момента АДДП. Например, для обеспечения режима, при котором реактивная мощность, потребляемая со стороны статора, равна нулю  $Q_1 = 0$ , величины  $U_2$  и  $\delta$  находятся из решения уравнения реактивного тока статора  $I_{1y}(U_2, \delta, s) = 0$  при моменте двигателя, вычисляемом по выражению [4]:

$$M = \frac{C_n H_c + \left( \frac{1-s}{1-s_n} \right)^2}{\eta_{TM}(\omega, H_c)} \sqrt{1 - \frac{H_c}{H_0} \left( \frac{1-s_n}{1-s} \right)^2}, \quad (5)$$

где  $H_c$  – статический напор, который равен разности давлений в начале и в конце трубопровода;  $H_0$  – напор насоса при закрытой задвижке, т.е. при расходе  $Q = 0$ ;  $C_n = 1 - I/H_0$  – коэффициент;  $s$  – скольжение ротора;  $\eta_{TM}(\omega, H_c)$  – КПД ЦН;  $\omega$  – угловая скорость колеса насоса, о.е.

На базе совместного решения этих двух уравнений можно определить значения  $U_2$  и  $\delta$ , которые соответствуют требуемому напору ЦН и реактивной мощности  $Q_1$ .

В АДДП для создания одного и того же магнитного потока со стороны ротора требуется меньшая реактивная мощность, чем со стороны статора. Поэтому можно предложить еще один закон регулирования реактивной мощности, при котором обеспечиваются наиболее высокие суммарные энергетические показатели во всем рабочем диапазоне ЦН, – регулирование при поддержании постоянной величины тока ротора, равной номинальному:  $I_2 = I_{2n} = \text{const}$ . Для этого во всем диапазоне регулирования частоты вращения необходимо поддержать значения реактивного тока ротора  $I_{2y}$  в соответствии с условием

$$I_{2y} = \sqrt{I_{2n}^2 - I_{2x}^2}, \quad (6)$$

где  $I_{2x}$  – активная составляющая тока ротора.

Для определения влияния несинусоидальности выходного напряжения НПЧ на энергетические показатели привода в целом, проведен расчет интегрального показателя – коэффициента искажения токов АДДП во всем диапазоне регулирования скольжения (рис. 4).

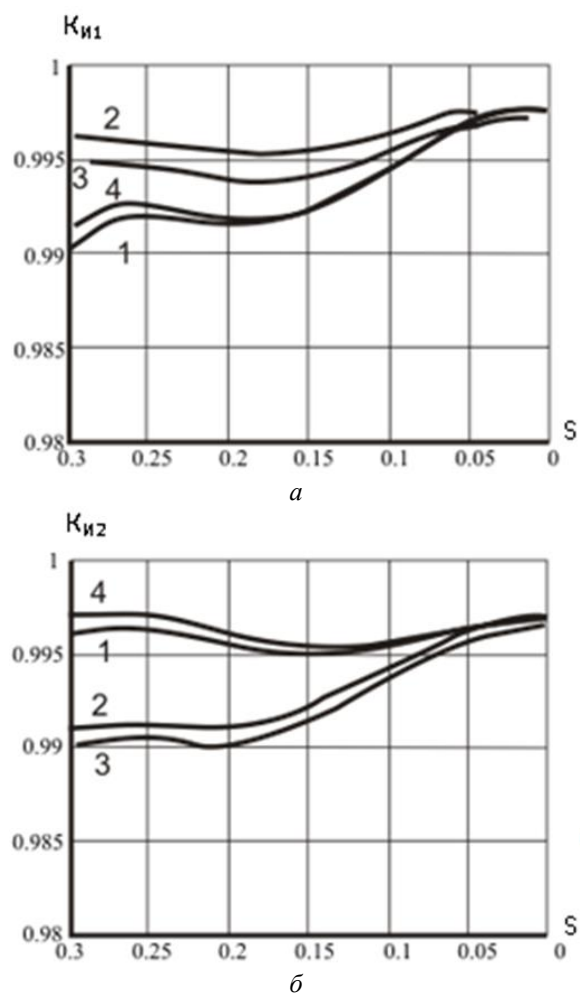


Рис. 4. Коэффициенты искажения тока статора (а) и тока ротора (б) при ШИМ напряжения НПЧ

Значения  $K_n$  в рабочем диапазоне ЦН изменяются в пределах от 0,990 до 0,998, что значительно ниже, чем при прямоугольной модуляции выходного напряжения НПЧ. Получено, что при таком незначительном уровне искажающих составляющих токов, их влияние на величину коэффициента мощности привода в целом пренебрежимо мало.

При широтно-импульсной модуляции выходного напряжения НПЧ в МДП наблюдаются пульсации электромагнитного момента, вызванные взаимодействием основного потока с высшими гармоническими составляющими тока ротора. Расчет их можно провести, учитывая только взаимодействие высших гармонических токов с первыми гармониками. Результаты расчета приведены на рис. 5.

Пульсации электромагнитного момента при ШИМ имеют более сложный гармонический состав, но их частота  $Pk\omega_1 + (Pk \pm 1)\omega_2$  значительно выше, чем при прямоугольной модуляции напряжения НПЧ. Наиболее существенные по величине гармоники момента при шести-пульсном преобразователе имеют частоту более 600 Гц, что компенсируется механической инерцией даже ненагруженного привода.

Для проверки полученных аналитических выражений были проведены экспериментальные исследования, результаты которых показаны на рис. 6. АДДП выполнен на базе асинхронного двигателя с фазным ротором типа



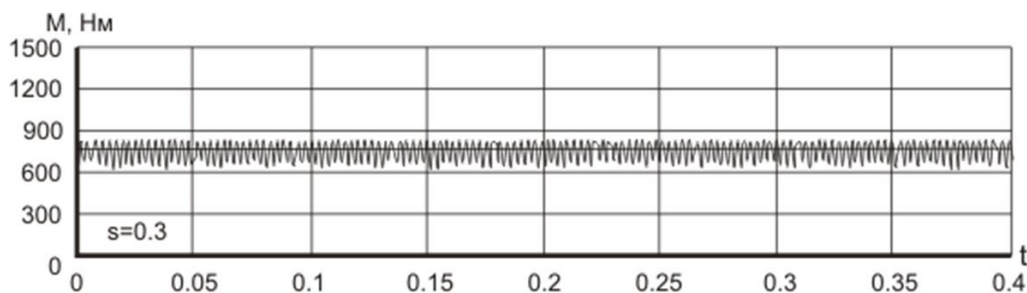


Рис. 5. Пульсации электромагнитного момента АДДП-привода

АОК2-51-6 мощностью 4 кВт, с номинальной частотой вращения 950 об/мин, работающего в режиме двойного питания. Результаты измерений коэффициента мощности показаны на рис. 6. Видно, что максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет не более 11 %, что позволяет рекомендовать полученные результаты для практического использования.

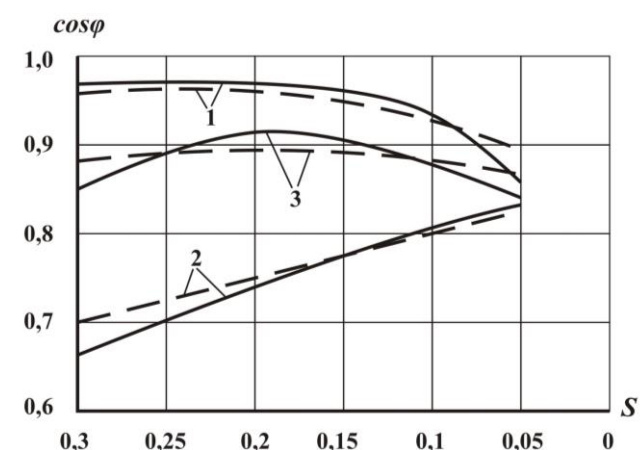


Рис. 6. Коэффициент мощности:

1 –  $I_2 = I_{2n} = const$ ; 2 –  $\Delta P = min$ ; 3 –  $Q_I = 0$ ;  
 — — — — — расчетные кривые;  
 - - - - - опытные кривые

#### ВЫВОДЫ

1. Эффективное использование потенциала энергосбережения в электроприводах насосных установок должно базироваться на замене приводных электродвигателей на

новые энергоэкономичные с повышенным КПД, которые обеспечивают изменение производительности и давления насоса путем регулирования частоты вращения. В качестве таких электродвигателей экономически целесообразно использовать асинхронные двигатели двойного питания.

2. Влияние высших гармоник токов на величину коэффициента мощности и пульсацию электромагнитного момента АДДП при использовании НПЧ с полностью управляемыми силовыми ключами в целом пренебрежимо мало.

3. Наиболее высокие энергетические показатели АДДП во всем рабочем диапазоне регулирования частоты вращения ЦН обеспечиваются при законе регулирования, который обеспечивает поддержание постоянной величины тока ротора, равной номинальному:  $I_2 = I_{2n} = const$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных и воздухоудовных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
2. Парфенов Э.Е. Особенности электромагнитных процессов, расчета параметров и характеристик управляемых электрических машин для асинхронно-вентильных каскадов // Исследование турбо- и гидрогенераторов. – Л.: Наука, 1976. – С. 146-154.
3. Попков О.З. Основы преобразовательной техники. Автономные преобразователи. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 64 с.
4. Бочкарев И.В., Келебаев К.К. Энергетические характеристики машины двойного питания привода центробежных насосов // Проблемы автоматики и управления: научно-техн. журнал – Б.: Илим. – 2010. – С.149-153.

## Analysis of a Doubly Fed Induction Motor in Electric Drives of Pumping Stations

Bochkarev I.V.

Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov,  
 Bishkek, Kyrgyzstan

**Abstract.** The investigation of a doubly fed induction motor in electric drives of pumping stations is conducted in this paper. The effect of non-sinusoidal rotor supply is considered in the analysis as well. The current total harmonic distortion (THD) is evaluated with respect to the selected voltage modulation in a thyristor frequency converter (TFC) as well as on motor duty cycle. A novel method of reactive power regulation with constant rotor current  $I_2 = I_{2n} = constant$  is proposed. It is shown that the

proposed method considerably improves motor performance in the whole operation range. The proposed analytical method is verified with laboratory measurements.

**Keywords:** pumping station, centrifugal pump, doubly fed induction motor, slip power, frequency converter, current THD, efficiency.

# Вопросы прогнозирования надежности силовых электромагнитных устройств для мехатронных систем

Бочкарев И.В.

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,  
г. Бишкек, Кыргызстан

**Аннотация.** Разработана методика экспериментального исследования коммутационных перенапряжений. Определены законы распределения кратностей перенапряжений, воздействующих на обмотку управляющего электромагнита в различных режимах работы.

**Ключевые слова:** силовые электромагнитные устройства, фрикционный тормоз, обмотка управления, надежность обмоток, коммутационные перенапряжения, кратность перенапряжения, гистограмма относительного количества появлений перенапряжений

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ информационных источников показывает, что работы по оценке и созданию методов прогнозирования надежности мехатронных систем, в которых управление их рабочих органов осуществляется посредством силовых электромагнитных устройств (ЭМУ), таких как фрикционные муфты или тормоза [1-3], практически не затрагивают вопросов, касающихся непосредственно самих этих устройств. В известной степени ситуация является закономерной. В отличие, например, от электродвигателей и элементной базы систем управления, являющихся наиболее массовой продукцией электромашиностроения и электронной промышленности, количество находящихся в эксплуатации ЭМУ значительно меньше. Частный характер имеющейся информации при существенных различиях в конструкции, технологии изготовления и условиях применения существующих ЭМУ, позволяет проводить на стадии проектирования в лучшем случае лишь качественную оценку показателей надежности вновь разрабатываемых устройств.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Заинтересованность в проведении глубоких и обобщающих исследований процессов старения и износа в ЭМУ до недавнего времени сдерживалась тем, что при традиционно реализуемых конструктивных и схемных решениях доля отказов мехатронных систем, приходящихся на их ЭМУ, оказывалась сравнительно небольшой. Это связано, прежде всего, со сравнительной простотой и высокой технологичностью ЭМУ в целом и, в частности, обмоток их электромагнитного привода, являющихся с точки зрения надежности наиболее слабым звеном ЭМУ.

На рис.1 изображена принципиальная компоновка основных активных частей однодисковой муфты или тормоза. Магнитная система состоит из магнитопровода, имеющего наружный 1 и внутренний 2 полюса и фланец 3,

выполненные из магнитомягкой стали. Между полюсами размещена обмотка 4 и постоянный магнит 5. Дисковый якорь 6 закреплен на упругой мембране 7, которая посредством узла крепления 8 устанавливается на приводном валу.

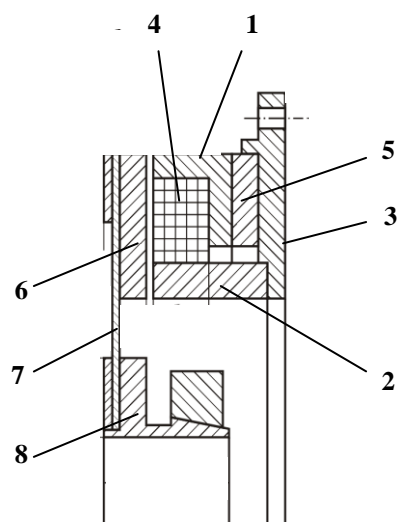


Рис. 1. Принципиальная конструктивная компоновка однодисковой муфты или тормоза

При отсутствии напряжения на обмотке 4 магнитный поток постоянного магнита 2 притягивает якорь 6 к полюсам 1 и 2 магнитопровода. Таким образом, сопрягаемые поверхности якоря и полюсов образуют фрикционный узел ЭМУ с магнитоэлектрическим приводом. За счет сил трения между указанными элементами создается усилие сцепления. Это усилие может быть использовано или для передачи вращающего момента между ведущим и ведомым валами (если данная конструкция использована для муфты), или для торможения (если, например, магнитопровод закреплен неподвижно).

При подключении обмотки 4 к источнику питания она создает магнитный поток, направленный встречно потоку постоянного магнита 2. Тем самым усилие притяжения якоря 6 к полюсам исчезает и он под действием усилия упругой мембраны 7 отходит от магнитопровода. За счет этого муфта (или тормоз) размыкается. При снятии напряжения магнитный поток постоянного магнита 2 снова притягивает якорь 6 к полюсам магнитопровода.

Наличие кольцевого открытого паза значительно упрощает операции изготовления обмоток управления ЭМУ – после намотки на шаблон и бандажировки обмотка укладывается без последующей формовки и дополнительной деформации ее проводников, характерных для всыпных обмоток электродвигателей. Отмеченная особенность обуславливает низкий уровень первоначальной дефектности обмоток, что подтверждается проведенными исследованиями, результаты которых для провода типа ПЭТВ-2, имеющего диаметр  $d_2 = 0,75$  мм, приведены в табл. 1.

В [4] показано, что при рядовой укладке витков, за счет снижения уровня коммутационных перенапряжений, воздействующих на изоляцию соприкасающихся пар проводников, время безотказной работы шаблонных обмоток на 25-30% выше, чем у всыпных.

Результаты проведенных исследований электродвигателей со встроенными силовыми ЭМУ типа тормозов и муфт [1, 3] показывают, что современные требования, предъявляемые к массогабаритным параметрам и показателям быстродействия этих устройств, могут быть обеспечены за счет реализации существенно более высокого использования активных материалов их управляющих электромагнитов по сравнению с имеющим место ранее.

Это обеспечивается путем применения специальных схем форсировки срабатывания и отключения ЭМУ, что значительно ужесточает нагрузки, воздействующие на обмотки их управляющих электромагнитов в переходных режимах. Существующие требования к быстродействию растормаживания тормоза, например, обеспечиваются за счет кратковременного увеличения плотности тока в обмотке до 50-90 А/мм<sup>2</sup>. Коммутация цепей постоянного тока, применяемых для обеспечения форсировки отключения управляющего электромагнита, обуславливает 10-15-кратный уровень перенапряжений, воздействующий на изоляцию обмотки.

Наличие отмеченных выше запасов по надежности ЭМУ в целом оправдывает ужесточение режимов их работы. Однако отсутствие обоснованных, обобщенных моделей надежности, устанавливающих количественную зависимость показателей надежности от технологических и эксплуатационных факторов, делает в значительной степени неопределенной оптимальность решений, принимаемых в настоящее время на стадии проектирования ЭМУ.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Учитывая известные рекомендации, касающиеся общих методологических принципов решения задач надежности, и их апробирования, в частности, при создании методик долговечности асинхронных электродвигателей

[4], представляется необходимым для количественной оценки влияния особенностей ЭМУ на их показатели надежности проведение следующих исследований:

- 1) исследование коммутационных перенапряжений в обмотках управляющих электромагнитов при различных схемах форсировки;
- 2) проведение испытаний на наработку ЭМУ;
- 3) определение реальных значений параметров законов распределения отказов разрабатываемых устройств.

Опыт эксплуатации различных типов ЭМУ, а также специальные исследования [5] показали, что коммутационные перенапряжения (КП) существенно влияют на надежность обмоток. Установлено [6], что в низковольтных устройствах КП сами по себе не влияют на старение изоляции. Принципиальная модель развития отказа обмотки выглядит так: при многократных коммутационных операциях электродинамические усилия между проводниками и резкие увеличения температуры обмотки в режиме форсировки срабатывания (тепловой удар) снижают электрическую прочность изоляции, КП вызывают пробой изоляции, имеющей различные дефекты, образованные как при изготовлении обмотки, так и в процессе эксплуатации.

Величина и форма КП существенно зависят от волновых параметров двигателя и питающей сети, свойств коммутационной аппаратуры, мгновенных значений напряжения и скорости изменения тока в момент коммутации, неравномерности замыкания и размыкания контактов, а также их вибрации (дребезга) и др. Многие из перечисленных факторов, а также их комбинации имеют случайный характер, поэтому теоретически предопределить величины КП в настоящее время не предоставляется возможным. Основным методом исследования КП является экспериментальный. Однако ввиду кратковременности, неоднозначности и случайного характера процессов, подлежащих регистрации и измерению, при экспериментальных исследованиях возникают существенные трудности.

Анализ возможностей существующей аппаратуры для измерения импульсных напряжений показывает следующее. Импульсные вольтметры с амплитудным детектированием и импульсные вольтметры компенсационного типа по своему принципу действия позволяют измерять лишь периодическую последовательность импульсов одинаковой амплитуды. Вольтметры, основанные на диодно-емкостных расширителях импульсов, достоверно реагируют лишь на единичные и редко повторяющиеся импульсы, имеющие скважность, на несколько порядков большую, чем КП.

Таблица 1

Сравнительный уровень дефектности обмоток

Стадия изготовления обмотки	Пробивное напряжение, кВ ( $U_{cp}/\sigma$ )	
	всыпные обмотки асинхронных двигателей	кольцевая обмотка управляющего электромагнита
В состоянии поставки провода	7,95 / 3,5	
После намотки на шаблон	7,58 / 3,5	7,78 / 3,45
После укладки	6,7 / 2,8	7,7 / 3,4

Примечание:  $U_{cp}$  – среднее значение пробивного напряжения;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение

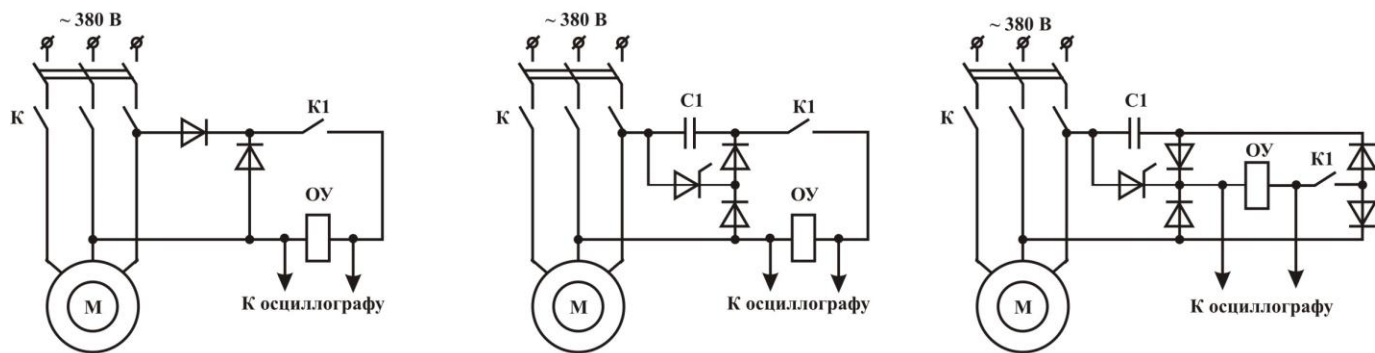


Рис. 2. Схемы управления электромеханического тормоза:  
 а – однополупериодная без форсировки; б – однополупериодная с форсировкой растормаживания;  
 в – двухполупериодная с форсировкой растормаживания

Следовательно, с учетом однократности, кратковременности коммутационного процесса, большой крутизны фронтов и частоты следования импульсов малой длительности, составляющих исследуемый сигнал, наиболее пригодными для измерения характеристик коммутационного процесса являются осциллографические методы.

Экспериментальные исследования проводились с использованием тормозов типа ТПМ [1]. Рассмотрены схемы управления, приведенные на рис. 2, где ОУ – обмотка управления тормоза. На основании отработанной методики регистрации КП, проведены измерения значений перенапряжений, возникающих в обмотке при ее подключении к источнику питания и растормаживании тем самым тормоза (в том числе с форсировкой при помощи предвключенного конденсатора С1 по рис. 2, б, в) и при отключении питания и форсировке перевода тормоза в режим торможения посредством разрыва цепи со стороны постоянного тока контактом К1 [1]. Для каждой коммутационной операции и схемы питания проведено по 1000 измерений.

Для использованного в проведенных экспериментальных исследованиях осциллографа С1-70 был дополнительно изготовлен резистивно-емкостной делитель напряжения, схема которого показана на рис. 3.

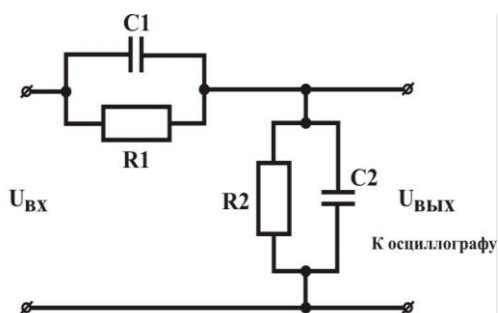


Рис. 3. Принципиальная схема делителя напряжения

Параметры его элементов:  $R_1 = 1-2$  мОм,  $R_2 = 10$  мОм,  $C_1 = 4,7$  пФ,  $C_2 = 850$  пФ. Настройка на коэффициент деления  $k = 1:500$  и частотная компенсация осуществляется изменением сопротивлений при подаче на делитель прямоугольных импульсов длительностью от 0,1 до 10 мкс. Это позволило регистрировать исследуемые напряжения с амплитудой от 20 до 10000 В.

Результаты измерения сведены в гистограммы, приведенные на рис. 4, 5.

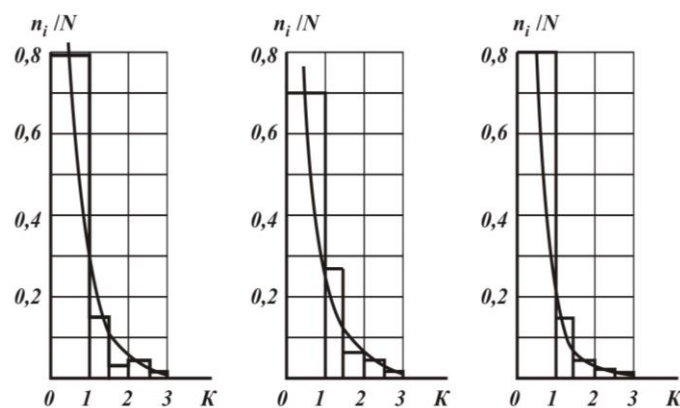


Рис. 4. Гистограммы относительного количества появлений перенапряжений на обмотке управляющего электромагнита при включении

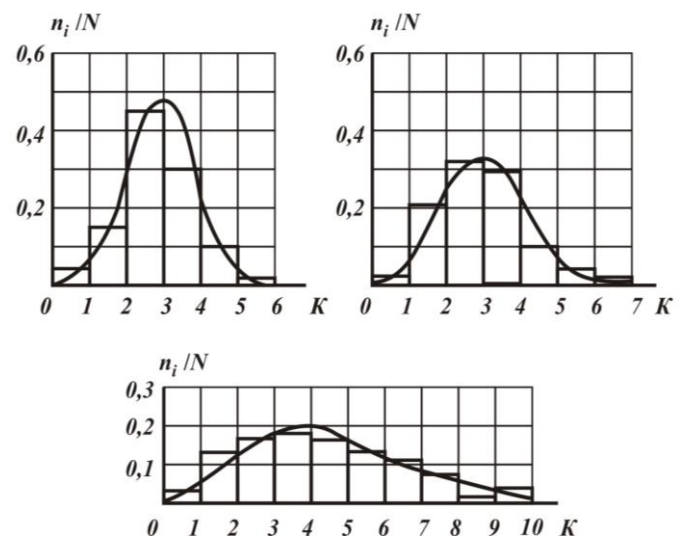


Рис. 5. Гистограммы относительного количества появлений перенапряжений на обмотке управляющего электромагнита при отключении



На гистограммах по горизонтальной оси отложены кратности КП, по вертикальной оси – значения относительного числа  $n_i / N$  появлений перенапряжений в  $i$ -ом интервале кратностей КП, где  $n_i$  – количество перенапряжений данной величины КП,  $N$  – общее количество коммутационных операций.

Анализ всего объема полученных данных показывает, что максимальная кратность перенапряжения при отключении обмотки управляющего электромагнита от сети составляет  $K = 9,5$ . Подключение к источнику питания сопровождается значительно более низким уровнем КП:  $K = 2,5-2,8$ . Отмечена существенная зависимость КП от схемы включения обмотки электромагнита.

Представленные в виде гистограмм данные аппроксимированы аналитическими зависимостями распределения (см. табл. 2).

Таким образом, разработанная методика экспериментального исследования коммутационных перенапряжений позволила определить законы распределения кратностей перенапряжений, воздействующих на обмотку управляющего электромагнита ЭМУ. Полученные распределения позволяют оценить вероятность появления КП различных кратностей и могут быть использованы при разработке модели надежности обмотки управляющих электромагнитов ЭМУ.

#### Выводы

1. Проанализированы особенности силовых электромагнитных устройств типа муфт или тормозов с точки

зрения их надежности. Отмечено отсутствие в настоящее время достоверных методов оценки показателей надежности таких устройств на стадии их проектирования.

2. Разработана методика экспериментального исследования коммутационных перенапряжений. Определены законы распределения кратностей перенапряжений, воздействующих на обмотку управляющего электромагнита.

3. Полученные распределения позволяют оценить вероятность появления КП различных кратностей и могут быть использованы при разработке модели надежности обмотки управляющих электромагнитов ЭМУ ПМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарев И.В. Быстродействующие электромеханические тормозные устройства для электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 288 с.

2. Ряховский О.А. Справочник по муфтам / О.А. Ряховский, С.С. Иванов. – Л.: Политехника, 1991. – 384 с.

3. Бочкарев И.В. Электродвигатели с встроенным электромеханическим тормозом для станков и роботов / И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев. – Бишкек: Илим, 2005. – 314 с.

4. Гольдберг О.Д. Надежность электрических машин / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская. – М.: Знание, 1976. – 288 с.

5. Бернштейн Л. М. Изоляция электрических машин общепромышленного значения. – М.: Энергия, 1981. – 376 с.

6. Ермолин Н.П. Надежность электрических машин / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.

Таблица 2

Коммутационные перенапряжения в обмотке управляющего электромагнита при различных схемах управления

Схема включения	Режим работы	Максимальное КП		Закон распределения кратностей КП	
		кратность К	абс. знач. U, кВ	вид распределения	математическое выражение, $f(K)$
Рис. 1, а	включ.	3,0	1,61	экспоненциальное	$1,82exp(-1,82K)$
	отключ.	5,9	3,17	Вейбулла	$0,0429K^{2,9}exp(-0,11K^{3,9})$
Рис. 1, б	включ.	2,08	1,50	экспоненциальное	$1,82exp(-1,82K)$
	отключ.	7,1	3,82	Вейбулла	$0,062K^{2,1}exp(-0,02K^{3,1})$
Рис. 1, в	включ.	2,5	1,34	экспоненциальное	$2,42exp(-2,42K)$
	отключ.	9,5	5,10	Вейбулла	$0,066K^{1,2}exp(-0,03K^{2,2})$

# The Prediction Reliability of the Power of Electromagnetic Devices for Mechatronic Systems

Bochkarev I.V.

Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov,  
Bishkek, Kyrgyzstan

**Abstract.** The technique of experimental study of switching surges. Defined distributions multiplicities surge acting on the electromagnet coil control in various modes.

**Keywords:** power electromagnetic device, the friction brake coil control, reliability, winding, switching overvoltage, overvoltage multiplicity, a histogram of the relative amount appearances surge.

# Моделирование работы литий-ионного аккумулятора в суровых климатических условиях

Андреев А.А., Возмилов А.Г., Калмаков В.А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

г. Челябинск, Российская Федерация

[toxin711@rambler.ru](mailto:toxin711@rambler.ru)

**Аннотация.** Применение аккумуляторов на основе литий-ионной технологии в условиях, связанных с работой при низких температурах, требует исследования зависимости эксплуатационных характеристик аккумулятора от температурного фактора. Применение моделирования, и в частности метода эквивалентных схем замещения, может быть целесообразно на начальном этапе исследований. В работе используется модель литий-ионного аккумулятора с одним RC-блоком и проводится подбор параметров модели с помощью экспериментальных данных, полученных при разряде литий-железосфатного аккумулятора при различных температурах. Результаты симуляции разряда верифицированной модели аккумулятора с высокой точностью совпадают с экспериментальными данными. Результаты моделирования работы аккумулятора в суровых климатических условиях позволяют оценить негативное влияние отрицательных температур на эксплуатационные параметры аккумулятора и сделать вывод о необходимости применения систем поддержания оптимальной рабочей температуры аккумуляторов.

**Ключевые слова:** литий-ионный аккумулятор, моделирование литий-ионных аккумуляторов, схема замещения литий-ионного аккумулятора.

## ВВЕДЕНИЕ

Аккумуляторы (химические источники тока) сегодня находят широкое применение в различных технических системах – от мобильных телефонов и электроинструмента до систем резервного электроснабжения. К одним из наиболее актуальных и перспективных направлений применения аккумуляторов можно отнести электрический и гибридный транспорт, а также накопители энергии для автономных энергетических систем. [1-3]

Распределенная и автономная энергетика являются особенно актуальными для России, так как по разным оценкам от 60 до 70 % территории не охвачено централизованным электроснабжением. На этой территории проживает до 20 млн. человек и сосредоточено до 15 % основных фондов РФ [4]. Именно на этих территориях наиболее целесообразно применение автономных энергосистем на основе возобновляемых источников энергии. Применение автономных энергоустановок охватывает все стороны жизни человека, где необходим источник электроэнергии: электроснабжение удаленных населенных пунктов, оборудования по охране границ и ответственных объектов, нефте- и газопроводов, организация работ в пустыне и мониторинг удаленных территорий, энергопитание удаленных объектов, временных парковок, электроснабжение и охрана ответственных инженерных сооружений, энергопитание аппаратуры сотовых операторов. Аккумулятор является неотъемлемой частью автономной энергосистемы, сглаживая кривую вы-

работки электроэнергии и позволяя поддерживать необходимый уровень электропитания потребителя.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На эксплуатационные характеристики аккумулятора и срок его службы оказывает влияние множество факторов (динамика разряд-зарядных процессов, глубина разряда, рабочая температура, температура хранения и др.) [1,5]. Особенно необходимо отметить фактор температуры, который является существенным в суровых климатических условиях России, в некоторых регионах которой среднегодовая температура составляет – 23 °С [6]. Работа аккумулятора при такой температуре может привести к снижению разрядной емкости и уменьшению срока службы аккумулятора.

Исследование влияния суровых климатических условий на характеристики аккумуляторов может проводиться как путем натуральных испытаний [7], так и методом моделирования. Проведение натуральных исследований требует значительных финансовых и временных затрат. Поэтому на начальном этапе исследований целесообразно применение компьютерного моделирования, позволяющего имитировать работу аккумуляторов, анализировать полученные характеристики и зависимости, а также прогнозировать поведение аккумуляторов при различных внешних условиях.

Для моделирования аккумуляторов существует ряд методов [8-10], наибольшее распространение из которых получил метод использования схем замещения, который обеспечивает приемлемую точность при невысоких вычислительных затратах. В работе была использована модель литий-ионного аккумулятора на основе схемы замещения с одним RC-блоком, разработанная Robin Jaskey из компании Mathworks [11]. Данная модель представляет собой схему замещения ячейки (рис. 1), включающую источник напряжения  $E_m$  (ЭДС ячейки), RC-ветвь из конденсатора  $C_1$  и резистора  $R_1$ , и последовательного резистора  $R_0$ . Параметры всех элементов схемы замещения изменяются в зависимости от температуры аккумулятора ( $T$ ) и степени заряда (SOC). Это изменение реализовано с помощью двумерных таблиц значений каждого элемента, где строки представляют собой значения степени заряда, а столбцы значения температуры. Модель способна прогнозировать изменение напряжения аккумулятора в ходе работы и оценивать SOC в реальном времени с учетом изменения окружающей температуры [12], но для того, чтобы она могла быть использована для исследования, необходима ее верификация – подбор параметров модели, при которых поведение модели адекватно представляет изменение параметров аккумулятора при его работе.

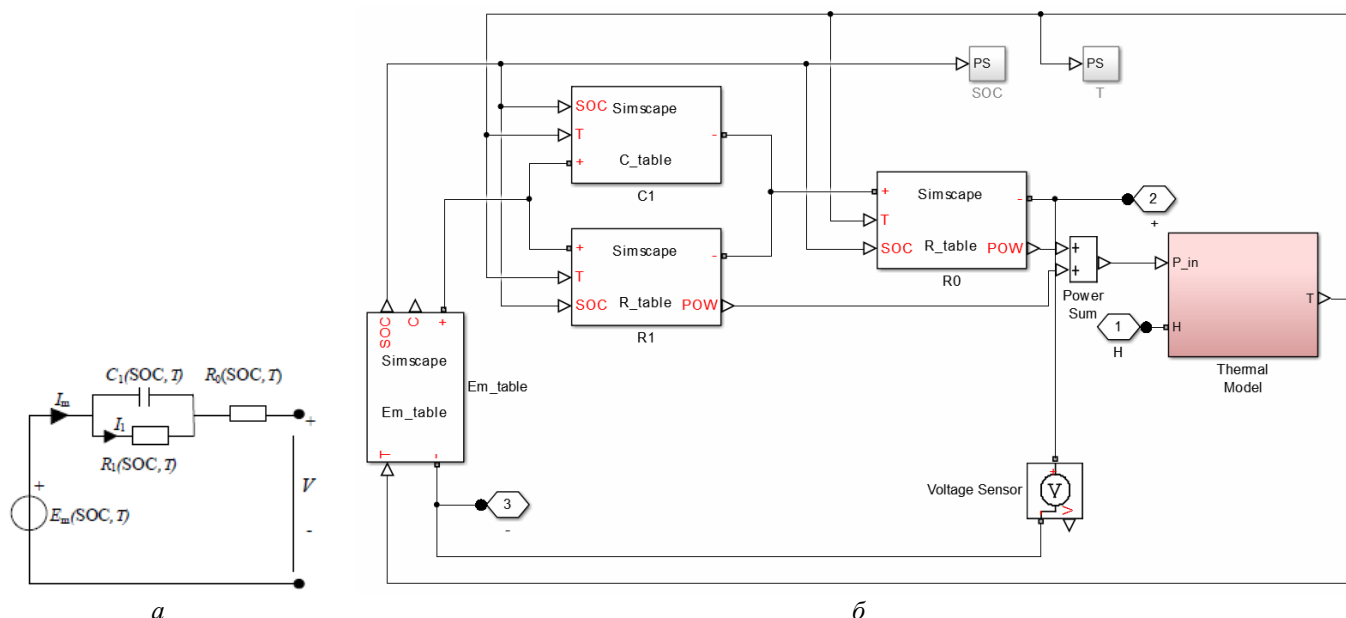


Рис. 1. Схема модели аккумуляторной ячейки: а – электрическая схема замещения, б – схема в программе Simulink

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В качестве исследуемого аккумулятора был выбран LiFePo4 (литий-железофосфатный аккумулятор) Zipru Flightmax. Некоторые характеристики исследуемой ячейки, необходимые для дальнейшего моделирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики исследуемой ячейки

Параметр	Значение
Номинальная емкость	2100 мАч
Масса	0,063 кг
Длина	0,121 м
Ширина	0,044 м
Толщина	0,006 м

Величина удельной теплоемкости ячейки была принята стандартной для LiFePo4 аккумуляторов равной 955,4 Дж/кг·К [13], а коэффициент теплопередачи между ячейкой и внешней средой равным 10 Вт/м<sup>2</sup>·К, что соответствует естественному охлаждению.

Для экспериментального исследования влияния условий работы на характеристики накопителя энергии была собрана экспериментальная установка, включающая исследуемый аккумулятор, зарядное устройство Imax B6 AC и термодатчик для измерения температуры аккумулятора в ходе работы. Для сбора данных была использована программа Logview, запущенная на ноутбуке, соединенном с зарядным устройством через интерфейс RS-485.

В ходе эксперимента были проведены разряд исследуемого аккумулятора токами 0,5 А и 1 А при температуре 25° С, а также разряд аккумулятора током 1 А при температуре -15° С в климатической камере.

Графики полученных зависимостей разрядного напряжения от SOC, температуры и тока разряда, аппроксимированные в программе Matlab, представлены на рис. 2.

В качестве контрольных точек степени заряда были приняты значения 0; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 0,95; 0,98; 0,99; 1. Плотность контрольных точек, расположенных вблизи уровней полного разряда и полного заряда увеличена, с целью более точно передавать резкое изменение напряжения аккумулятора в начале и конце разряда.

Полученные разрядные кривые  $U_{I_1}(SOC, 25^\circ C)$  и  $U_{I_2}(SOC, 25^\circ C)$ , где  $I_1 = 0,5A, I_2 = 1A$  (рис. 2) позволяют определить внутреннее сопротивление аккумулятора при температуре 25° С по разнице напряжений, соответствующих разным токам разряда, в контрольных точках:

$$R(SOC, 25^\circ C) = \frac{U_{I_1}(SOC, 25^\circ C) - U_{I_2}(SOC, 25^\circ C)}{I_2 - I_1} \quad (1)$$

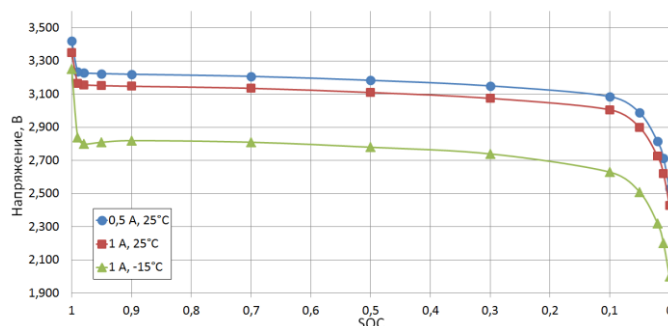


Рис. 2. Зависимость разрядного напряжения от SOC, температуры и тока разряда

Расчитанные значения внутреннего сопротивления и аппроксимирующая их кривая представлены на рис. 3. Полученные значения внутреннего сопротивления и разрядного напряжения в контрольных точках позволяют определить ЭДС аккумулятора:

$$E_m(SOC, 25^\circ C) = U_{I_1}(SOC, 25^\circ C) + I_1 \cdot R(SOC, 25^\circ C) = U_{I_2}(SOC, 25^\circ C) + I_2 \cdot R(SOC, 25^\circ C). \quad (2)$$

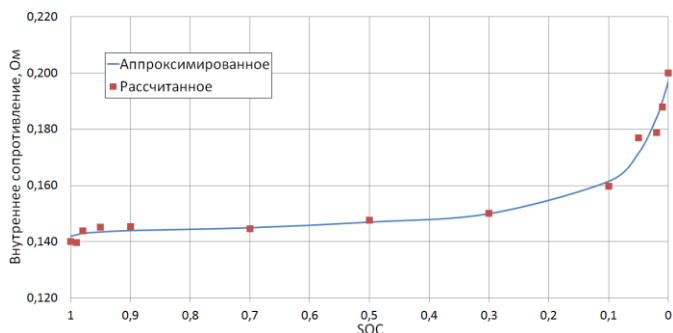


Рис. 3. Зависимость внутреннего сопротивления от SOC при 25 °С

ЭДС аккумулятора слабо зависит от температуры, в отличие от сопротивления, которое существенно возрастает с понижением температуры. [13-15]. Методом подбора параметров (parameter estimation) были определены значения внутреннего сопротивления аккумулятора при температуре -15 °С  $R(\text{SOC}, -15\text{ °С})$ , при которых смоделированная кривая максимально близка к полученной экспериментально. Зависимость внутреннего сопротивления аккумулятора от SOC и температуры представлена на рис. 4. Как видно из графика, сопротивление при температуре -15 °С в 3,5 раза больше, чем при температуре 25 °С.

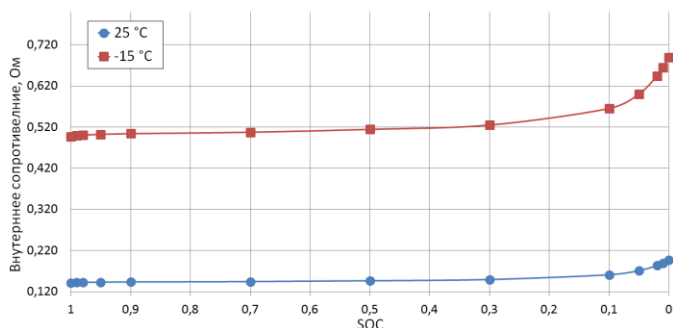


Рис. 4. Зависимость внутреннего сопротивления от SOC и температуры

Для проверки адекватности модели было проведено сравнение разрядных кривых аккумулятора, полученных с помощью моделирования и экспериментальных данных для температур 25 °С (рис. 5, а) и -15 °С (рис. 5, б). Ана-

лиз полученных результатов (см. рис. 5) показывает хорошую сходимость результатов моделирования с экспериментальными данными, что позволяет судить о том, что модель достаточно точно соответствует испытываемому аккумулятору и может быть использована для дальнейшего исследования.

С помощью верифицированной модели была смоделирована работа аккумулятора при его разряде током 1 А при различных температурах (рис. 6). Доступная разрядная емкость исследуемого аккумулятора при температуре -23 °С составляет 1800 мАч, а ее снижение по сравнению с разрядом при температуре 25 °С (2300 мАч) превышает 20%. Полученные результаты моделирования позволяют оценить неблагоприятное влияние отрицательной рабочей температуры на величину разрядной емкости аккумулятора.

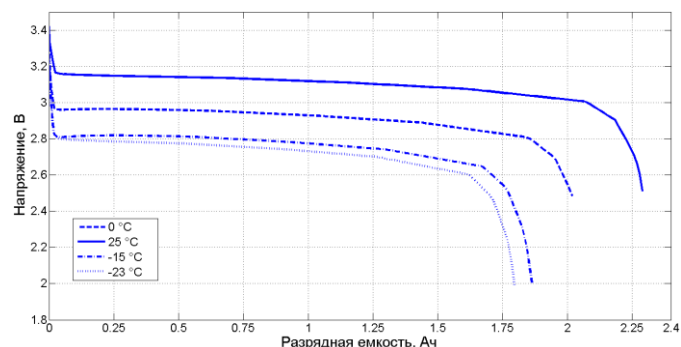


Рис. 6. Результаты моделирования разряда аккумулятора при различных температурах

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Использование метода эквивалентных схем замещения в прикладных исследованиях, связанных с эксплуатацией аккумуляторов, позволяет получить результаты, с высокой точностью согласующиеся с экспериментальными данными.

По результатам моделирования работы литий-железо-фосфатного аккумулятора при изменении температуры окружающей среды от 25 °С до -15 ° коэффициент роста сопротивления составил 3,5, а снижение доступной разрядной емкости превысило 20%.

Одним из способов повышения эффективности работы аккумуляторов, эксплуатируемых в суровых климатических условиях, является применение систем поддержания оптимальных условий работы.

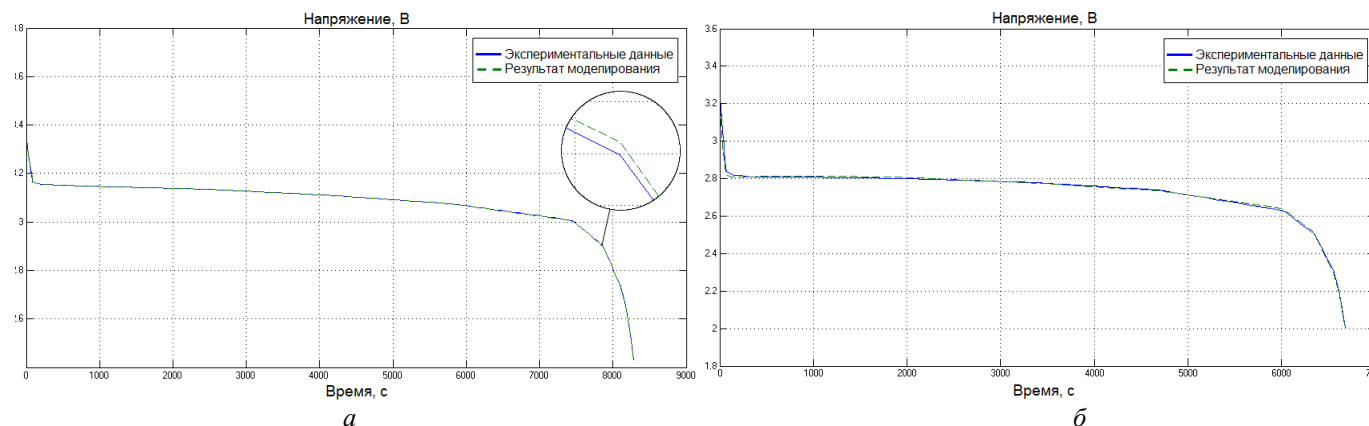


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования разряда аккумулятора: а – при температуре 25 °С; б – при температуре -15 °С



Полученная модель аккумулятора может служить основой для ее дальнейшего развития за счет: учета в модели изменения характеристик при старении аккумулятора, расширения температурного диапазона, охватываемого моделью, за счет добавления новых контрольных точек температуры, а также включению в модель блоков, симулирующих устройства для поддержания оптимальной температуры аккумуляторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reddy T.B. Linden's handbook of batteries. – New York: McGraw Hill Companies. 2011. – 1457 p.
2. Portable equipment moves to lithium ion cells // Purchasing. – 2000. – vol. 128, is 2. – P. 92-93.
3. [https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery) (дата обращения 3.07.15).
4. Соломин Е.В. Возобновляемые источники энергии. Новые возможности человечества // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2013. – № 10. – С. 38-40.
5. <http://www.mpoweruk.com/life.htm> (дата обращения 10.07.15).
6. <http://stroy-svoimi-rukami.ru/fundament/temperatura/43> (дата обращения 10.07.15).
7. Илимбетов Р.Ю. Разработка экспериментального стенда для исследования работы накопителя энергии ветроэнергетической установки / Р.Ю. Илимбетов, В.А. Калмаков, А.А. Андреев, Н.П. Тыченко // Научный журнал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Челябинская государственная агроинженерная академия». – 2014. – Т. 70. – С. 67-70.

8. Roscher M. A. Detection of Utilizable Capacity Deterioration in Battery Systems / M.A. Roscher, J. Assfalg, O.S. Bohlen // Vehicular Technology, IEEE Transactions on. – Vol. 60, is. 1. – P. 98-103.

9. Chen M. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance / M. Chen, G.A. Rincón-Mora // Energy Conversion, IEEE Transactions on. – 2006. – Vol. 21, is. 2. – P. 504- 511.

10. Ceraolo M., Experimentally Determined Models for High-Power Lithium batteries / M. Ceraolo, G. Lutzemberger, T. Huria // SAE Technical Paper. – 2011.

11. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36019-lithium-battery-model-simscape-language-and-simulink-design-optimization> (дата обращения 20.07.15).

12. Huria T. High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells / T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, R. Jackey // 2012 IEEE Electric Vehicle Conference. – 2012.

13. <http://www.cse.anl.gov/us-china-workshop-2011/pdfs/batteries/LiFePO4%20battery%20performances%20testing%20for%20BMS.pdf> (дата обращения 5.08.15).

14. Zobia A. H. Energy Storage-Technologies and Applications – InTech, 2013. – 328 p.

15. Li Y. Investigation of the internal resistance in LiFePO4 cells for battery energy storage system / Y. Li, B. Zhang, M. Chen, D. Yang, J. Liu // Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2014 IEEE 9th Conference on. – 2014. – P. 1596 – 1600.

## Simulation of Lithium Battery Operating under Severe Temperature Conditions

Andreev A.A., Vozmilov A.G., Kalmakov V.A.  
South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[toxin711@rambler.ru](mailto:toxin711@rambler.ru)

**Abstract.** The use of the lithium batteries in the conditions associated with the operation at low temperatures requires the study of the effect of temperature factor on battery performance. Using the simulation, and particularly equivalent circuit models method, may be useful at the initial study stages. The paper describes the use of lithium battery model with one voltage source, one series resistor, and a single RC block for simulating the LiFePO4 battery operation at low temperatures. The model was validated using experimental data obtained by LiFePO4 battery

discharge at different temperatures and showed good accuracy. Simulation results allow to estimate the negative effect of low operating temperature on battery parameters and to make a conclusion about the need for systems creating optimal operating conditions for batteries working under severe temperature conditions.

**Keywords:** lithium cell, lithium cell simulation, electrical equivalent lithium cell model

# Организация обмена данными между адаптивным цифровым трансформатором тока и напряжения и SCADA-системой в стандарте МЭК 61850

Соломин Е.В., Топольский Д.В., Топольский Н.Д.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация

[nii-uramet@mail.ru](mailto:nii-uramet@mail.ru)

**Аннотация.** В статье изложен подход к решению задачи разработки технологии передачи по каналам связи цифровой информации о высокоточных измерениях от удаленного терминала на базе адаптивного цифрового комбинированного измерительного трансформатора тока и напряжения (АЦКТТН) в SCADA-систему. Приводятся конструкция и технические характеристики АЦКТТН, структура канала связи АЦКТТН – SCADA, а также программная модель обмена данными между АЦКТТН и SCADA-системой.

**Ключевые слова:** измерительные трансформаторы, интеллектуальные электрические сети, диспетчерское управление и сбор данных, цифровая подстанция, удаленный терминал, каналы связи.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных направлений текущего развития науки и техники является реализация концепции интеллектуальных электрических сетей. Данное направление научно-технического прогресса характеризуется созданием новых интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ, IED). ИЭУ представляют собой физические устройства, в которых реализована часть системы автоматизации подстанции. Они должны быть связаны на программном уровне со SCADA-системами и обмениваться данными с управляющими устройствами по цифровым каналам связи на всех участках сети в реальном времени. Интеграция ИЭУ в электрические сети совместно с активными элементами, способными изменять параметры и характеристики самих элементов и сети в зависимости от ее режимов работы, позволяет создавать электрические сети нового технологического уклада, характеризующиеся более высокими характеристиками эффективности, надежности и управляемости.

Это предусматривает комплексную модернизацию электрических сетей, автоматизацию энергетических объектов, переход к адаптивной системе управления, исключение ручного управления. Данный процесс включает внедрение интеллектуальных приборов учета электроэнергии, применение цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения, создание полностью автоматизированных цифровых подстанций, разработку новых конструктивных решений, оборудования, систем и методов мониторинга линий электропередачи и трансформаторных подстанций.

В этой связи проводятся прикладные научно-технические исследования и экспериментальная разработка,

целью которых является разработка научно-технических основ создания устройств автоматики, управления и защиты для интеллектуальных электрических сетей с алгоритмами автоматической адаптации к изменениям топологии и параметров режимов электрических сетей с использованием моделирования электрических сетей, функционирующих на основе применения современных технологий управления на основе образца АЦКТТН на примере линий электропередач (ЛЭП) переменного тока класса напряжения 220 кВ с диапазоном измерений тока 300-2000 А, класса точности 0,2S по току и 0,2 по напряжению.

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ АЦКТТН, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЮ И СРЕДСТВА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Основным документом, регламентирующим архитектуру цифровой подстанции, является государственный стандарт [1]. В этой связи разработка АЦКТТН осуществляется в соответствии с его требованиями. Технические решения в области автоматизированных систем управления цифровыми подстанциями изложены в [2]. Вопросы стандартизации при реализации концепции цифровой подстанции рассмотрены в [3]. Опыт разработки цифровых подстанций изложен в [4, 5]. Перспективы создания цифровых программно-аппаратных комплексов цифровых подстанций рассмотрены в [6]. Общие подходы к автоматизации цифровых подстанций содержатся в [7-9].

Группой важнейших параметров электрических сетей являются токи и напряжения в ЛЭП, которые подходят к подстанциям. Измерение токов в настоящее время осуществляется в основном с помощью высоковольтных электромагнитных измерительных трансформаторов тока с масляной или элегазовой высоковольтной изоляцией, преобразующих большие токи высоких напряжений в меньшие токи низких напряжений, которые затем могут быть преобразованы в цифровые коды с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [10]. К недостаткам этих устройств относятся большие масса и габариты, усложняющие их установку на подстанциях. Кроме того, масляные трансформаторы обладают повышенной взрыво- и пожароопасностью, а элегазовые – требуют регулярного контроля давления элегаза. В последние годы основное направление исследований, связанное с измерением токов высоких напряжений, – оптико-электронные измерительные трансформаторы тока на основе эффекта Фарадея [11-14]. Такие приборы выпускаются рядом зарубежных (NxtPhase T&D Corporation, ABB и др.) и отечествен-

ных (НПП Оптилинк, Профотек и др.) фирм. Эти преобразователи имеют заметно меньшую массу, позволяют измерять наряду с переменным также и постоянный ток и передавать оптический сигнал о токе на значительное расстояние. Главным недостатком оптических преобразователей является чрезмерно высокая цена [15-17].

В то же время, традиционное построение преобразователей тока в цифровой код на основе системы «электромагнитный трансформатор тока – АЦП – волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС)» еще не исчерпало своих возможностей. Применение аморфных сплавов для магнитопроводов [18] и компенсационных обратных связей [19] позволяет существенно повысить точность прибора. Кроме того, цена одного комбинированного трансформатора тока и напряжения ниже, чем цена двух трансформаторов тока и напряжения, выполненных в виде отдельных приборов, а надежность – выше. С учетом вышеприведенных требований к современному уровню техники и тенденций ее развития был разработан экспериментальный образец АЦКТТН. Состав устройств, структура и технические характеристики АЦКТТН приведены в [20]. Устройство состоит из высоковольтной части (ВВЧ) и низковольтной части (НВЧ), разделенных между собой высоковольтной изолирующей опорой. На рис. 1 приведены высоковольтные элементы конструкции АЦКТТН.

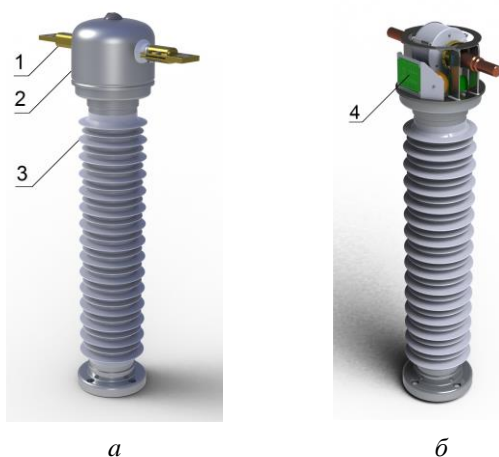


Рис. 1. Элементы конструкции АЦКТТН:  
1 – токоведущий высоковольтный проводник,  
2 – защитный кожух, 3 – высоковольтная  
изолирующая опора, 4 – оборудование ВВЧ

ВВЧ включает первичные преобразователи тока и напряжения, первичный конвертер и первичный источник питания. НВЧ включает вторичный конвертер и вторичный источник питания. ВВЧ и НВЧ связаны между собой ВОЛС, проходящей внутри высоковольтной опоры.

Вторичный конвертер оперирует только цифровыми сигналами и преобразует данные, получаемые от ВВЧ, в выходную посылку стандартного формата и передает их конечному приемнику. Посылка содержит данные об измеренных токе и напряжении, статус трансформатора, а также ряд других параметров. Статус трансформатора информирует о режимах его работы, адаптирующихся в зависимости от наличия и уровня напряжения в ЛЭП. Конечным приемником для вторичного конвертера является

оконечное устройство АЦКТТН, которое представляет собой (устройство сопряжения с шиной процесса) (Merging Unit). Merging Unit (MU) предназначен для сбора данных от измерительных трансформаторов тока и напряжения и передачи этих данных по протоколу МЭК 61850-9-2LE до устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) и других ИЭУ на цифровой подстанции.

Разработка оконечного устройства (Merging Unit) является компромиссным решением для интеграции АЦКТТН в структуру цифровой подстанции (ЦПС), позволяющим разгрузить микроконтроллер вторичного конвертера от вычислительных процедур при преобразовании данных о мгновенных значениях тока и напряжения и дальнейшей передаче преобразованных данных в стандарте МЭК 61850 с учетом внешней временной синхронизации.

#### РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ КАНАЛА СВЯЗИ

Международный стандарт МЭК 61850, регламентирует представление данных о подстанции как объекте автоматизации, а также протоколы цифрового обмена данными между микропроцессорными ИЭУ подстанции (ПС). Его принятие явилось предпосылкой для создания нового поколения подстанций – ЦПС [21]. Канал связи АЦКТТН – SCADA должен обеспечить быстродействие, синхронизацию и помехозащищенность передачи метрологической информации в соответствии с унифицированной платформой обмена данными МЭК 61850. При проектировании его структуры необходимо учитывать физическую топологию сети Ethernet ЦПС. Разработку структуры канала связи проведем на основании анализа особенностей архитектуры программно-технических комплексов.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) ПС традиционно обеспечивают контроль величины потребляемого тока; контроль напряжения на шинах подстанции, контроль положения коммутационных аппаратов, выключателей, разъединителей; контроль состояния аппаратов релейной защиты; осуществление телеуправления [22].

В современных условиях такой набор функций АСУ ТП ПС является весьма ограниченным и не отвечает современным требованиям в области автоматизации энергообъектов. В связи с переходом на технологию SCADA (supervisory control and data acquisition, диспетчерское управление и сбор данных) появилась возможность расширить функции АСУ ТП ПС. Возможность расширения этих функций требует особой архитектуры ПТК. ПТК ЦПС имеют трехуровневую архитектуру. Нижний уровень образуют локальные устройства сопряжения с объектом и цифровые устройства РЗА [23]. Средний уровень образуют базовые серверы системы, устройства синхронизации времени и компьютер-шлюз. Верхний уровень образуют автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов и сторонние SCADA-системы. Функции централизованного сбора, хранения и передачи сигналов в такой системе выполняет один или несколько серверов. Количество серверов определяет степень надежности системы. Количество АРМ определяет степень удобства использования системы. В SCADA-системах энергообъектов реализуются алгоритмы «горячего» резервирования, позволяющие в слу-

чае неисправности автоматически заменить основные элементы системы резервными (без вмешательства персонала), тем самым обеспечивающие постоянную работоспособность системы в целом.

Подобная структура технического комплекса не является жесткой. Возможны различные варианты ее реализации, например, использования одного сервера, совмещенного со шлюзом, или одной рабочей станцией, включающей в себя сервер, шлюз и АРМ. Различные варианты обеспечивают различную степень резервирования и надежности. Для обеспечения информационного обмена между АЦКТТН и SCADA-системой предлагается следующая структура канала связи (рис. 2).

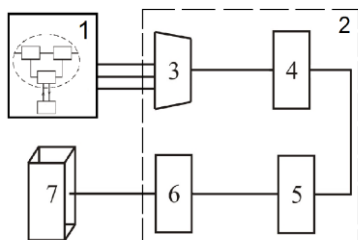


Рис. 2. Структура канала связи АЦКТТН-SCADA:  
 1 – комбинированный датчик тока и напряжения на основе АЦКТТН, 2 – канал связи, 3 – блок сопряжения (Merging Unit), 4 – шина процесса, 5 – P3A, 6 – станционная шина, 7 - сервер SCADA

Алгоритм работы канала связи следующий. После того, как MU получил данные от АЦКТТН по проприетарному протоколу, он должен преобразовать их в SV сообщение, описанное в МЭК 61850-9-2LE. Это жестко структурированный кадр, содержащий 4 фазных тока и 4 фазных напряжения. Так же зафиксированы частоты дискретизации измеряемых сигналов. Они составляют 4000 Гц (80 выборок за период) для целей релейной защиты и коммерческого учета и 12800 Гц (256 выборок за период) для контроля качества электроэнергии. Для передачи SV сообщений формируется стандартизированный Ethernet кадр. Формат кадра показан на рис. 3.

	Preamble (7 bytes)
	Start of frame (1 byte)
Header	Destination address (6 bytes)
MAC	Source address (6 bytes)
Priority tagged	TPID, CLI-flag and VLAN ID (4 bytes)
Type	Ethernet-type / length (2 bytes)
Ethernet-type PDU	APPID (2 bytes)
	Length (2 bytes)
	Reserved 1 (2 bytes)
	Reserved 2 (2 bytes)
	APDU
	FCS (4 bytes)

Рис. 3. Формат кадра SV

В формате кадра указана структура APDU. Это структура, хранящая в себе группу измерений тока и напряжения. Для кадра, передающего 80 выборок за период (SV80), она представлена на рис. 4.

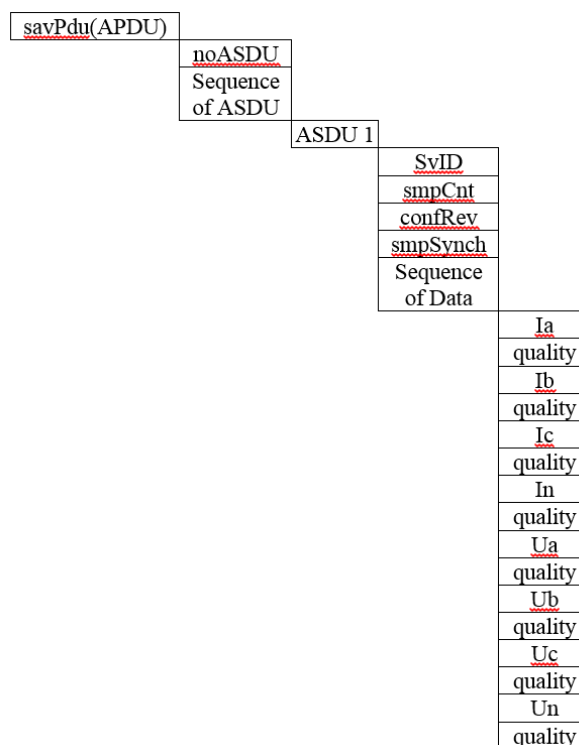


Рис. 4. Структура APDU для SV80

Отличие кадров SV80 от SV256 заключается прежде всего в количестве APDU, помещенных в сообщение. При частоте дискретизации 80 выборок за период в состав сообщения входит 1 ASDU, а при частоте дискретизации 256 выборок за период – 8 ASDU. Устройства P3A, принимающие эти сообщения, должны быть подписаны на рассылку SV80 в шине процесса.

Далее на устройствах P3A, принявших сообщения SV80, будут настроены так называемые отчеты. Отчеты будут хранить в себе данные о состоянии подстанции и будут переданы по протоколу MMS в SCADA-систему по станционной шине.

При разработке канала связи следует учитывать, что при разработке MU необходимо обеспечить ему такие технические характеристики, при которых сеть Ethernet ЦПС сможет нормально функционировать в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61850 [24, 25].

ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ ОБМЕНА ДАННЫМИ МЕЖДУ АЦКТТН И SCADA - СИСТЕМОЙ

В настоящее время SCADA-системы энергообъектов осуществляют сбор и архивирование всех поступающих данных с минимально возможным шагом, не допуская потери информации и несанкционированный доступ, с обеспечением восстановления работоспособности системы при программных или аппаратных сбоях. Такой объем данных, как правило, излишен, однако избыточность информации напрямую связана с ее качеством и возможностями ее обработки. Это в свою очередь позволяет осуществлять предоставление информации о состоянии энергообъекта на все АРМ операторов в режиме реального времени и с обеспечением возможности масштабирования систем.

Научными аспектами моделирования обмена данными между АЦКТТН и SCADA-системой является не только



анализ эффективности функционирования информационной сети АЦКТТН – SCADA и разработка рекомендаций по быстрдействию ИЭУ, выполненные на предыдущем этапе разработки [26], но и вопросы совместимости со стандартом МЭК-61850 оборудования ЦПС и программного обеспечения верхнего уровня. Также существует необходимость изучения возможности использования для разработки нового оборудования для ЦПС универсальных SCADA-систем.

Это объясняется тем, что хотя стандарт МЭК-61850 ориентирован на комплексную автоматизацию подстанций и предусматривает функциональную совместимость оборудования и программного обеспечения от разных производителей, но однако на сегодня потребитель может приобрести в основном только совместимые со стандартом комплектные программно-аппаратные комплексы ведущих мировых брендов. Несмотря на декларированную совместимость со стандартом программное обеспечение верхнего уровня в таких комплексах, как правило, «предпочитает» обмен данными со «своими» устройствами. Благодаря использованию OPC-сервера, совместимого с любым оборудованием, соответствующим стандарту МЭК 61850, обеспечивается возможность применения универсальных SCADA-систем от независимых производителей, которые, как правило, функциональнее и дешевле, чем ПО «от производителя оборудования». Для моделирования взаимодействия АЦКТТН со SCADA-системой были использованы программные продукты SCADA-система MasterSCADA и OPC-сервер MasterOPC\_DI\_61850, предоставленные для этих целей компанией InSAT [27]. Программная часть системы MasterScada представляет собой комплекс программных средств, основанных на технологии связывания и внедрения объектов для промышленной автоматизации OPC (OLE for Process Control). Используемый при проведении моделирования MasterOPC\_DI\_61850 (Рис.5) протестирован с конфигурациями большей части распространенного на российских подстанциях оборудования (SIEMENS, ABB, AREVA, GE, SATEC и др.) и показал полную совместимость с ним. Нагрузочное тестирование сервера показало его высокую производительность [28].

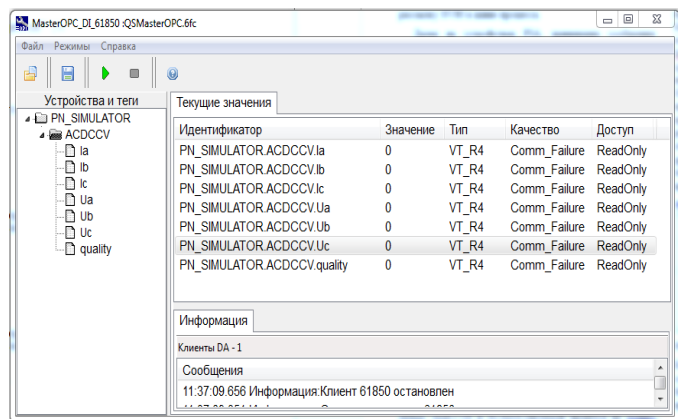


Рис. 5. Окно управления сервером MasterOPC\_DI\_61850

Как уже указывалось ранее, при взаимодействии АЦКТТН со SCADA-системой, данные от АЦКТТН передаются в SCADA через P3A. Схема передачи данных в модели представлена на рис. 6.

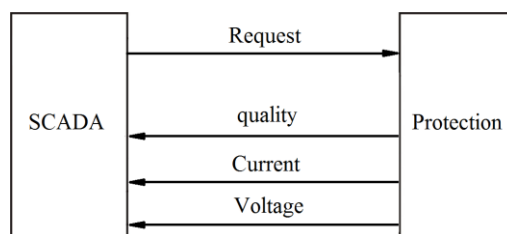


Рис. 6. Схема передачи данных в SCADA-систему

### РЕЗУЛЬТАТЫ

В моделирующем программном комплексе, разработанном на основе взаимодействия MasterSCADA и OPC-сервера MasterOPC\_DI\_61850, организованы формирование, запрос и передача по протоколу МЭК 61850-8-1 MMS-отчетов для SCADA-системы, содержащих метрологическую информацию о высокоточных измерениях тока и напряжения, а также статусе АЦКТТН. Результаты моделирования взаимодействия АЦКТТН со SCADA-системой представлены на рис. 7. Вышеприведенные скриншоты служат доказательством корректной совместной работы АЦКТТН, MasterSCADA и OPC-сервер MasterOPC\_DI\_61850. Интеграция этих программ и устройств в единый комплекс стала возможной в результате совместной работы с производителями программного обеспечения.

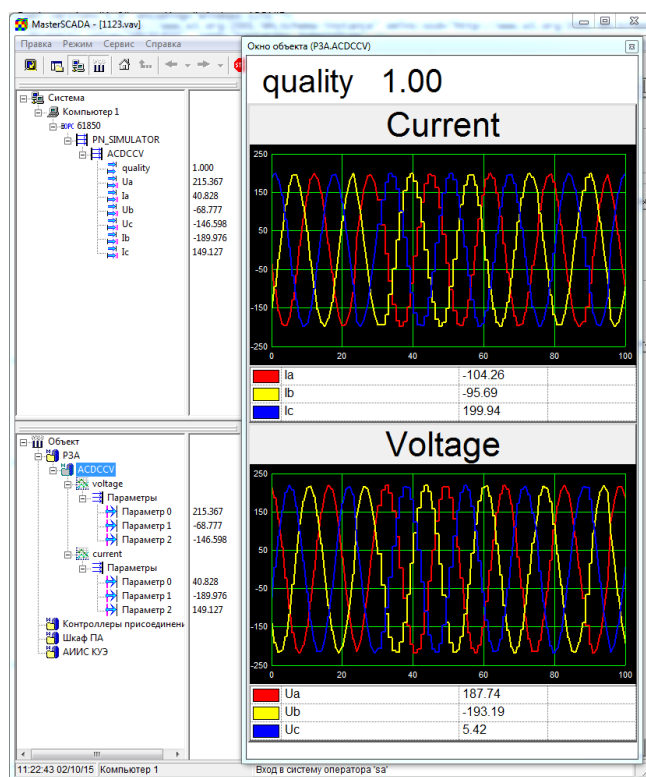


Рис. 7. Окно просмотра/задания значений переменных и тренды соответствующих текущих значений напряжения и тока

### Выводы

1. Разработанные модели ИЭУ адекватны.
2. Разработанная технология обмена данными АЦКТТН – SCADA позволяет в реальном времени производить пе-

редачу метрологической информации в соответствии с МЭК 61850.

3. Реализация оконечного устройства АЦКТН в виде отдельного блока целесообразна.

4. Использование универсальных SCADA-систем при разработке адаптивных устройств автоматики, управления и защиты для интеллектуальных электрических сетей, технически оправдано и снижает стоимость разработки.

5. Внедрение стандартизированных международных протоколов позволяет повысить надежность и достоверность передачи информации, стандартизировать соответствующие технические средства и в целом повысить эффективность взаимодействия ИЭУ. Более полное решение проблемы интеграции ИЭУ будет получено с широким внедрением протокола связи МЭК 61850.

#### ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ Р МЭК 61850-3-2005. Сети и системы связи в подстанциях. Архитектура цифровой подстанции. – М.: Стандартинформ, 2006. – 15 с.
- Калинкин С.Ю. Технические решения в области АСУТП для цифровых подстанций 110/35 кВ. Энергия под ключ / – 2010.
- Маслов А.М. Вопросы стандартизации при реализации концепции Цифровой подстанции / А.М. Маслов, П.Л. Лобанов // Инновационные проекты в электросетевом комплексе IPNES 2011: тезисы докл. 2-й Международной выставки и конф. (6-8 сентября 2011 г.). – 2011.
- Моржин Ю.И. Цифровая подстанция ЕНЭС / Ю.И. Моржин, С.Г. Попов, П.А. Горожанкин, В.Г. Наровлянский, М.А. Власов, А.А. Сердцев // ЭнергоЭксперт. – 2011. – №4(27). – С. 27.-32.
- Чичев С.И. Система контроля и управления электро-техническим оборудованием подстанций / С.И. Чичев, В.Ф. Калинин, Е.И. Глинкин. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 140 с.
- Гельфанд А.М. Перспективы создания цифровых программно-аппаратных комплексов подстанций ЕНЭС / А.М. Гельфанд, П.А. Горожанкин, В.Г. Наровлянский, Л.И. Фридман // Электрические станции. – 2012. – №5. – С. 55.-58.
- Тазин В.О. Инжиниринг систем автоматизации цифровых подстанций / В.О. Тазин, А.В. Головин, А.О. Аношин // Релейщик. – 2012. – №1.
- Горелик Т.Г. Автоматизация энергообъектов с использованием технологии «цифровая подстанция». Первый российский прототип / Т.Г. Горелик, О.В. Кириенко // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №1(05). – С. 86.-89.
- Маслов А.М. Системный подход к автоматизации на основе МЭК-61850 / А.М. Маслов, С. Гершпах // Энергетика и промышленность России. – 2011. – №18(182).
- Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2011. – 526 с.
- Enokihara A., Izutsu M., Sueta T. Optical fiber sensors using the method of polarization-rotated reflection // J. Lightw. Technol. – 1987. – №5. P. 1584-1590.
- Чичев С.И. Оптические высоковольтные измерительные трансформаторы тока и напряжения / С.И. Чичев, Е.И. Глинкин // Электрика. – 2011. – №4. – С. 28.-31.
- Blake J.N., Rose A.H. Fiber-Optic Current Transducer Optimized for Power Metering Applications // Proceedings of the IEEE T&D meeting, Dallas, TX. – 2003. – P. 1-4.
- Zhang H., Qiu Y., Li H., Huang A., Chen H., Li G. High-current-sensitivity all-fiber current sensor based on fiber loop architecture // OPTICS EXPRESS. – 2012. – Vol. 20, no.17.
- Гуртовцев А.Л. Оптические трансформаторы и преобразователи тока // Электрические сети и системы. – 2009. – №3.
- Гуревич В. Оптические трансформаторы тока: нужно быть реалистами // Электрические сети и системы. – 2010. – №4.
- Cease T.W., Johnston P. A magneto-optic current transducer // IEEE Trans. on Power Delivery. – 1990. – vol. 5. P. 548-555.
- Матюк В.Ф. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Часть 1. Анализ моделей / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – №2. С. 3.- 35.
- Волович Г.И. Моделирование трансформатора тока в пакете VisSim // Силовая электроника. – 2014. – №3. С. 66.-69.
- Волович Г.И. Разработка адаптивного цифрового комбинированного трансформатора тока и напряжения для интеллектуальных электрических сетей / Г.И. Волович, Д.В. Топольский, И.Г. Топольская // Приборы и системы. – 2014. – №11. – С.44.-49
- <http://www.rosseti.ru/investment/science/tech/doc/polozenie.pdf>. (дата обращения 22.07.2015).
- Калинин А.Н. Мониторинг электрической распределительной подстанции в системе Trace Mode / А.Н. Калинин, В.Г. Лукинов, Е.А. Белый // «Информатизация и Системы Управления в Промышленности». – 2010. – №2(26). – С. 42.-44.
- Апухтин, Д.Ю. SCADA-система для электроэнергетики «АТЛАНТ» / Д.Ю. Апухтин, А.А. Савинов // «Информатизация и Системы Управления в Промышленности». – 2007. – №2(14). <http://www.isup.ru/articles/2/242/>
- IEC 61850: Communication networks and systems in substations. – Part 3, 5, 7, 8-1, 9-2.
- IEC 61850-90-4 TR. Communication networks and systems for power utility automation. – Part 90-4: Network engineering guidelines for substations.
- Solomin E.V. Integration of Adaptive Digital Combined Current and Voltage Transformer into Digital Substation Ethernet Grid / E.V. Solomin, D.V. Topolskiy, N.D. Topolskiy // Control and Communications (SIBCON): International Siberian Conference on (2015). – 2015. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7147242&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F7133660%2F7146959%2F07147242.pdf%3Farnumber%3D7147242>.
- <http://www.insat.ru/> (дата обращения 22.07.2015).
- <http://www.masteropc.ru/products/?category=1143> (дата обращения 22.07.2015).

# **Arrangement of Data Exchange Between Adaptive Digital Current and Voltage Transformer and SCADA-system under IEC 61850 Standard**

E.V. Solomin, D.V. Topolsky, N.D. Topolsky  
South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[nii-uramet@mail.ru](mailto:nii-uramet@mail.ru)

*Abstract.* The paper presents the approach for solving the task of development of technology of high accuracy measurement digital information transmission via communication system from remote terminal unit on the base of adaptive digital combined current and voltage transformer (ADCCVT) to SCADA-system. We showed the design and technical characteristics of the said transformer, ADCCVT-SCADA communication system structure and also the programming model of data exchange between ADCCVT and SCADA-system. Transformer design features

determining the technology and means of data transmission are analyzed. A possibility of usage of universal SCADA-systems and OPC-servers for control digital substations under IEC 61850 standard are discussed. The modeling results are presented.

*Keywords:* digital measuring transformers; Smart Grid, supervisory control and data acquisition (SCADA); digital substation; remote terminal unit, communication system.

# Алгоритмы автоматической зарядки LiFePO<sub>4</sub> аккумуляторов\*

Соломин Е.В., Топольский Д.В., Топольская И.Г.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

Челябинск, Российская Федерация

[evsolomin@inbox.ru](mailto:evsolomin@inbox.ru)

**Аннотация.** Многообразие алгоритмов заряда быстро развивающихся литий-ионных батарей приводит к отсутствию статистики дифференциального коэффициента деградации батарей, или непониманию разницы уровня состояния заряда после одного или нескольких циклов заряда-разряда. В связи с этим авторы предлагают использовать универсальный обобщенный алгоритм заряда LiFePO<sub>4</sub> батарей с наличием начальной и конечной капельной зарядки, которые приведут к тренировке аккумуляторов, снижению дифференциального коэффициента деградации и тестированию мощности локальной сети, в которой осуществляется заряд. При широком распространении такого подхода можно получить богатую статистическую информацию для дальнейшего улучшения алгоритмов заряда.

**Ключевые слова:** литий-ионный аккумулятор; аккумуляторная батарея; заряд-разряд; дифференциальный коэффициент деградации батареи; LiFePO<sub>4</sub>; уровень состояния заряда.

## ПРИМЕНЕНИЕ КАПЕЛЬНОЙ ЗАРЯДКИ В LiFePO<sub>4</sub> АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЯХ

Ранее опубликованные нами статьи по разработке алгоритмов заряда литий-ионных батарей, предназначенных для эксплуатации в составе тяжелых большегрузных электромобилей и городского транспорта, вызвали отклики в области опциональной капельной зарядки [1]. Причиной разногласий является предложенный универсальный алгоритм заряда. В частности, целый ряд ранее эксплуатируемых литий-ионных аккумуляторов был взрывоопасен [2], в связи с чем капельная зарядка была традиционно исключена. Данный тип батарей является электрохимическим устройством, в котором протекают химические реакции, приводящие в ряде случаев к внутренним замыканиям в связи с перегревом. Это и была основная причина выхода из строя таких аккумуляторов. В течение нескольких миллисекунд развивается цепная реакция типа «домино», которая и приводит к образованию газов и, как следствие, к взрывному эффекту. Одним из вариантов надежной защиты стало внедрение в аккумулятор медных перемычек между электродами, которые плавятся при достижении температуры 10000 °С, что приводит к разрыву цепи.

Действительно, этот тип батарей был также изучен нами в плане применения капельной зарядки. Однако в описанных в [1] алгоритмах, во-первых, упомянуты литий-ионные батареи в целом без указания конкретного типа, а во-вторых, не приведены данные по использованию отключения по температуре, что, как будет показано ниже, может являться одной из ключевых проблем при эксплуатации данного типа аккумуляторов. Тем не менее, внедрение контроля теплового режима изначально пред-

полагалось при проведении исследовательских экспериментов, планируемых по схеме «изучение проблемы – анализ и обобщение – эвристические подходы и гипотезы – проверка экспериментом». Однако в предыдущих статьях эта информация не приводилась.

## ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ КАПЕЛЬНОЙ ЗАРЯДКИ

Капельная зарядка, предлагаемая в ряде случаев для исследования Li-ion аккумуляторов после полного заряда (т.е. 95-99 % от начального), в большинстве случаев может быть опасной из-за того, что батареи этого типа, судя по характеристикам заряда-разряда, не могут поглощать энергию при перезаряде и разрушаются. И напротив, отсутствие капельной зарядки приводит, во-первых, к постепенному неуклонному старению (деградации) аккумуляторов в связи с частичной недозарядкой, а во-вторых, приводит к неэффективному использованию батареи. Таким образом, важна «золотая середина», определить которую как раз и поможет внесение в алгоритм заряда обратной связи по температуре. Это поможет избежать перегрева, вовремя перейти к капельной зарядке, и даже на этапе капельной зарядки позволит контролировать состояние батареи, от заряда к заряду продлевая срок ее службы. Сегодня существует широкий спектр оборудования для капельной зарядки [3, 10-13]. Однако точные данные о времени заряда и температурных особенностях не раскрываются за исключением [14] в части скажности импульсов.

Необходимо отметить, что, как правило, и в эксплуатационной документации на аккумуляторы сведения о капельной зарядке отсутствуют, что вызывает определенные сомнения пользователей и разработчиков в применении капельной зарядки вообще, а тем более, в автоматических режимах. Однако, благодаря исследованиям структуры литий-ионных батарей и полученным результатам длительного тестирования [4, 5], можно сделать вывод о том, что основной заряд может применяться и без капельной зарядки [15-21]. Однако уровень заряда при каждой зарядке будет постепенно и неуклонно снижаться, поскольку в литий-ионных батареях также обнаружен эффект памяти, подобный никель-кадмиевым и никель-металл-гидридным аналогам [5]. Таким образом, литий-ионные батареи также подвержены деградации (старению) и процессам заряда должно уделяться исключительно серьезное внимание.

Деградация элементов литий-железо-фосфатных аккумуляторов происходит из-за того, что материал электрода в них состоит из множества сверхмалых, размером с микрометр, частиц, которые заряжаются и разряжаются индивидуально, причем последовательно, один за другим. Такая модель заряда-разряда известна как «многоэлементная модель» [6]. В процессе заряда высвобождаются ионы лития.

\* Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0154 от 28 ноября 2014 года (Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57714X0154).



Полностью заряженная частица, таким образом, свободна от лития и представляет собой фосфатный ион  $FePO_4$ . Разряд, наоборот, в свою очередь, возвращает ионы лития обратно, а фосфатный ион становится литий-ионным фосфатом  $LiFePO_4$ . Разница в количестве ионов лития, повторно вступающих в связь с фосфатными ионами, приводит к падению напряжения батареи. В данном случае эта разница является дифференциальным коэффициентом деградации батареи и представляет собой нелинейную характеристику старения, известную исследователям как зависимость уровня состояния заряда (УСЗ или «state of charge, SOC») при заряде разными зарядными токами, как правило, от  $0,1\text{ }^{\circ}C$  до  $10\text{ }^{\circ}C$ . Таким образом, разница в количестве ионов приводит к некоторым критическим результатам, приводящим к падению химического потенциала [22].

### ИНДИВИДУАЛЬНОСТЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА БАТАРЕЙ

В связи с вышесказанным, каждый цикл заряда-разряда литий-ионного аккумулятора приводит к определенной его деградации, дифференциальный коэффициент которой является индивидуальным не только для различных типов батарей, но и изделий одного и того же типа, в связи с неоднородностью структуры изделий [23, 24]. Тогда единственным инструментом для «дотягивания» слабой батареи с большим дифференциальным коэффициентом до сильной является зарядка малыми токами с соблюдением всех необходимых предосторожностей по сохранению химической структуры аккумулятора.

В предложенном нами алгоритме [1] капельная зарядка является опциональной (или вспомогательной). При этом предполагалось, что наиболее важной является начальная капельная тренировочная зарядка, представляющая собой серию импульсных зарядов-разрядов для определения УСЗ и соответствующего зарядного тока. Однако, с учетом результатов последних исследований [5], капельная зарядка на заключительной стадии заряда начинает доминировать в плане предотвращения преждевременного старения батарей.

### АЛГОРИТМЫ ЗАРЯДА С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ И КАПЕЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ

В соответствии с вышеприведенными доводами в алгоритме [1] имеется один существенный недостаток – отсутствие контроля по температуре. Причем для каждого типа аккумуляторов граничные условия контроля должны быть индивидуально определены. В нашем случае исследованию подлежат литий-железо-фосфатные батареи  $LiFePO_4$ , как наиболее взрывобезопасные, имеющие высокий электрохимический потенциал.

Тогда дополнение алгоритма системой обратной связи по температуре с учетом начальной тренировочной и конечной завершающей капельной зарядки приведет к следующему виду схемы заряда для аккумуляторных батарей (рис. 1) [7, 9]. В соответствии с представленной схемой могут быть сформированы стадии алгоритма заряда (разряда) батареи, которые будут содержать следующий набор алгоритмов: 1 – алгоритм первоначального температурного тестирования; 2 – алгоритм начальной (тестовой и/или тренировочной) капельной зарядки; 3 – алгоритм основной зарядки током; 4 – алгоритм перманентного температурного тестирования; 5 – алгоритм основной зарядки напряжением; 6 – алгоритм перманентного температурного тестирования; 7 – алгоритм конечной капельной зарядки.

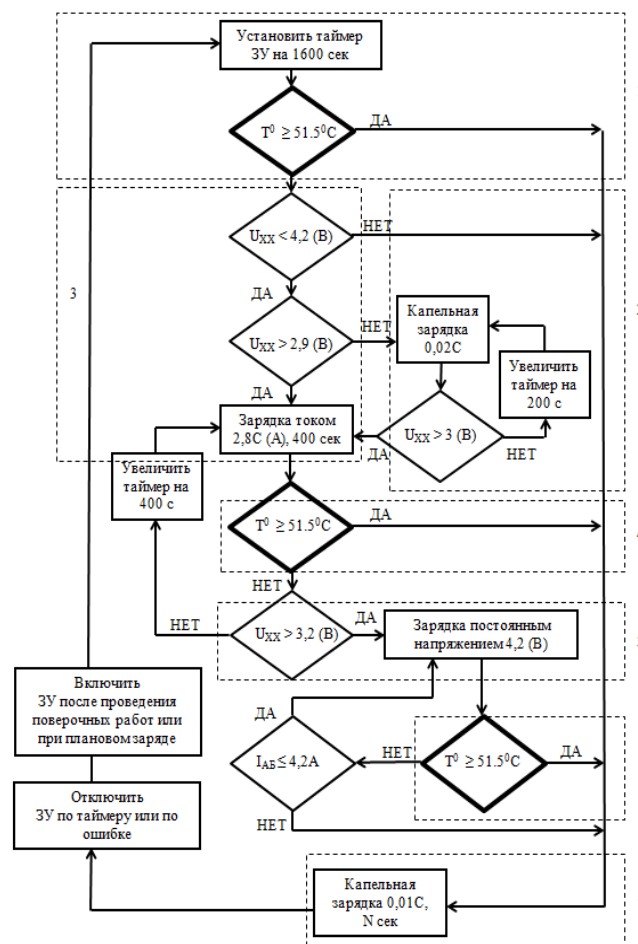


Рис. 1. Алгоритм заряда  $LiFePO_4$  батареи с капельной зарядкой и обратными связями по температуре ( $U_{XX}$  – напряжение холостого хода аккумулятора,  $I_{AB}$  – ток заряда батареи, ЗУ – зарядное устройство,  $T^0$  – температура батареи, С – емкость батареи)

Время конечной капельной зарядки N зависит от типа батареи и производителя [25]. В связи с этим длительность необходимо определять в соответствии с руководством по эксплуатации, рекомендациями производителя и/или опытными данными. Из рис. 1 видно, что процессы капельной начальной и конечной зарядки относительно продолжительны. Для сокращения времени заряда капельную зарядку можно исключить. В этом случае пользователю необходимо сделать соответствующий экономический расчет, исходя из следующих условий:

1. При отсутствии начальной капельной зарядки зарядное устройство может не выявить дисбаланс напряжений в батарее, в связи с чем заряд завершится по таймеру, но батарея полностью заряжена не будет. В этом случае необходимо произвести расчет вероятности появления такого события, сформировать (вычислить) математическое ожидание события на основе статистических методов, оценить ущерб и принять решение по исключению или внедрению данной стадии заряда.

2. При отсутствии конечной капельной зарядки батарея подвержена необратимому старению, причем характеристика деградации является нелинейной. В этом случае

необходимо статистически оценить кривую деградации батарей, заряжаемых без капельной конечной зарядки, в сравнении с батареями, заряжаемыми на 100%. Градиент дифференциального коэффициента даст информацию по принятию решения на основе экономического анализа эффективности применения капельной зарядки с учетом расходов на доставку энергии, время простоя на зарядной станции, а также пусть малой, но неизбежной деградации.

При применении алгоритма к иным, отличным от [7] батареям, необходимо применять другие параметры заряда в соответствии с [1, 8] и номинальными параметрами согласно руководству по эксплуатации изделия. Необходимо отметить, что при соблюдении данного условия алгоритм является универсальным и не может ускорить деградацию батареи. Таким образом, при применении алгоритма положительный эффект является предсказуемым, однако дифференциальный коэффициент деградации должен быть численно определен для каждого типа батарей в процессе соответствующих экспериментальных исследований.

#### ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ

Отдельной темой прикладных исследований является расположение датчика температуры, поскольку, как правило, материал корпуса литий-ионной батареи является полимером и вносит гистерезис и/или смещение данных в график регистрации температуры системой термоконтроля на корпусе элемента. Более того, влияние соседних элементов при итерационных замерах может привести к серьезной дифференциальной ошибке в расчете внутренней температуры элемента. В связи с этим, а также для повышения надежности, производителям батарей может быть рекомендовано помещать датчики температуры внутрь каждого элемента, тем более, что стоимость таких мероприятий будет значительно ниже, чем внедрение компонентов системы балансировки, все шире применяемой в современных литий-ионных батареях [26].

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ СЕТИ

Автоматическое определение мощности сети необходимо для оценки возможности зарядки конкретной аккумуляторной батареи от данного локального источника. При условии, что в виде источника питания может выступать как магистральная, так и локальная сеть на основе маломощных генераторов, данное требование является обязательным для ЗУ. При этом транспортное средство должно быть оборудовано соответствующей аппаратурой контроля. В ряде случаев, особенно при осуществлении заряда на зарядных станциях, созданных на основе возобновляемых источников энергии, осуществлять автоматическое определение мощности сети необходимо в связи с тем, что если зарядные параметры будут недостаточны для проведения качественного заряда, дифференциальный коэффициент деградации значительно возрастет.

Алгоритм определения мощности сети заключается в определении располагаемой мощности за счет измерения падения напряжения на клеммах батареи. В общем виде алгоритм управления ЗУ может быть предложен в следующей последовательности:

- ЗУ подключается гальванически отдельно к сети и батарее согласно соответствующим руководствам по эксплуатации электроприборов. ЗУ при включении измеряет напряжение на клеммах батареи и напряжение сети в ре-

жиме холостого хода (сеть и батарея в данный момент гальванически развязаны);

- система управления ЗУ выдает кратковременный импульс длительностью 3-5 сек для заряда батареи;

- датчик напряжения, которым должно быть оборудовано ЗУ, выдает величину напряжения на клеммах батареи и напряжения сети, после чего производится сравнение текущих и ранее полученных на холостом ходу величин. При наличии просадки напряжения на допустимую величину ЗУ выдает соответствующую информацию на локальный дисплей и автоматически начинает зарядку. Если же напряжение просело более допустимой величины, ЗУ согласно опциональным командам либо отключает батарею с помощью внутренних контакторов, либо переходит в режим зарядки малыми (но соответствующими локальной системе) токами, при этом оповещая пользователя;

- при переходе на зарядку малыми токами необходимо предусмотреть следующий дополнительный алгоритм диагностики: при просадке напряжения на величину, значительно больше допустимой, ЗУ снижает напряжение на 30 % или 70 %, действуя по методу Фибоначчи с поординатным спуском и введением штрафных функций для наиболее быстрого выявления допустимого напряжения.

После нахождения допустимого напряжения ЗУ рассчитывает допустимый ток заряда и включает зарядку, соблюдая основной алгоритм, но уже с соответствующими поправками.

#### ВЫВОДЫ

С точки зрения общенаучных исследовательских подходов предлагаемый подход является компиляцией широкого спектра методов, описанных в результатах мировых исследований. Тем не менее, описанный алгоритм является с точки зрения прикладных исследований новым инструментом, предложенным в результате изучения конкретных батарей [7, 9]. С учетом того, что он опционально объединяет методы, подходы и алгоритмы, применяемые при эксплуатации литий-ионных батарей, позволяя генерировать массовую статистику дифференциальных коэффициентов деградации, предложенный алгоритм важен для совершенствования качества и повышения эффективности заряда новейших современных литий-железо-фосфатных аккумуляторов и может быть применен к любому типу литий-ионных батарей с соответствующим пересчетом параметров заряда-разряда.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Keller A.V. Development of Algorithms of Rapid Charging for Batteries of Hybrid and Electric Drives of City Freight and Passenger Automobile Transportation Vehicles / A.V. Keller, D.V. Korobov, E.V. Solomin, D.V. Topolskiy, I.G. Topolskaya // SIBCON: тезисы докл. XI Международной IEEE сибирской конф. по управлению и связи SIBCON. (Омск, 2015 г.). – Омск, 2015. <http://ieeetpu.ru/musor/sbornik/papers/176em.pdf>
2. <http://www.livescience.com/50643-watch-lithium-battery-explode.html>. (дата обращения 21.09.2015).
3. Grewal H. Li-ion Nattery Charger solution using the MSP430 // Application report. Texas Insyuments. – 2005. <http://www.ti.com/lit/an/slaa287/slaa287.pdf>.
4. Paryani A. Fast charging of battery using adjustable voltage control. // Patent of US 0012563 A1. 2011.

5. Cai L. Mathematical modeling of a lithium ion battery with thermal effects in COMSOL Inc. Multiphysics (MP) software / L. Cai, R.E. White // Journal of Power Sources. – 2011 – 196. – P. 5985-5989.
6. Leiva L. Memory effect now also found in lithium-ion batteries // Paul Scherrer Institute. – 2013. <http://www.psi.ch/media/memory-effect-now-also-found-in-lithium-ion-batteries>.
7. Аккумуляторы литий-ионные LT-LFP 300. Руководство по эксплуатации. LT-LFP.300.11.01.000 РЭ. – 2014.
8. Linden D. Handbook of Batteries: third ed. / D. Linden, T.B. Reddy. – New York: McGrawHill, 2002.
9. Руководство по эксплуатации аккумуляторов литий-ионных LT-LYP200AH, LT-LYP240AH, LT-LYP300AH, LT-LYP380AH, LT-LYP700AH и LT-LYP770AH. LT.64366939.3482.001-2013 РЭ. – 2013.
10. Yang F.-C. Hysteresis-Current-Controlled Buck Converter Suitable for Li-Ion Battery Charger / F.-C. Yang, C.-C. Chen, J.-J. Chen, Y.-S. Hwang, W.-T. Lee // IEEE. – 2006. – P. 2723-2726.
11. Hwang Y.-S. New Li-Ion Battery Charger Based on Charge-Pump Techniques / Y.-S. Hwang, S.-C. Wang, Fong-Cheng-Yang, J.-J. Chen, W.-T. Lee // IEEE. – 2006. – P. 2259-2262.
12. Hwang Y.-S. Built-in Resistance Compensation (BRC) Technique for Fast Charging Li-Ion Battery Charger / Y.-S. Hwang, S.-C. Wang, Fong-Cheng-Yang, J.-J. Chen, W.-T. Lee // IEEE. – 2008. – P. 2259-2262.
13. Lin C.-H. Fast Charging Technique for Li-Ion Battery Charger / C.-H. Lin, C.-L. Chen, Y.-H. Lee, S.-J. Wang, C.-Y. Hsieh, H.-W. Huang // IEEE. – 2008. – P. 618-621.
14. Chen L.-R. Detecting of Optimal Li-ion Battery Charging Frequency by Using AC Impedance Technique / L.-R. Chen, S.-L. Wu, T.-R. Chen, W.-R. Yang, C.-S. Wang, P.-C. Chen // IEEE. – 2009. – P. 3378-3381.
15. Chen J.-J. A High-Efficiency Multimode Li-Ion Battery Charger With Variable Current Source and Controlling Previous-Stage Supply Voltage / J.-J. Chen, F.-C. Yang, C.-C. Lai, Y.-S. Hwang, R.-G. Lee // IEEE. – 2009. – vol. 56, no.7.
16. Chen M. Accurate, compact, and power-efficient Li-Ion battery charger circuit, / M. Chen, G. A. Rincón-Mora // IEEE Trans. – 2006. – vol. 53, no.11. – P. 1180-1184.
17. Ke Y.-L. A novel high-efficiency battery charger with a buck zero-voltage-switching resonant converter / Y.-L. Ke, Y.-C. Chuang // IEEE Trans. – 2007. – vol. 22, no.4. – P. 848-854.
18. Hwang Y.S. New compact CMOS Li-Ion battery charger using charge-pump technique for portable applications / Y.S. Hwang, C.C. Wang, F.C. Yang, J.J. Chen // IEEE Trans. – 2007. – vol. 54, no.4. – P. 705-712.
19. Rahim N.A. DSP-Based Fuzzy Logic Controller for a Battery Charger / N.A. Rahim, E.L. Chan, S. Mekhilef // TENCON 02 Proceedings IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering. (28-31 October 2002). – 2002. P. 1512-1515.
20. Chen L.R. A design of optimal pulse charge system by variable frequency technique // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2007. – vol. 54, no.1. – P. 398-405.
21. Chen L.R. A Resistance-compensated phase-locked battery charger / L.R. Chen, J.Y. Han, J.L. Jaw, C.P. Chou, C.S. Liu // Proc. IEEE. – 2006. – P. 1087-1092.
22. Tsai C.C. A multi-mode LDO-based Li-ion battery charger in 0.35  $\mu$ m CMOS technology / C.C. Tsai, C.Y. Lin, Y.S. Hwang, W.T. Lee, T.Y. Lee // Proc. IEEE Asia-Pacific Conf. Circuits and Systems. – 2004. – P. 49-52.
23. Mekhilef S. Novel Vector Control Method for Three-Stage Hybrid Cascaded Multilevel Inverter / S. Mekhilef, M.N. Abdul Kadir // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – vol. 58, is.4. – P. 1339-1349.
24. Safari. A. Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter / A. Safari, S. Mekhilef // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – vol. 58, is.4. – P. 1154-1161.
25. Ustun T.S. Design and Implementation of Static Synchronous Series Compensator with a soft-switching H-bridge Inverter with DSP-Based Synchronization Control / T.S. Ustun, S. Mekhilef // International Review of Electrical Engineering (IREEE). – 2010 – vol. 5, no.4. – P. 1347-1353.
26. Mohamad N. Dual Vector Control Strategy for a Three-Stage Hybrid Cascaded Multilevel Inverter / N. Mohamad, A. Kadir, S. Mekhilef // Journal of Power Electronics. – 2010. – vol. 10, no.2. – P. 155-164.

## Algorithms of Automatic Charge of LiFePO<sub>4</sub> Batteries

Solomin E.V., Topolsky D.V., Toposkaya I.G.  
South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[evsolomin@inbox.ru](mailto:evsolomin@inbox.ru)

**Abstract.** Wide variety of rapidly evolving algorithms of lithium-ion battery charge leads to the lack of statistics of differential coefficient of the specific battery degradation, or in the other words misunderstanding of the difference of state of charge after one or several charge-discharge cycles. As a solution of the problem the authors proposed the usage of universal integrated algorithm of charging LiFePO<sub>4</sub> batteries with initial and final trickle charge, which will both train the battery and reduce the differen-

tial coefficient of degradation, as well as allow testing of local grid power which is the battery charging from. This approach widely distributed, may give the rich statistic information further to be used for improvement of charge algorithms.

**Keywords:** lithium-ion battery, accumulating battery, charge-discharge, differential coefficient of battery degradation, LiFePO<sub>4</sub>, state of charge.



# Алгоритмы управления асинхронным генератором ветроэнергетической установки

Смолин В.И., Топольская И.Г.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

г. Челябинск, Российская Федерация

[topolskaiaig@susu.ac.ru](mailto:topolskaiaig@susu.ac.ru)

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы массового использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) с диаметром ветроколеса 7...15 м и мощностью бесперебойного электроснабжения 5...15 кВт в условиях континентальных регионов с преобладающей скоростью ветра 3...10 м/с и среднегодовой – 4...6 м/с. Предложена методика формирования желаемой мощностной характеристики ВЭУ с учетом дифференциального графика распределения ветровых потоков и структуры потребления электрической энергии. Выполнено исследование алгоритмов управления частотно-регулируемым асинхронным генератором ВЭУ с целью обеспечения торможения ветроколеса в режимах частичной загрузки, стабилизации номинальной мощности и полного останова. Решение проиллюстрировано анализом совмещенных механических характеристик ветряного двигателя и генератора. Рассмотрена система управления ВЭУ с амплитудно-частотным управлением генератором и автоматическим распределением вырабатываемой мощности между потребителями автономной сети и статическим накопителем энергии. Предложены методы оптимизации режимов генератора на основе разработки теории обобщенного энергопотока трехфазных электромеханических преобразователей.

**Ключевые слова:** ветроэнергетический установка, автономная энергосеть, бесперебойное энергоснабжение, асинхронный генератор, алгоритмы амплитудно-частотного управления, управление балансом электрической энергии.

## ВВЕДЕНИЕ

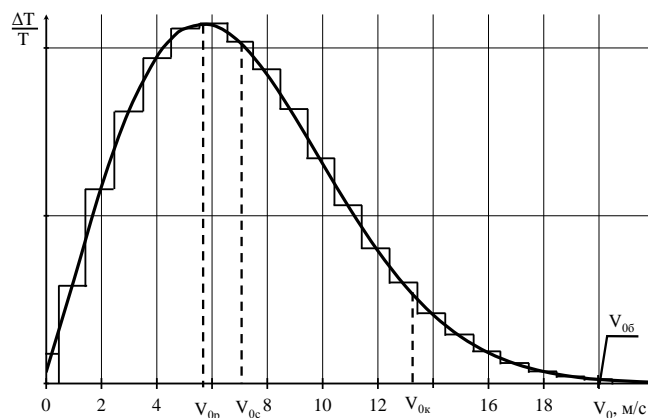
Современные ветроэнергетические установки (ВЭУ) средней и большой мощности проектируют на высокую номинальную скорость ветра  $V_{0н} = 11...13$  м/сек, характерную для прибрежных регионов [1-6]. Между тем, в континентальной части большинства регионов России преобладающим является ветер со скоростью 3...10 м/с, а среднегодовая скорость ветра не превышает 4...6 м/сек [7, 8]. Учитывая кубическую зависимость энергии ветра от скорости, такие ВЭУ не могут эффективно работать повсеместно. Массовое применение в России могут получить автономные ВЭУ с диаметром ветроколеса 7...15 м, позволяющие развивать в зоне пониженных скоростей ветра номинальную мощность  $P_n = 5...15$  кВт [7] и совместно со статическими накопителями энергии (GB) обеспечивать бесперебойное энергоснабжение потребителей [9, 10]. Фактически, может быть осуществлен возврат к широкому применению энергетических установок с габаритными размерами ветряных мельниц, реализованных на принципиально новой основе для нужд малой энергетики.

Автономные ВЭУ имеют, как правило, ограниченные возможности принимать и сглаживать импульсный поток

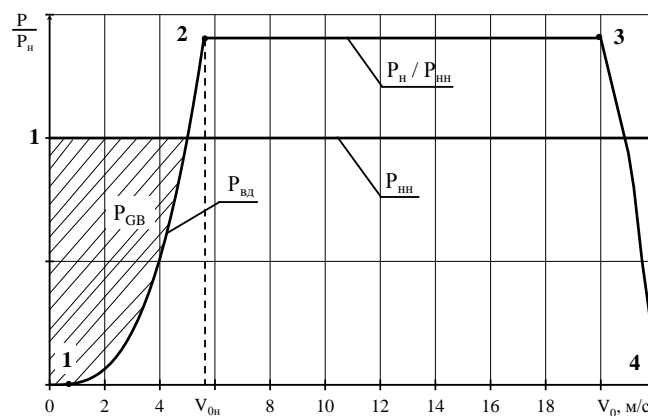
энергии. Чтобы поддерживать мощность сети на номинальном уровне, необходимо, чтобы параметры и система управления ВЭУ удовлетворяли требованиям обеспечения положительного баланса энергии в соответствии с дифференциальной характеристикой ветровых потоков местности и структурой энергопотребления. Рассмотрим поставленную проблематику в более подробном изложении.

## ЖЕЛАЕМАЯ МОЩНОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЭУ

На рис. 1, а приведена дифференциальная характеристика ветропотока, типичная для отмеченных ранее континентальных регионов.



а



б

Рис. 1. Характеристики ВЭУ:

а – дифференциальная ветропотока; б – желаемые мощностные:  $P_{нн}$  – автономной сети,  $P_{вд}$  – ветродвигателя,  $P_{GB}$  – аккумуляторных батарей;  $V_{0п}$ ,  $V_{0с}$ ,  $V_{0к}$ ,  $V_{0б}$  – рабочая, средняя, среднекубическая и буревая скорости



Она определяется экспериментально в месте предполагаемого размещения ВЭУ с помощью датчика скорости ветра, оснащенного электронными часами. Часы измеряют и накапливают временные интервалы  $\Delta T_i / T$ , в течении которых скорость ветра находится в соответствующем диапазоне  $V_{oi} + \Delta V_i$  за весь период наблюдения  $T$  [11]. Дифференциальная характеристика позволяет объективно оценить сезонное и годовое распределение ветровых потоков и экспериментально определить рабочую, среднюю или среднекубическую скорости ветра [12].

Предположим, что график потребления электрической энергии предприятием за период наблюдения  $T$  содержит постоянную составляющую  $P_{\text{нн}}$ . Эту часть электроэнергии можно выбрать в качестве номинала для автономной сети ВЭУ. Недостающую электроэнергию предприятие должно получать из централизованной сети. Предполагается, что энергия от ВЭУ будет более дешевой, а срок окупаемости установки – приемлемым.

Мощностная характеристика ВЭУ (рис. 1, б) должна соответствовать статистическому распределению ветровых потоков местности. Номинальную скорость ВД  $V_{0н}$  можно выбрать в диапазоне  $V_{0р} \dots V_{0с}$ . Уменьшение номинальной скорости относительно рабочей может привести к существенному увеличению диаметра ветроколеса и экономически неоправданному увеличению капитальных и эксплуатационных расходов по сравнению с выигрышем в стоимости аккумуляторных батарей. В режиме стабилизации мощности на уровне  $P_n/P_{\text{нн}}$  и своевременного отключения (останова ветроколеса) решают задачи обеспечения ресурса и защиты ВД. Выбор предельной (буревой) скорости  $V_{0б}$  должен быть обоснован дифференциальной характеристикой ветровых потоков. Мощность  $P_{\text{ГВ}}$  в зоне шторма обеспечивается разрядом ГВ. Заряд должен вернуться при скоростях ветра, больших  $V_{0н}$ . Энергетический баланс автономной сети в режимах частичной загрузки (1-2) обеспечивается совместной работой ВЭУ и ГВ:  $W_{\text{нн}} = W_{\text{ГВ}} + W_{\text{вэу}}$ . В режимах стабилизации номинальной мощности (2-3) ВЭУ работает как единственный источник энергии:  $W_{\text{вэу}} = W_{\text{нн}} + W_{\text{ГВ}}$ . В режимах (3-4) кратковременных буревых скоростей энергоснабжение автономной сети осуществляется разрядом ГВ:  $W_{\text{нн}} = W_{\text{ГВ}}$ . Аккумуляторные батареи не должны прогрессивно разряжаться в процессе эксплуатации ВЭУ. Недобор заряда может быть суточным, недельным, месячным, в зависимости от типа ГВ при условии, что заряженность батареи будет восстановлена. Система подзарядки ГВ должна обеспечивать автоматическое пополнение энергии в штатных ситуациях от централизованной сети.

#### МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Двигатели ВЭУ описываются, чаще всего, аэродинамическими характеристиками в виде зависимостей относительного крутящего момента  $\bar{M}$  и коэффициента мощности  $C_p$  от быстроходности  $Z$  ветроколеса [13, 14]. Электромеханические преобразователи энергии представлены, как правило, механическими характеристиками в виде зависимостей крутящего или тормозного момента от угловой скорости [15]. С целью совместного анализа работы ветродвигателя (ВД) и генератора необходимо привести характеристики устройств к единой базе, например, пересчетом аэродинамических характеристик ВД к механиче-

ским характеристикам электрогенератора. Пример такого пересчета по данным аэродинамических характеристик четырехлопастного ВД [13] приведен на рис. 2.

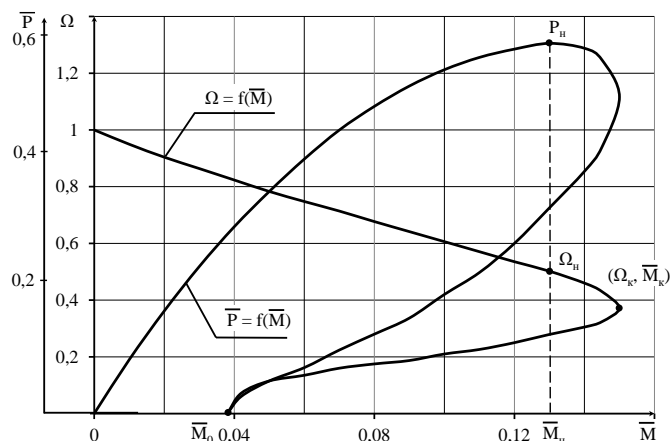


Рис. 2. Зависимость относительной угловой скорости  $\Omega = \omega_0/\omega$  и мощности  $\bar{P} = \Omega \cdot \bar{M}$  от момента  $\bar{M}$  четырехлопастного ВД при  $V_{0н} = \text{const}$ :  $\omega_0$ ,  $\omega$  – угловые скорости в режиме холостого хода и нагруженного ветроколеса

Относительная угловая скорость ненагруженного ветроколеса при  $V_{0н} = \text{const}$  принята равной единице. Под нагрузкой скорость ветроколеса падает и в критическом режиме  $(\Omega_k, \bar{M}_k)$  происходит качественное изменение действия аэродинамических сил. Дальнейшее торможение ветроколеса сопровождается уменьшением тормозного момента и ветроколесо останавливается ( $\bar{M}_0$  – начальный момент или момент трогания). Мощностная характеристика ВД имеет ярко выраженный максимум, по которому чаще всего определяют номинальную мощность  $P_n$ . Относительная угловая скорость ветроколеса в режиме номинальной загрузки  $\Omega_n = 0,5 \dots 0,6$  близка к теоретической, равной  $2/3$ .

Возвратимся к характеристикам ВЭУ (см. рис. 1). Задачу повышения эффективности работы ВЭУ в зоне (1-2) низкого потенциала ветра решают путем улучшения аэродинамических характеристик ВД и режимной оптимизации отбора мощности генератором. Наличие на мощностной характеристике ВД экстремума создает необходимые предпосылки для управления генератором по критерию максимального отбора мощности. На рис. 3 приведены характеристики ВД в низкоскоростном диапазоне ветровых потоков.

Их перерасчет с номинальной характеристики ( $V_{0н}$ ) на другие ( $V_{0i}$ ) выполнен в предположении постоянства коэффициента мощности  $C_p$  и уменьшения мощности набегающего потока в кубической зависимости от ветра:  $P_{0i} \approx V_{0i}^3$ . Экстремумы мощностных характеристик позволяют получить функцию оптимального управления  $\bar{P}_{\text{max}} = f(\bar{M})$ . Информационная база системы управления генератором достаточна для определения электромагнитного момента алгоритмическим методом [16, 17], основанном на контроле энергетических преобразований в электрической машине. Таким способом можно избежать применения дорогостоящих датчиков тормозного момен-

та. Задача упрощается в случае представления закона управления в функции относительной угловой скорости ВД:  $\bar{P}_{max} = f(\Omega)$ . Определение аргумента может осуществляться с помощью двух датчиков: скорости ветра  $V_0$  ( $V_0 \sim \omega_0$ ) и угловой скорости ветроколеса  $\omega$ . Основная проблема обусловлена в этом случае динамикой процесса управления. Мгновенная скорость ветра имеет импульсный характер по сравнению с инерционностью ветроколеса. Информационный канал относительной скорости  $\Omega$  необходимо оптимально фильтровать.,

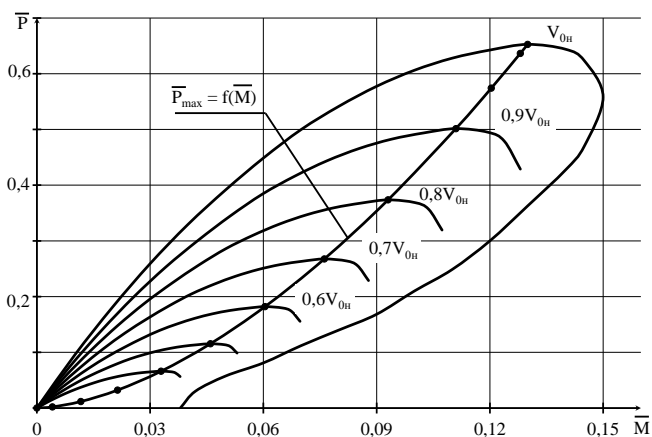


Рис. 3. Зависимость относительной мощности ВД от момента  $\bar{M}$  при малых скоростях ветра

При скорости ветра, выше номинальной, необходимо ограничивать мощность ВД. В методе Stall (Stahl) — регулирования эту задачу решают путем профилирования неповоротных лопастей ВД [18]. Примерный вид механических характеристик ВД с аэродинамической стабилизацией номинальной мощности приведен на рис. 4.

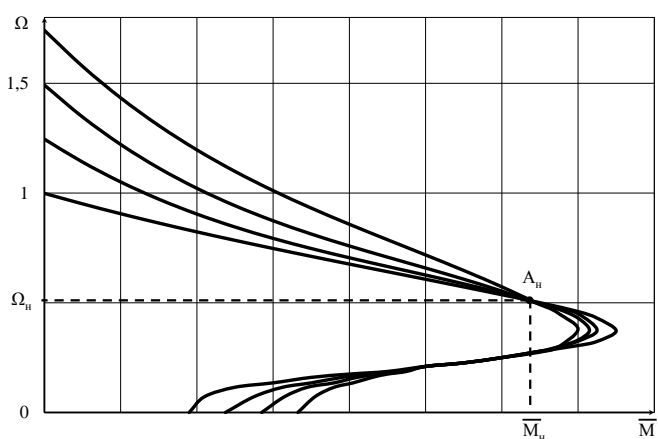


Рис. 4. Механические характеристики ВД с аэродинамической стабилизацией номинальной мощности Stall-методом

С увеличением скорости ветра  $V_{0i} > V_{0n}$  механические характеристики ВД становятся более мягкими. Причем, координаты точки  $A_n$  ( $\Omega_n, \bar{M}_n$ ) остаются приблизительно постоянными в широком диапазоне ветровых потоков. Дополнительная стабилизация режимной точки с помо-

щью системы управления генератором позволяет существенно снизить требования к точности изготовления лопастей ВД.

Чтобы остановить ВД, необходимо приложить к ветроколесу тормозной момент  $\bar{M}_{0i}$  (см. рис. 4), не превышающий по величине номинальный. Задачу останова ВД можно выполнить путем перевода электрической машины в двигательный реверсивный режим. Торможение генератором позволяет существенно снизить требования к конструкции ревервного электромагнитного тормоза.

#### СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ И ГЕНЕРАТОРА

Рассмотрим возможность реализации тормозных режимов ВД с помощью асинхронного генератора (АГ) с амплитудно-частотным управлением. Совместим механические характеристики ВД с аналогичными характеристиками асинхронной машины соответствующей мощности, работающей в генераторном тормозном режиме. Совмещение выполним путем переноса характеристик ВД из первой четверти координатной сетки во вторую, отражающую работу электрических машин в генераторном режиме (рис. 5). Выполняемый анализ носит качественный характер без привязки к конкретным параметрам ВД и АГ.

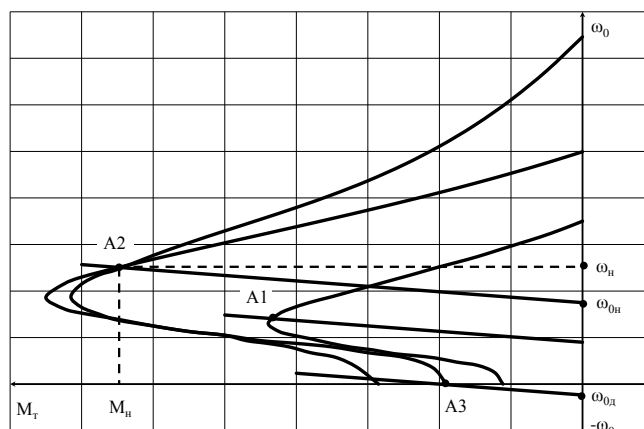


Рис. 5. Совмещенные характеристики ВЭУ:

A1 – режим частичной загрузки; A2 – режим стабилизации номинальной мощности; A3 – режим останова

В режимах частичной загрузки (A1) и стабилизации номинальной мощности (A2) предполагается программное управление АГ в соответствии с полученным экспериментально или путем моделирования законом оптимального отбора мощности [19]. Система управления АГ должна располагать соответствующими техническими средствами.

Чтобы перевести ветроколесо в режим останова, необходимо увеличить кратковременно тормозной момент до критического  $\bar{M}_k$  и далее плавно уменьшать момент в соответствии с падением угловой скорости ВД [16]. Реализация полного останова с помощью электрической машины в генераторном режиме невозможна. Необходим внешний источник тормозного момента, создаваемый переводом АГ в двигательный режим (A3) [20]. Система управления АГ должна содержать реверсивный преобразователь частоты с амплитудно-частотным регулированием в зоне малых скоростей.

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЭУ

Желаемая мощностная характеристика ВЭУ может быть реализована системой управления (рис. 6), содержащей отмеченные ранее базовые элементы.

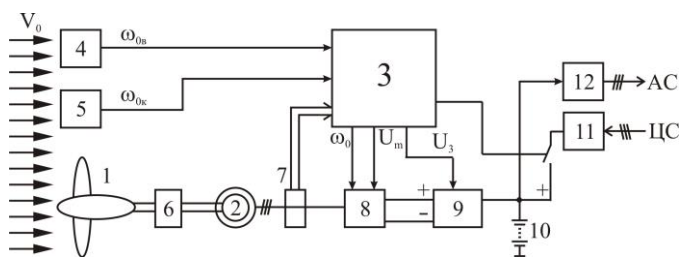


Рис. 6. Функциональная схема системы управления ВЭУ: 1 – ветродвигатель; 2 – асинхронный генератор; 3 – контроллер; 4 – датчик скорости ветра; 5 – датчик скорости ветроколеса; 6 – редуктор; 7 – измерительные преобразователи фазных токов и напряжений; 8 – реверсивный преобразователь частоты; 9 – конвертор; 10 – блок аккумуляторных батарей; 11 – внешнее зарядное устройство (компенсатор заряда GB); 12 – автономный инвертор напряжения; АС – автономная сеть; ЦС – централизованная сеть

В памяти контроллера хранятся основные параметры мощностной характеристики и функция управления  $\bar{P}_{max} = f(\bar{M})$  или  $\bar{P}_{max} = f(\Omega)$ , полученная в результате испытаний или моделирования ВД. Используя информацию о текущей скорости  $V_0$  ветра и угловой скорости  $\omega$  ветроколеса, контроллер управляет мощностью АГ, приводя ее в соответствие с табличной  $P_{max}$ . Реверсивный преобразователь частоты, реализованный на базе автономного инвертора напряжения, должен выполнять в процессе управления двуединую задачу формирования синхронной частоты и амплитуды трехфазного напряжения АГ [21].

К числу основных задач, выполняемых контроллером, относится функция поддержания положительного баланса энергии автономной сети ВЭУ. Конвертор, функционально связанный с контроллером, должен обеспечивать автоматическое распределение мощности АГ между потребителями автономной сети и блоком аккумуляторных батарей по аналогии с автомобильными системами электропитания. Недостаток мощности генератора в малоскоростных режимах компенсируется статическим накопителем энергии. Восстановление баланса энергии автономной сети ВЭУ осуществляется с помощью внешнего зарядного устройства, управляемого контроллером.

Управление трехфазной электрической машиной в генераторном режиме может осуществляться известными методами [22-24] теории электропривода переменного тока. Новые возможности в реализации требуемых тормозных режимов АГ позволяют получить алгоритмы управления, основанные на теории обобщенного энергопотока трехфазных электромеханических преобразователей, в частности, амплитудного управления моментом и энергоэффективного управления АГ по критерию постоянства перегрузочной способности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены вопросы массового использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) с диаметром ветроколеса 7...15 м и мощностью бесперебойного электроснабжения 5...15 кВт в условиях континентальных регионов с преобладающей скоростью ветра 3...10 м/с и среднегодовой — 4...6 м/с. Предложена методика формирования желаемой мощностной характеристики ВЭУ с учетом дифференциального графика распределения ветровых потоков и структуры потребления электрической энергии. Выполнено исследование алгоритмов управления частотно-регулируемым асинхронным генератором ВЭУ с целью обеспечения торможения ветроколеса в режимах частичной загрузки, стабилизации номинальной мощности и полного останова. Решение проиллюстрировано анализом совмещенных механических характеристик ветряного двигателя и генератора. Показано, что в ветродвигателях с Stall-методом аэродинамической стабилизации номинальной мощности обеспечивается возможность реализации тормозных режимов с помощью генератора без увеличения его габаритов. Рассмотрена система управления ВЭУ с амплитудно-частотным управлением генератором и автоматическим распределением вырабатываемой мощности между потребителями автономной сети и статическим накопителем энергии. Предложены методы оптимизации режимов генератора на основе разработки теории обобщенного энергопотока трехфазных электромеханических преобразователей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Global Wind Energy Council. Global Wind Statistics 2012. – URL: [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2013/02/GWEC-PRstats-2012\\_english.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2013/02/GWEC-PRstats-2012_english.pdf) (дата обращения 13.09.2015).
2. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
3. Петренко Ю.Н. Разработка алгоритма управления, обеспечивающего максимально высокую выходную мощность ветроэнергетической установки с накопителем энергии / Ю.Н. Петренко, С.А. Санкевич // Электроника, автоматика и измерительная техника: межвуз. сб. науч. тр. с международным участием. – Уфа: Уфимский гос. авиационный тех. ун-т., 2011. – С. 47-52.
4. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: ХАИ, 2003. – 400 с.
5. Thongam I J.S., Ouhrouche M. MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems. – URL: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/16255.pdf> (дата обращения 13.09.2015).
6. Санкевич С.А. Применение контроллера нечеткой логики для управления ветроэлектрической установкой / С.А. Санкевич, Ю.Н. Петренко // Информационные технологии и системы 2012: материалы междунар. науч. конф. – Минск, 2012. – С. 66-67.
7. Муравлева Е.А. Эффективность электроснабжения фермерского дома на основе ветроэлектрической установки малой мощности / Е.А. Муравлева, С.П. Рудобашта // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2013. – № 1. – С. 24-27.
8. Елистратов В.В. Мониторинг развития возобновляемой энергетики в мире и России // Академия энергетики. – 2008. – № 2. – С. 22-44.

9. Соломин Е.В. Итерационный подход в разработке и оптимизации вертикально-осевых ветроэнергетических установок / Е.В. Соломин, И.М. Кирпичникова, А.С. Мартыанов // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. научн. тр. VII междунар. научн. конф. молодых ученых. – Новосибирск, 2015. – С. 92-95.

10. Соломин Е.В. Анализ эффективности систем накопления энергии / С.В. Козлов, А.Н. Киндряшов, Е.В. Соломин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2015. – № 06(170). – С.10-23. DOI: 10.15518 / isjaee.2015.05.002.

11. Беляков В.Е. Система автоматизированного моделирования ветроэнергетических установок // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2014. – С. 391-395.

12. Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 432 с.

13. Безруких П.П. Ветроэнергетика. – М.: ИД «ЭНЕРГИЯ», 2010. – 320 с.

14. Харитонов В.П. Основы ветроэнергетики. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 340 с.

15. Соломин Е.В. Электрические машины ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения / А.Н. Киндряшов, А.С. Мартыанов, Е.В. Соломин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2013 – №01/2(118). – С. 59-62.

16. Smolin V.I. Measurement of a torque of the electrical machines according to their electrical parameters / V.I. Smolin, D.V. Topolsky, N.N. Gudaev // Proc. EPE Conference'97. – Brussels, 1997. – Vol. 3.

17. Топольская И.Г. Бесконтактный метод контроля ударных нагрузок в ветроэнергетических установках / И.Г. Топольская, Д.В. Топольский, В.И. Смолин // Меж-

дународный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2009. – № 10(78). – С. 69-73.

18. Munteanu I. Optimal Control of Wind Energy Systems / I. Munteanu, A.I. Bratcu, N.-A. Cutululis, E. Ceanga // Advances in Industrial Control series. – London: Springer-Verlag, 2008. – P. 286.

19. Кирпичникова И.М. Моделирование генератора ветроэнергетической установки / И.М. Кирпичникова, А.С. Мартыанов, Е.В. Соломин // Электротехника. – 2013. – №10. – С. 46-50.

20. Волович Г.И. О развитии средств автоматизации в энергетике с использованием возобновляемых источников энергии / Г.И. Волович, Е.В. Соломин и др. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2013. – № 09(131). – С. 59–64.

21. Смолин В.И. Теория обобщенного энергопотока трехфазных электромеханических преобразователей в задачах управления электроприводом // В.И. Смолин, И.Г. Топольская // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 111-115.

22. Blasche F. The principle of field-orientation as applied to the new transvektor closed-loop control system for rotating-field machines // Siemens Review. – 1972. – Vol. 34. – P. 217-220.

23. Depenbrock M. Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1980. – Vol. 3. – P. 420-429.

24. Betz R.E. Instantaneous Power Control of Induction Machines / R.E. Betz, B.J. Cook // Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia. – 2001. – № 1. – P. 57-63.

## **Algorithms of Control of Asynchronous Generator of Wind Turbine**

Smolin V.I., Topolskaya I.G.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian federation

[topolskaiaig@susu.ac.ru](mailto:topolskaiaig@susu.ac.ru)

**Abstract.** We discuss the aspects of mass usage of 7-15 meters diameter wind turbines (WT) on 5-15 kW uninterrupted power supply in continental region conditions on 3-10 m/s dominant wind speeds and 4-6 m/s average annual wind speed. We proposed a method of generating of desired power characteristics of WT, taking into account the differential chart of wind flow distribution and electric energy consumption structure. We studied the control algorithms of frequency-controlled asynchronous generator wind turbine to provide the braking of rotor in the modes of partial loading, stabilizing the nominal power and full stop. The approach is illustrated by the analysis of combined mechanical characteristics of wind turbine and generator together.

We discussed control system of wind turbine with gain-frequency control of the generator and automatic distribution of generated power between the consumers of self-contained power grid and the static energy storage. We proposed methods of optimizing the generator operating modes on the base of theory of generalized energy flow of three phase electromechanical converters.

**Keywords:** wind turbine, self-contained power grid, uninterrupted power supply, asynchronous generator, algorithms gain-frequency control, electric energy balance control.



# Исследование систем регулирования межклетьевых натяжений при стабилизации моментов прокатных двигателей

Шохин В.В., Пермякова О.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
г. Магнитогорск, Российская Федерация  
[shww@mgn.ru](mailto:shww@mgn.ru)

**Аннотация.** Для регулирования межклетьевых натяжений на непрерывных прокатных станах используют автоматизированный электропривод клетей со стабилизацией момента прокатного двигателя. В этом случае точность регулирования натяжения зависит от изменения технологических условий прокатки, так как заданный момент двигателя неизменен, а условия работы стана изменяются в процессе прокатки полосы. В работе исследуется изменение величины натяжения в зависимости от изменений условий прокатки и влияние этих изменений на точность размеров готового проката. Проводится сравнение работы стана при отсутствии систем регулирования натяжения и при использовании различных систем стабилизации момента прокатного двигателя. Дается оценка статических и динамических свойств прокатного стана при регулировании натяжения в условиях изменения скорости прокатки. Результаты могут быть использованы при выборе и расчете систем косвенного регулирования натяжения

**Ключевые слова:** непрерывный прокатный стан, автоматизированный электропривод, регулирование натяжения, изменение технологических условий, отклонение размеров проката, статические и динамические свойства систем регулирования

## ВВЕДЕНИЕ

На современных сортовых и проволочных прокатных станах прокатку ведут с контролем межклетьевого натяжения [1, 2]. В силу ряда причин невозможно использовать системы прямого регулирования натяжения, поэтому о величине натяжения судят по величине момента прокатного двигателя [3]. Момент двигателя прокатной клетки определяется моментом свободной прокатки, который в первом приближении можно принять неизменным во время прокатки, и моментами от действия переднего и заднего натяжения. Если заднее натяжение для первой клетки отсутствует, то, определив момент свободной прокатки по клетям одним из возможных способов, можно определить составляющие момента от действия натяжений для каждой клетки прокатного стана. Исходя из этого, строят системы контроля межклетьевых натяжений, стабилизируя момент прокатного двигателя.

## АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Для стабилизации момента двигателя возможно применение системы электропривода со свойствами источника момента прокатного двигателя. Другим вариантом может быть применение системы стабилизации момента за счет воздействия на скорости предыдущей, последующей

или регулируемой клетки. Недостатком таких систем является зависимость момента свободной прокатки от изменения технологических условий прокатки. Это в конечном итоге сказывается на точности регулирования натяжения. Однако, в некоторых случаях возникающие отклонения натяжения при прокатке с такими системами могут способствовать выравниванию размеров проката. В связи с необходимостью повышения точности размеров проката и обеспечения устойчивости непрерывной прокатки задача исследования различных систем регулирования натяжения и их сравнение является актуальной.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работах [4-7] показано, что при регулировании величины момента прокатного двигателя путем воздействия на скорость вращения валков последующей клетки такая система кроме регулирования натяжения может выравнивать размеры проката при изменении технологических условий прокатки. Это связано с упругой деформацией клетки при изменении условий прокатки. Дело в том, что при увеличении исходных размеров проката, предела текучести и коэффициента трения в очаге деформации, которое должно вызвать увеличение момента двигателя и увеличение размера проката в направлении обжатия за счет упругой деформации клетки, переднее натяжение для клетки в этом случае также будет увеличиваться, и оно будет влиять на уменьшение размеров, т.к. при увеличении натяжения давление металла на валки снизится и уменьшится упругая деформация клетки. В результате изменение размеров проката происходит в меньшей степени, т.е. происходит выравнивание размеров проката [8].

Задачей исследования является выяснение влияния изменений технологических условий прокатки на распределение межклетьевых натяжений и нагрузок прокатных двигателей для непрерывного прокатного стана для трех случаев: с использованием только системы регулирования скорости, для системы электропривода прокатного стана со свойствами источника момента, а также для системы стабилизации момента за счет воздействия на скорость последующей клетки межклетьевого промежутка.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для исследования принят прокатный проволочный стан с четырехвалковыми калибрами, в электроприводе валков которого используется частотно-регулируемый электропривод с асинхронным двигателем с векторным регулированием скорости [9-12].

Моделирование прокатного стана ведется с применением среды MATLAB и приложения SIMULINK [13, 14]. Составлены структурные схемы асинхронного двигателя с преобразователем частоты и системой векторного управления, а также представлена структурная схема полосы в межклетьевом промежутке.

Уравнения, описывающие работу асинхронного двигателя во вращающейся системе координат, представлены в [9]. В соответствии с указанными уравнениями представлена структурная схема асинхронного электродвигателя при ориентации вращающейся системы координат  $\alpha$ - $\beta$  по

вектору потокосцепления ротора (рис. 1). Входными сигналами в этой модели являются проекции пространственного вектора напряжения  $U_{1\alpha}$  и  $U_{1\beta}$ , величина статического момента электропривода  $M_c$ . Выходными переменными являются частота вращения ротора асинхронного двигателя  $\omega$  и величина потокосцепления ротора  $\psi_2$ . Модель составлена с учетом насыщения магнитной системы двигателя [15, 16]. Система автоматического регулирования скорости и момента двигателя строится по принципу подчиненного регулирования координат (рис. 2).

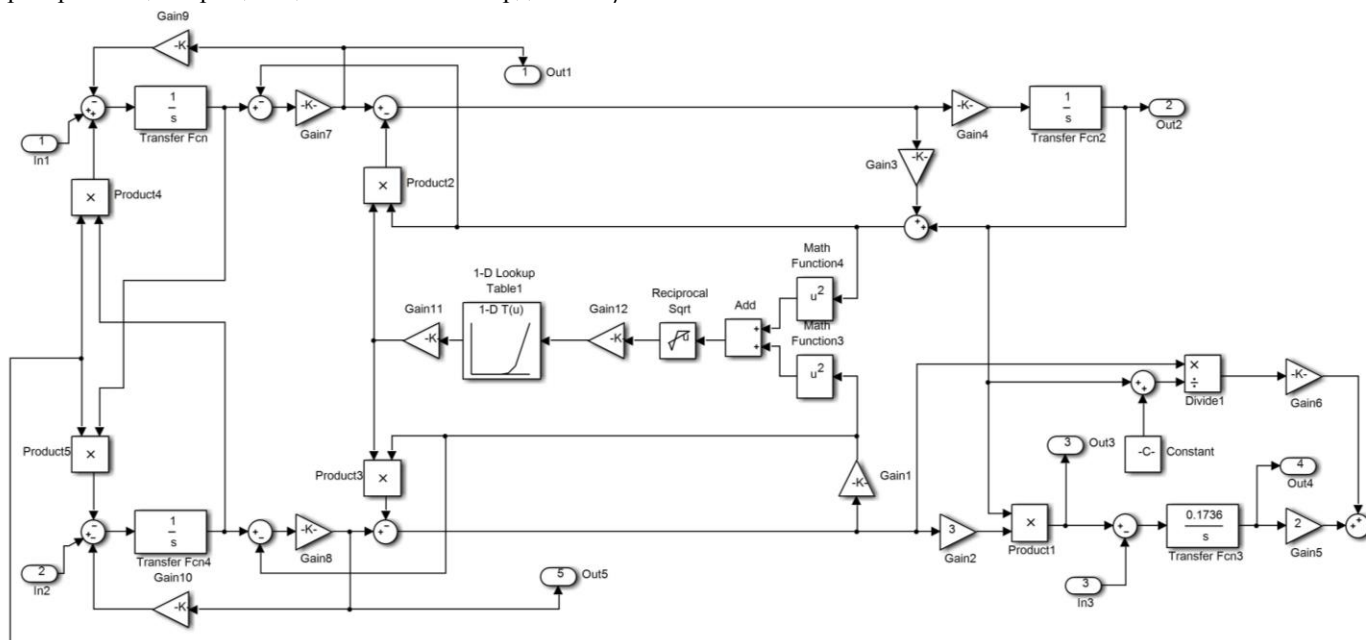


Рис. 1. Структурная схема модели асинхронного двигателя

Регулирование потокосцепления двухконтурное, регулирование скорости – трехконтурное с контурами регулирования составляющей тока по оси  $\beta$ , момента двигателя и скорости [8, 9]. Входными сигналами этой модели являются сигналы задания частоты вращения двигателя, потокосцепления ротора, сигналы обратных связей по составляющим тока  $i_{1\beta}$  и  $i_{1\alpha}$ , потокосцеплению ротора, моменту и скорости двигателя. Выходными сигналами являются проекции пространственного вектора напряжения  $U_{1\alpha}$  и  $U_{1\beta}$ .

Для моделирования полосы в межклетьевом промежутке используется известное выражение для натяжения в интегральной форме, предложенное впервые Д.П. Морозовым [17, 18]. При вычислении скоростей учитываются величины опережения и отставания скорости металла от скорости валков в очагах деформации. Модель полосы представлена на рис. 3. Входными переменными этой модели являются частота вращения валков смежных клетей, а выходная переменная – величина натяжения в межклетьевом промежутке.

$$T_{i,i+1} = \frac{EQ_i}{l_{i,i+1}} \int_0^t (v_{i+1} - v_i) dt + T_{(i,i+1)0}$$

где  $E$  – модуль упругости прокатываемого материала;  $Q_i$  – поперечное сечение полосы между клетями  $i$  и  $i+1$ ;  $l_{i,i+1}$  –

длина межклетьевого промежутка;  $v_i, v_{i+1}$  – скорости выхода металла из валков клетки с порядковым номером  $i$  и входа металла в клеть с порядковым номером  $i+1$ .

При моделировании каждая модель представляется в виде подсистемы с входными и выходными параметрами. Это дает возможность относительно легко моделировать многоклетьевой прокатный стан с взаимосвязанными электроприводами клетей через прокатываемую полосу.

Создана модель непрерывного трехклетьевого прокатного стана, показанная на рис. 4.

С изменениями технологических условий прокатки связано изменение моментов двигателей клетей. Так, на моменты при прокатке оказывают влияние размеры исходного проката, коэффициент трения в очаге деформации, предел текучести прокатываемой полосы. В процессе исследований проводилась имитация таких изменений заданием отклонения момента прокатки на 10 % в одной из клетей и определялось изменение величин межклетьевых натяжений и моментов двигателей каждой клетки. Результаты исследования приведены в табл. 1 и 2.

Установлено, что при небольших скоростях при одном и том же отклонении момента прокатки, т.е. при одних и тех же изменениях условий прокатки, существенно возрастают изменения межклетьевых натяжений и моментов двигателей.

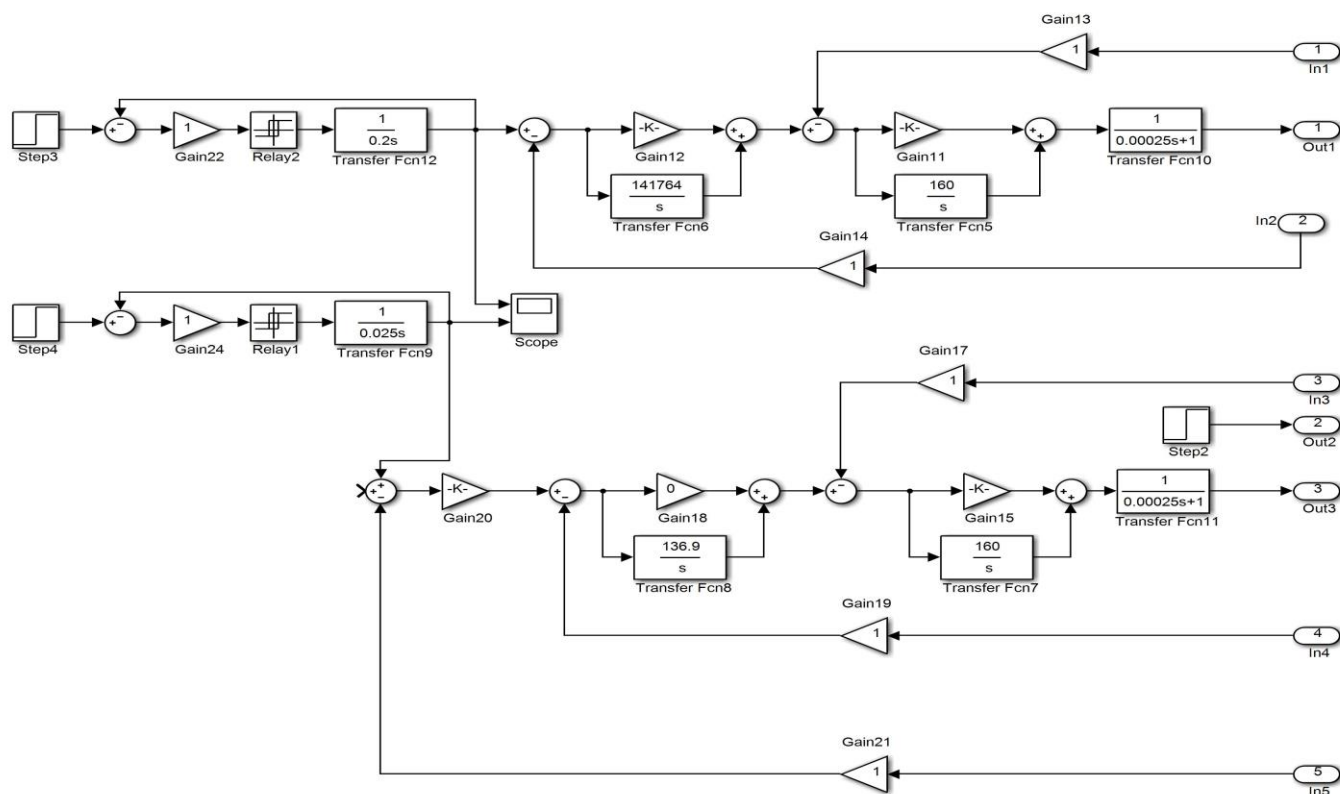


Рис. 2. Структурная схема модели системы регулирования скорости

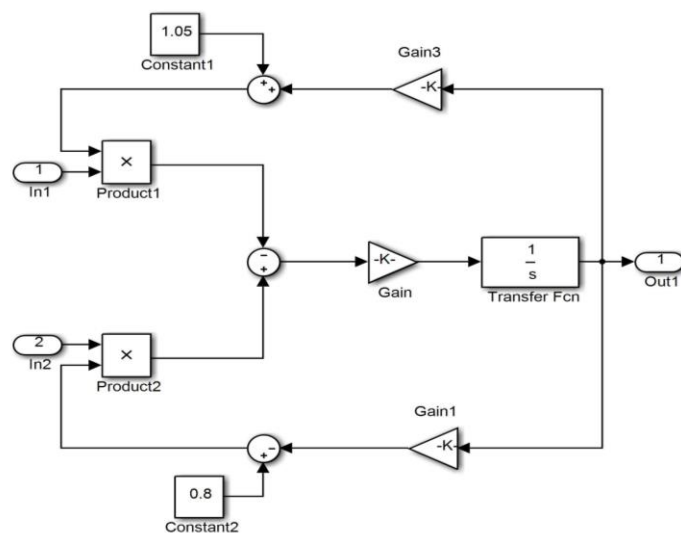


Рис. 3. Структурная схема модели полосы в межклетьевом промежутке

Так, например, при изменении условий прокатки в первой клетки при большой скорости отклонение натяжения в первом межклетьевом промежутке составило 117,7 Н, а при малой скорости – 472 Н, при этом во втором промежутке изменения натяжения составили соответственно 10,7 Н и 181 Н. Наибольшие изменения моментов двигателей происходят в этом случае для двигателей тех клеток, где меняются условия прокатки, при этом моменты двигателей остальных клеток также меняются из-за изменений межклетьевых натяжений.

Установлено, что для электропривода со свойствами источника момента [19] все изменения условий прокатки во второй и в третьей клетки изменяют момент двигателя первой клетки. Таким образом, изменения условий прокатки в клетях прокатного стана для такой системы распространяются против хода прокатки и могут существенно нагружать двигатели первых клеток прокатного стана. Установлено также, что величина скорости прокатки в случае применения рассматриваемой системы не влияет на величину изменений межклетьевых натяжений и моментов прокатных двигателей.

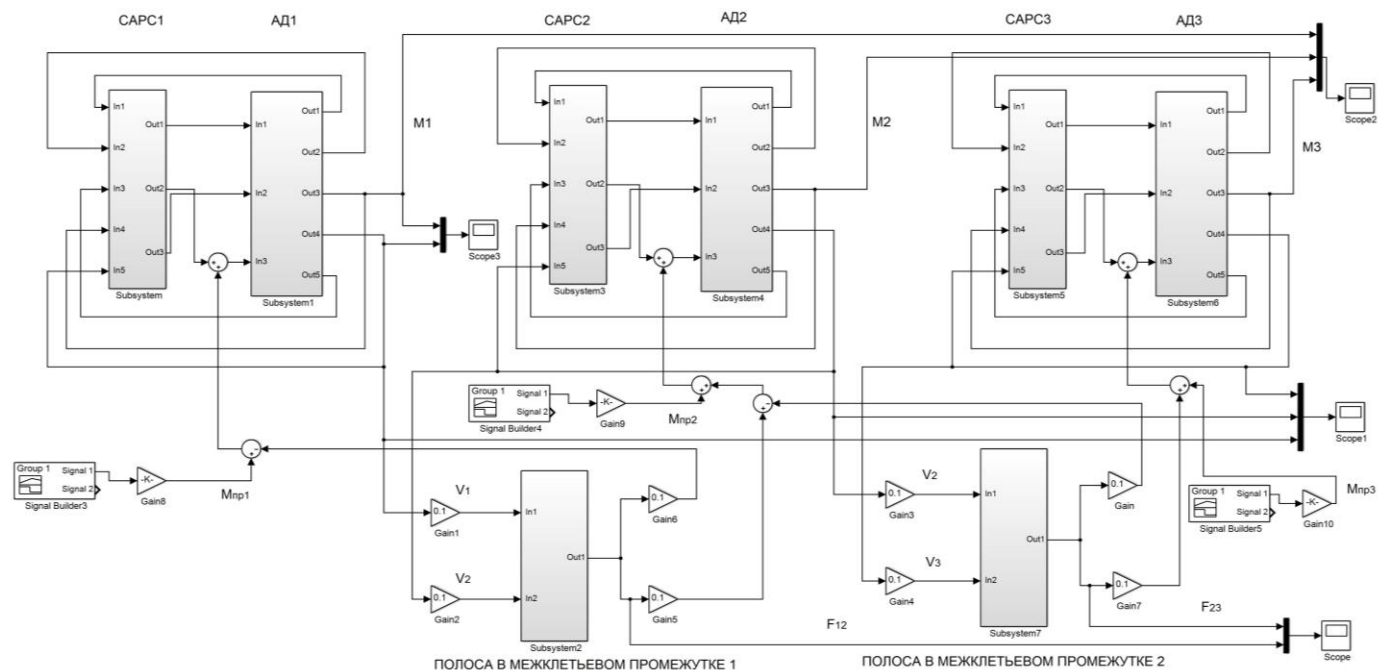


Рис. 4. Модель трехклетьевого непрерывного прокатного стана  
 (CAPC – системы регулирования скорости 1-й, 2-й, 3-й клетей; АД – модели асинхронных двигателей 1-й, 2-й, 3-й клетей; М – моменты двигателей 1-й, 2-й, 3-й клетей,  $M_{пр}$  – моменты прокатки 1-й, 2-й, 3-й клетей;  $v$  – окружные скорости валков 1-й, 2-й, 3-й клетей;  $F_{12}$ ,  $F_{23}$  – натяжения в первом и втором межклетьевых промежутках)

Таблица 1

Изменение натяжений при изменении момента прокатки в клетях

Заданные условия		Изменение $M_{пр}$ в клетях на 10%	Изменение межклетьевых натяжений, Н	
			1 – 2 клетях	2 – 3 клетях
CAPC	скорость выходной клетки 178 л/с	в 1-й	117,7	10,7
		во 2-й	-79	80
		в 3-й	-67,3	-69,3
	скорость выходной клетки 17,8 л/с	в 1-й	472	181
		во 2-й	-219	297,7
		в 3-й	-102	-328
Мдв3=const Мдв2=const (ЭП- источник момента)	скорость выходной клетки 178 л/с	в 1-й	0	0
		во 2-й	-1000	0
		в 3-й	-1000	-1000
	скорость выходной клетки 17,8 л/с	в 1-й	0	0
		во 2-й	-1000	0
		в 3-й	-1000	-1000
Стабилизация момента Мдв1, Мдв2 за счет переднего натяжения	скорость выходной клетки 178 л/с	в 1-й	464	-58,1
		во 2-й	-32,8	373
		в 3-й	-3	-48,1
	скорость выходной клетки 17,8 л/с	в 1-й	870	600
		во 2-й	-30	765
		в 3-й	-10	-110

При использовании системы стабилизации момента двигателя за счет переднего натяжения изменения момента прокатки в клетях существенно изменяют переднее натяжение, что способствует выравниванию размеров проката. Для этого случая изменения условий прокатки в клетях распространяются по ходу прокатки, увеличивая нагрузки последующих двигателей. В этом случае при изменении условий прокатки в третьей клетях существенно

возрастает только момент двигателя этой клетки. Следует отметить, что использование системы стабилизации межклетьевых натяжений не способствует выравниванию размеров проката, т.к. при постоянстве натяжения упругая деформация клетей не зависит от этого фактора.

Представленные результаты показывают, что свойства прокатного стана зависят от скорости прокатки. Для оценки динамических свойств непрерывного прокатного стана



с разными скоростями определялись частотные характеристики трехклетьевого прокатного стана (рис. 5), связывающие изменения натяжения в межклетьевых промежутках с изменениями сигнала задания скорости первой клетки при разных скоростях прокатки.

Анализ характеристик показывает, что основное влияние на полосу пропускания частот в рассматриваемом случае оказывают динамические свойства полосы. При изменении скорости прокатки коэффициент передачи полосы и ее постоянная времени в межклетьевом промежут-

ке значительно меняются. Коэффициенты, связывающие изменения скорости в первой клетке и межклетьевые натяжения, имеют большие значения при низких скоростях. При изменении скорости в первой клетке в большей степени происходит изменение натяжения в первом межклетьевом промежутке, чем во втором. Это объясняется влиянием второй (промежуточной) клетки, которая в данном случае является своеобразным демпфером. Фазовые сдвиги при низких частотах из-за влияния свойств полосы смещаются в сторону более низких частот.

Таблица 2

Изменение моментов двигателей при изменении момента прокатки в клетке

Заданные условия		Изменение $M_{np}$ в клетке на 10%	Изменение моментов двигателей, Нм		
			1	2	3
САРС	скорость выходной клетки 178 1/с	в 1-й	88,8	10,8	1,5
		во 2-й	8,5	82,6	7
		в 3-й	0,4	6,3	93,5
	скорость выходной клетки 17,8 1/с	в 1-й	52,6	29,2	18,3
		во 2-й	21,9	48,3	30,5
		в 3-й	10,4	21,9	67,3
Мдв3=const Мдв2=const (ЭП-источник момента)	скорость выходной клетки 178 1/с	в 1-й	100	0	0
		во 2-й	99,8	0	0
		в 3-й	99,9	0	0
	скорость выходной клетки 17,8 1/с	в 1-й	100	0	0
		во 2-й	100	0	0
		в 3-й	99,9	0	0
Стабилизация момента Мдв1, Мдв2 за счет переднего натяжения	скорость выходной клетки 178 1/с	в 1-й	53,6	52,2	-5,5
		во 2-й	3,3	59,3	37,5
		в 3-й	0,3	4,5	95,5
	скорость выходной клетки 17,8 1/с	в 1-й	10	30	60
		во 2-й	2	20	80
		в 3-й	2	10	90

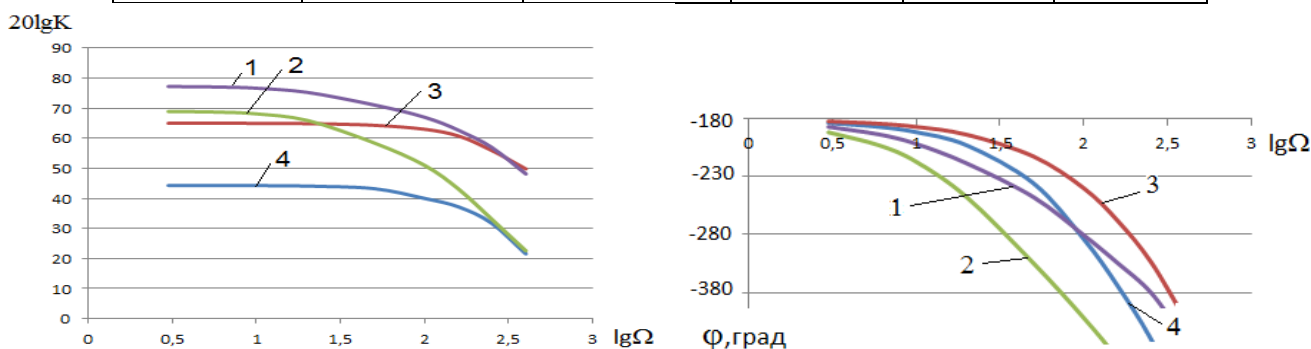


Рис. 5. Частотные характеристики прокатного стана при изменении задания скорости первой клетки (1,2-для скорости прокатки 1,78 м/с, 3,4-для скорости прокатки 17,8м/с; 1,3-для первого межклетьевого промежутка, 2,4- для второго межклетьевого промежутка)

Полученные частотные характеристики свидетельствуют о том, что при использовании системы стабилизации момента двигателя за счет изменения скорости последующей клетки прокатный стан будет обладать наилучшей выравнивающей способностью при меньших скоростях, и при увеличении скорости выравнивание размеров будет происходить в меньшей степени. Но в этом случае при изменении технологических условий прокатки при высо-

ких скоростях в меньшей степени будет происходить изменение натяжений, что также положительно скажется на работе прокатного стана.

Для сохранения динамических свойств системы регулирования при изменении скорости прокатки необходимо учитывать существенное изменение коэффициентов передачи, связывающих задание на скорость клеток и величины межклетьевых натяжений [20-22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1. Разработанный принцип построения модели трехклетьевого прокатного стана рекомендуется использовать при исследовании прокатных станов с различным числом непрерывных клетей.
2. Для конкретного прокатного стана даны количественные оценки силового взаимодействия электроприводов при изменении условий прокатки.
3. Проведенные исследования показывают, что при использовании системы регулирования натяжения с воздействием на скорости последующих клетей возможно выравнивание размеров проката. Показано, что свойства прокатного стана, в том числе его выравнивающая способность, зависят от скорости прокатки.
4. При высоких скоростях выравнивающая способность снижается, но при этом в меньшей степени изменяются межклетьевые натяжения при изменении условий прокатки, что благоприятно сказывается на режиме прокатки.
5. Методику моделирования и полученные результаты исследования рекомендуется использовать при выборе и расчете регуляторов натяжения для непрерывных прокатных станов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радионов А.А. Автоматизированный электропривод станов для производства стальной проволоки. / А.А.Радионов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – 311 с.
2. Белалов Х.Н. Производство стальной проволоки: Монография / Х.Н.Белалов, Б.А.Никифоров, Г.С.Гун и др. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 543 с
3. Шохин В.В., Карандаев А.С., Косенков А.В. и др. Устройство регулирования натяжения полосы в межклетевых промежутках непрерывного прокатного стана // Авторское свидетельство на изобретение СССР №1519806. 1989. Бюл. №41
4. Поляков М.Г., Селиванов И.А., Шохин В.В. и др. Способ регулирования размеров проката на непрерывном сорто-проволочном стане // Авторское свидетельство на изобретение СССР №555928. 1977. Бюл.№16
5. Селиванов И.А., Шохин В.В., Кузнецов Ю.И. и др. Устройство регулирования размеров проката // Авторское свидетельство на изобретение СССР №900901. 1982. Бюл. №4
6. Бычков В.П., Селиванов И.А., Шохин В.В. и др. Устройство регулирования размеров проката // Авторское свидетельство на изобретение СССР №942839. 1982. Бюл. №26
7. Поляков М.Г., Селиванов И.А., Шохин В.В. и др. Устройство регулирования размеров готового проката на непрерывном сорто-проволочном стане // Авторское свидетельство на изобретение СССР №555929. 1977. Бюл.№16
8. Поляков М.Г. Эффективность способов регулирования размеров проволоки на непрерывных прокатных станах с многовалковыми калибрами / М.Г. Поляков, И.А. Селиванов, В.А. Ткаченко и др. // Теория и практика производства метизов. – Свердловск: УПИ, 1985. – С.33-43.
9. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учеб. для вузов. - 2-

изд., испр. / Г.Г. Соколовский. — М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.

10. Терехов В.М. Системы управления электроприводов : учеб. для вузов / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.

11. Дартау В.А. Теоретические основы построения частотных электроприводов с векторным управлением / В.А. Дартау, В.В. Рудаков, А.Е. Козярук и др. // Автоматизированный электропривод – М.: Энергия, 1980. – С.93-101

12. Дацковский Л.Х. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) / Л.Х. Дацковский, В.И. Роговой и др. // Электротехника. - 1997. - №7. - С.18-28

13. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург : УРО РАН, 2000. - 654 с.

14. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

15. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом электроприводе / А.Б. Виноградов // Электротехника. - 2005, №5, С. 57-61

16. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина», 2008. – 298 с.

17. Морозов Д.П. К теории электромеханических процессов станов холодной прокатки / Д.П. Морозов // Вестник электропромышленности. – 1944. - №3. - С. 16-19.

18. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. / Н.Н. Дружинин. - М.: Металлургия, 1975. - 336 с.

19. Гутерман К.Д. Электропривод со свойствами источника момента / К.Д. Гутерман, Н.Ф. Ильинский, В.В. Михайлов, В.К. Цацепник // Автоматизированный электропривод в народном хозяйстве. – М.: Энергия, 1971. - Т.1. - С.190-192.

20. Селиванов И.А. Расчет параметров косвенного регулятора размеров для непрерывных сортовых и проволочных станов / И.А. Селиванов, В.В. Шохин // Электрооборудование промышленных предприятий. – Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1982. – С.92-97.

21. Shilyaev, P.V., Andryushin, I.Yu., Golovin, V.V., Radionov, A.A., Karandaev, A.S., Khrumshin, V.R. Algorithms of a digital automatic system for tension and loop control in a wide-strip rolling mill (2013) Russian Electrical Engineering, 84 (10), pp. 533-541. DOI 10.3103/S106837121310009X.

22. Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. Speed and Load Modes of Rolling Hollow Billet at the Wide-Strip Rolling Mill. Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2014. 5 p. DOI 10.1109/MEACS.2014.6986841.

# Study of Inter-Stand Tension Control under Stabilization Moments of Rolling Motors

Shokhin V.V., Permyakova O.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University

Magnitogorsk, Russian Federation

[shww@mgn.ru](mailto:shww@mgn.ru)

**Abstract.** An automated electric drive with the stabilization of the rolling motor moment is used for the inter-stand tension control in the continuous rolling mills. In this case, the control accuracy depends on the changes of the conditions of tension rolling process as predetermined engine moment is steady and the conditions of the mill's work are changing during rolling of the strip. The paper explores the change of the tension value depending on variation of technological conditions and the impact of these changes on the dimensional accuracy of the rolled stock. There is a comparison of the mill's work in the absence of tension control

systems and with using different systems of stabilization moments of rolling motors. The estimation of static and dynamic properties of the rolling mill is given under regulating the tension by changing the rolling speed. The results can be used in selection and calculation of systems of indirect tension control.

**Keywords:** continuous rolling mill, automatic electric drive, tension control, variation of technological conditions, deflection of the rolled stock sizes, static and dynamic properties of control systems.

# Использование технико-экономического критерия управления установкой с штанговым глубинным насосом

Садов В.Б., Плотникова Н.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[sv\\_2005@inbox.ru](mailto:sv_2005@inbox.ru), [nat\\_pl@mail.ru](mailto:nat_pl@mail.ru)

**Аннотация.** На основе анализа существующих принципов управления установками с штанговыми глубинными насосами приведен подход к синтезу алгоритмов управления, использующий критерий, включающий технические и экономические составляющие нефтедобычи. Показаны связи с диагностической системой установки при управлении. Даны принципы формирования ограничений на управление при использовании данного критерия на основе результатов работы встроенной диагностической системы. Показана информационная система в структуре управления нефтедобычей при использовании синтезированного критерия, раскрыты составляющие этой системы. Данный подход к синтезу управления нефтедобычей можно распространить и на некоторые другие виды установок добычи нефти.

**Ключевые слова:** установки с штанговым глубинным насосом, управление, информационная структура системы управления.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время вопросы автоматизации производства в нефтяной отрасли часто связывают с внедрением «умных» безлюдных технологий, «интеллектуальных скважин», системы управления которых в состоянии сами выбирать режимы откачки нефти из скважины в зависимости от параметров скважины и внешних условий. Основными целями систем управления нефтедобычей являются снижение себестоимости добычи единицы продукции, снижение общих прямых и косвенных затрат на эксплуатацию скважин. В последнем случае говорят о повышении коэффициента извлечения нефти, уменьшении коэффициента износа насосного оборудования и т.п. При управлении в автоматическом режиме установками с штанговым глубинным насосом (ШГН) используются различные алгоритмы управления.

В системах управления фирмы Lufkin Automation SAM Well Manager Variable Speed Drive в качестве критерия используется величина «хвоста» на плунжерной динамограмме при недостаточном притоке жидкости в скважину. Практически это означает, что мы держим систему в режиме на границе, где количество ходов максимально для четкой идентификации появления дефекта «недостаточный приток жидкости в скважине», определяемый по плунжерной динамограмме. Результаты исследования станций управления фирмы Lufkin [1] показывают, что при применении контроллера Lufkin Controller Well Manager RPC снижается на 20% потребляемая установкой мощность, на 25% уменьшаются затраты на обслуживание

скважины и установки, и только на 1-4% увеличивается добыча и снижаются простои оборудования.

Известны также системы управления приводами фирмы Danfoss по бездатчиковой технологии механизированной добычи нефти SALT (Sensor less Artificial Lift Technology), где используются данные по нагрузке при использовании частотно-регулируемого привода для регулирования подачи насоса. В ходе регулирования на каждом участке движения анализируется нагрузка и в случае необходимости снижается или увеличивается скорость движения [2]. При этом в качестве насосов могут использоваться как штанговые глубинные насосы, так и винтовые и погружные электроцентробежные насосы.

Главным недостатком, приведенных алгоритмов управления насосными установками является отсутствие прямой связи с основными целями систем управления нефтедобычей. Это не позволяет менять уровень добычи нефти в зависимости от текущих параметров добывающей установки и экономических составляющих нефтедобычи.

## СИНТЕЗ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Синтез алгоритмов и систем управления определяется областью их применения [3].

В [4] приведен подход, при котором для формирования уровня текущей добычи для скважинной установки с ШГН ищется максимум критерия, включающего составляющие уровня добычи, расходов на электроэнергию и расходов на обслуживание глубинного оборудования и привода штангового насоса

$$G = q - k_1 \cdot (n + \alpha \cdot n^2) - k_2 \cdot n, \quad (1)$$

где  $q$  – величина текущей добычи в единицу времени (текущая производительность скважины) или ее оценка;  $n$  – текущее количество двойных ходов в минуту привода штангового глубинного насоса;  $M = k_1 \cdot (n + \alpha \cdot n^2)$  – величина, характеризующая расходы на электроэнергию в единицу времени;  $D = k_2 \cdot n$  – величина, характеризующая расходы на обслуживание глубинного оборудования и привода штангового насоса в пересчете на единицу времени.

Масштабные коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  имеют размерности, приводящие экономические составляющие к размерности текущей добычи в единицу времени.

Постоянные величины  $k_1, k_2, \alpha$  можно получить на основе экспертных оценок. Они могут меняться в зависимо-



сти от цены на нефть (цены добычи нефти), цены на электроэнергию, цены и стоимости обслуживания глубинного оборудования и насосной установки.

Следует отметить, что при поиске максимума критерия вида (1) необходимо учитывать ограничения на управляющую величину (количество двойных ходов) вследствие характеристик привода ШГН и характеристик нефтяной скважины, нефтяного пласта и откачиваемой жидкости. Необходимо в контроллере системы управления нефтедобычей скважины использовать диагностическую систему, по результатам работы которой делаются выводы об ограничениях на управляющую величину и в некоторых случаях о возможности или целесообразности дальнейшей работы насосной установки (например, при диагностике обрыве колонны штанг). Если, например, в ходе работы алгоритма мы имели ограничение количества двойных ходов 6, а в результате работы адаптивного алгоритма мы сделали шаг с 4 до 4,5 двойных ходов. При этом диагностическая система на этом значении выдала результат "недостаточный приток жидкости в скважину". При этом следует сдвинуть ограничение количества двойных ходов в значение 4,5, так как увеличение количества ходов относительно этого значения неэффективно. Так же поступает, если в ходе работы алгоритма недостаточный приток жидкости в скважину не был выявлен, но текущее ограничение количества ходов меньше технологического, и мы вышли за границу текущего ограничения количества двойных ходов. Диагностическую систему целесообразно строить по результатам оценки динамограмм и ваттметрограмм, так как данные подходы наиболее проработаны.

#### СИНТЕЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ НЕФТЕДОБЫЧИ

Современные системы управления, как правило, имеют связь с цеховой информационной системой. Причем, эта связь в большинстве случаев имеет односторонний характер: несмотря на то, что запросы и ответы от цеховой информационной системы идут в разных направлениях, сама информация перемещается от системы управления в цех, а из цеха идут только запросы на получение данных, например, данных динамограмм и ваттметрограмм, параметров работы установки и т.п. В случае использования при управлении критериев управления нефтедобычей типа (1) целесообразным становится информационный обмен и в направлении цеховая информационная система – система управления нефтедобычей. В этом направлении можно передавать информацию, которая будет приводить к изменению параметров нефтедобычи или даже к изменению режимов добычи нефти. Это укладывается в понятия «интеллектуальное месторождение» и «интеллектуальная скважина», которые, очевидно, не должны быть автономны, а должны быть тесно связаны друг с другом при решении общей задачи минимизации расходов на добычу одной тонны нефти и различных частных задач, решаемых на каждом уровне управления. То есть требуется корректировка тех информационных потоков, которые существуют в настоящее время в структуре управления нефтедобычей.

Целесообразно всю информационную систему разбить на группы с определением связей между ними. Данная структура представлена на рис. 1 [5].

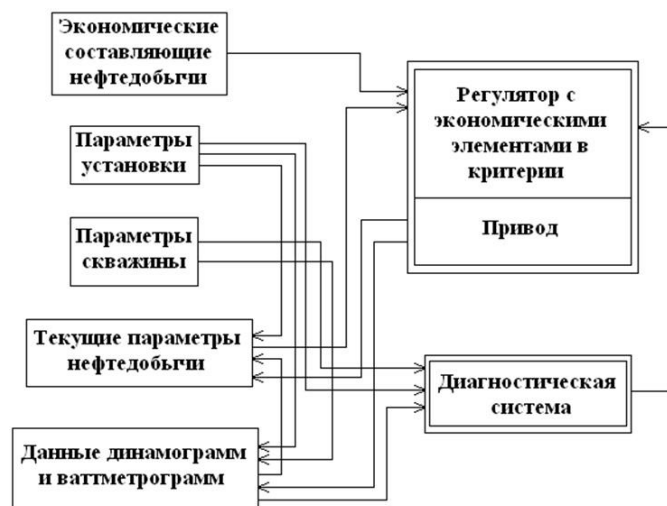


Рис. 1. Информационные связи в системе управления приводом ШГН

На рис. 1 слева показаны информационные группы в системе. Справа в двойных линиях показаны модули аппаратно-программной части системы управления. Рассмотрим составляющие данной системы. Блок экономических составляющих нефтедобычи содержит только коэффициенты затрат, входящих в критерий управления в автоматическом режиме, и связан с регулятором системы управления. При изменении данных этого блока меняются значения критерия и, соответственно, система управления реагирует на него изменением управляющего воздействия (в нашем случае меняется количество двойных ходов). Блок параметров установки индивидуален для каждого типа привода ШГН и содержит такие величины, как длина хода полированного штока, площадь поршня гидроцилиндра при гидрофицированном приводе и т.п. Эти параметры влияют на параметры блока текущих параметров нефтедобычи (например, на оценку значения текущей производительности установки), на блок данных динамограмм и ваттметрограмм (например, на вычисленные значения точек плунжерной динамограммы, полученной из данных устьевой), и на диагностическую систему (например, при оценке текущей нагрузки в колонне штанг). Блок параметров скважины содержит такие значения, как глубина погружения насоса, уровень и характеристики откачиваемой жидкости, характеристики насоса и колонны штанг и т.п. Параметры данного блока влияют на диагностическую систему (например, при оценке минимального значения нагрузки на колонну штанг), на блок данных динамограмм и ваттметрограмм (например, на вычисленные значения точек плунжерной динамограммы, полученной из данных устьевой). Блок текущих параметров нефтедобычи содержит текущие данные работы установки (например, текущее замеренное количество двойных ходов) и оценочные данные результатов нефтедобычи (например, производительность установки). Параметры этого блока влияют на работу регулятора, так как, например, значение оценки производительности входит в значение критерия автоматического управления установкой. Блок данных динамограмм и ваттметрограмм содержит

данные динамограмм (устевых и, возможно, плунжерных, полученных в результате расчета) и архивы этих данных для последующего вывода его через коммуникационные каналы или вывода на внутренние устройства индикации. Динамограммы и, возможно, ваттметрограммы используются в диагностической системе для выдачи результатов оценки качества нефтедобычи и оборудования скважины и установки.

Такое разбиение информации на группы позволит использовать единые структурные единицы при передаче данных от/в систему управления приводом вне зависимости от типа привода ШГН. Наполнение же блоков будет зависеть от типа привода ШГН и, возможно, от типа насоса.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведен новый метод синтеза управления установкой добычи нефти с штанговым глубинным насосом. Данный подход пригоден также и в случае использования насосов другого типа, например, электроцентробежных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зубаиров И.Ф. Интеллектуальная скважина – повышение эффективности механизированной добычи // Инженерная практика. – 2011. – № 5. – С. 84-89.

2. [http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/90BCF710-9C97-4F9C-9EF5-F9274DA9A842/0/salt\\_broshyura.pdf](http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/90BCF710-9C97-4F9C-9EF5-F9274DA9A842/0/salt_broshyura.pdf) (дата обращения 15.04.2013).

3. Плотникова Н.В. Постановка задачи синтеза квазистационарной стохастической системы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2009. – № 3, Вып. 9. – С. 68-71.

4. Садов В.Б. Автоматическое управление установкой скважинного штангового насоса / В.Б. Садов, А.Л. Шестаков // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 1. – С. 98-101.

5. Садов В.Б. Синтез информационной системы установки скважинного штангового насоса // Актуальные вопросы развития науки в мире: материалы IV Международной научной конференции. – М.: Евразийское Научное Объединение, 2015. – С. 51-53.

## Application of Technical and Economic Criteria of Equipment Control with Sucker Rod Pump

Sadov V.B., Plotnikova N.V.

South Ural State University (national research university),  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[sv\\_2005@inbox.ru](mailto:sv_2005@inbox.ru), [nat\\_pl@mail.ru](mailto:nat_pl@mail.ru)

**Abstract.** Approach to the synthesis of control algorithms with application of the criterion including technical and economic component of oil production is given on the basis of the analysis of the existing control principles of equipment with drive sucker rod pump. Connections with diagnostic system of equipment in the control process are described. The principles of restrictions formation on control when using this criterion on the basis of operation results of embedded diagnostic system are given. The

information system in the control structure of oil production with application of the synthesized criterion is shown, components of this system are described. This approach to the control synthesis of oil production can be extended for some other types of equipment of oil production.

**Keywords:** equipment with the drive sucker rod pump, control, an information structure of control system.

# Катковая система компенсации колебаний высотного сооружения в сейсмоактивной зоне

Бурцева О.А., Ткачев А.Н., Чипко С.А.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
г. Новочеркасск, Российская Федерация  
[kuzinaolga@yandex.ru](mailto:kuzinaolga@yandex.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены системы пассивного гашения колебаний высотных сооружений. Выявлены их достоинства и недостатки. Предложена катковая система компенсации колебаний высотных сооружений, подверженных сейсмическому воздействию. Описан принцип ее работы. Оценены преимущества. Составлена математическая модель движения несущего и несомого тел. Рассматриваются низкочастотные колебания виброзащитной системы под действием внешнего гармонического воздействия. Определены оптимальные параметры настройки роликового гасителя в составе системы компенсации.

**Ключевые слова:** высотное сооружение, гашение колебаний, пассивные системы, катковая система компенсации, виброизоляция.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы сейсмозащиты зданий и сооружений объясняется постоянным наличием сейсмической активности в различных районах Земли. Только за последнее десятилетие в мире было зарегистрировано более 4 тыс. стихийных бедствий.

Для решения проблемы виброзащиты применяют системы пассивного и активного подавления колебаний, которые классифицируют по принципу действия: демпфирующие, адаптивные, инерционные (с гасителями колебаний), регулирующие жесткость конструкции, изолирующие. К наиболее эффективным и менее затратным можно отнести последние три группы. Системы активной виброзащиты используются с целью подавления остаточных нежелательных колебаний сооружения после отработки пассивной системы. Поэтому создание активной системы компенсации возможно лишь после исследования эффективности пассивной.

В статье рассмотрена изолирующая система компенсации колебаний высотного сооружения с кинематическими связями. Подобные системы были предложены М. Вискордини и В.В. Назиным [1-4]. Однако применение систем с кинематическими опорами еще недостаточно изучено, особенно при горизонтальном воздействии с доминантным периодом более 1 с. В этом случае здание с кинематическими опорами получает значительные смещения, при котором происходит потеря устойчивости всего сооружения и его полное обрушение.

Некоторые исследования динамического поведения механических систем, стесненных кинематическими связями, проведены в работах [5-9].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается динамическое поведение трехмассовой системы абсолютно твердых тел: несущего тела массой  $m_1$ ; сферического шарнира с массой ролика  $m_2$ ; несо-

мого тела с массой  $m_3$  под действием внешнего кинематического возбуждения  $F(t)$ .

Несомое тело моделирует сооружение, установленное на сваях-стойках, каждая из которых выполнена в виде «стакана». Нижняя часть сваи оснащена вогнутыми циклоидальными выемками радиуса  $r$  (см. рис. 1, б). Количество выемок симметрично по горизонтальным координатам с целью сохранения устойчивости сваи. Масса сваи и воспринимаемая ею нагрузка является массой несомого тела. Свая опирается на сферические однородные шарниры с массой ролика  $m_2$  и радиуса  $r$ .

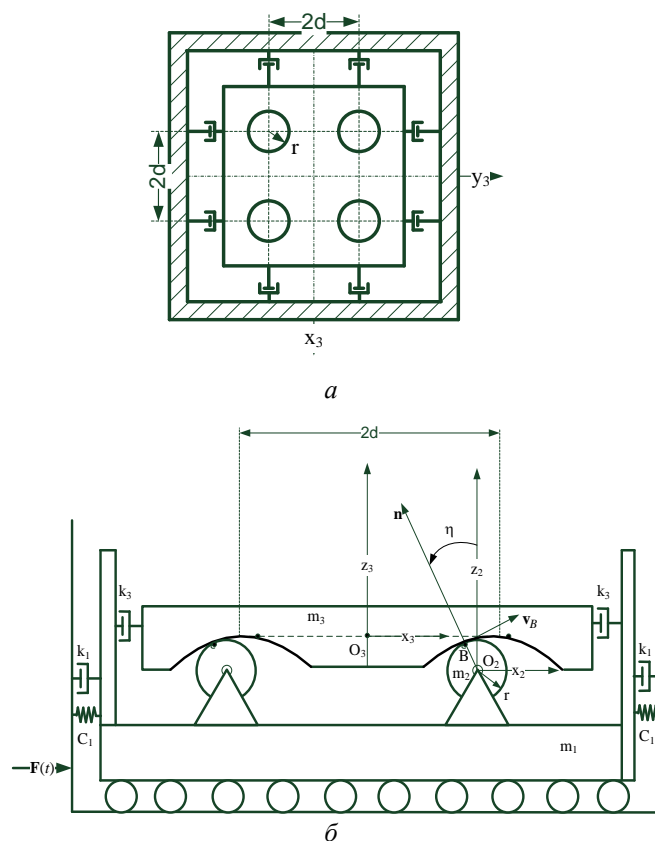


Рис. 1. Принципиальная схема сейсмозащитной системы: а – вид сверху; б – вид сбоку

Поскольку стакан сваи находится в грунтовом слое, то жесткостные и диссипативные характеристики грунта описываем параметрами  $C_{x1}(C_{y1})$  и  $k_{x1}(k_{y1})$  соответственно.

Между сваями и стаканом дополнительно установлены демпферы с диссипацией  $k_{x3}(k_{y3})$ . Количество демпферов может быть любым, но не менее двух с каждой стороны сваи.

Движение несомого тела представляет собой динамику верхнего строения сооружения, которое через систему шаровых тел качения опирается на фундамент. Оно моделирует сооружение или строительную конструкцию, колебания которого будем учитывать только по первой форме с частотой основного тона. Движение несущего тела отражает динамическое поведение фундамента.

Предложенная система компенсации колебаний реализует принцип сейсмоизоляции сооружения от фундамента. Причем под действием собственного веса сооружения она способна вернуться в исходное положение после сейсмолотчка. Кроме того, предусмотрено проскальзывание свай относительно фундамента в двух направлениях. Ограничение относительного смещения осуществляется посредством циклоидальных выемок.

Данная система хорошо вписывается в конструкцию свайного фундамента, не требует дополнительного пространства, бесшумна. В циклоидальных выемках со временем не накапливается влага, лед, пыль, поскольку они выполнены выпуклостью вверх. Этот фактор является существенным, поскольку система устанавливается в труднодоступном месте сооружения.

Целью настоящей работы является построение динамической модели системы компенсации с роликовым гасителем и определение оптимальных параметров его настройки.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ

Рассмотрим плоскость  $Oxz$ . На рис. 1 дуга KBN – циклоида, представляющая собой рабочую кривую роликового гасителя. Точки A и B – точки касания ролика и рабочей кривой KBN.

Введем две обобщенные координаты:  $x_1$  – перемещение центра масс несомого тела;  $\eta$  – угол отклонения ролика при изменении положения точки B контакта ролика и выемки несущего тела.

Координаты вектора нормали  $n$  в точке контакта поверхностей равны:

$$n = (\sin \eta; 0; \cos \eta).$$

Условием движения ролика по рабочей выемке без проскальзывания является равенство линейных скоростей поверхностей несомого тела и ролика в точке контакта B:

$$v_B = \dot{x}_1 i + i j \times r n,$$

где  $\dot{\eta}$  – угловая скорость ролика относительно центра его массы  $C_2$ ;  $\dot{x}_1$  – скорость несущего тела, полученная вследствие сейсмолотчка;  $r$  – радиус ролика;  $i, j$  – единичные векторы координатных осей.

Проекция скорости точки B на оси координат при движении несущей массы вправо следующие (рис. 2, a):

$$v_{Bx} = \dot{x}_1 - \dot{\eta} r \cos \eta, v_{Bz} = \dot{\eta} r \sin \eta;$$

или при движении несущей массы влево (рис. 2, б)

$$v_{Bx} = -\dot{x}_1 + \dot{\eta} r \cos \eta, v_{Bz} = \dot{\eta} r \sin \eta.$$

Поскольку несомое тело совершает поступательное движение, то квадрат скорости точки B, а следовательно и центра масс  $C_3$ , равен

$$v_B^2 = v_{C_3}^2 = v_{Bx}^2 + v_{Bz}^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{\eta}^2 r^2 - 2\dot{x}_1 \dot{\eta} r \cos \eta.$$

В общем виде уравнения Лагранжа следующие:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_1} = Q_{x1}; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\eta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \eta} = Q_{\eta}$$

где  $Q_{x1}, Q_{\eta}$  – обобщенные силы, соответствующие обобщенным координатам  $x_1$  и  $\eta$ . Они включают в себя внешнее воздействие, потенциальную и диссипативную составляющие. Для несомого тела работу совершают: сила тяжести  $P_3 = m_3 g$ ; сила вязкого сопротивления в демпфере  $k_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_1)$ ; для сферического шарнира – работа сил трения в ролике  $(m_2 + m_3) g \mu \text{sign} \dot{\eta}$ , где  $\mu$  – коэффициент трения; в несущем теле – работа упругой силы  $C_1 x_1$ ; сил вязкого сопротивления в демпфере  $k_1 \dot{x}_1$  и сил внешнего гармонического возбуждения  $F(t)$ .

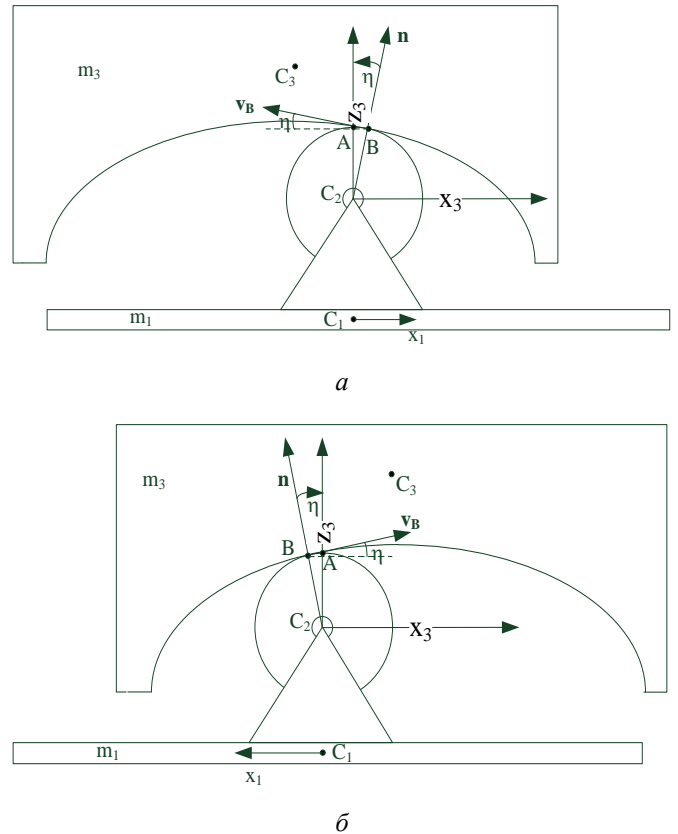


Рис. 2

Вводя обозначения  $\rho = \frac{m_3}{m_1}$ ;  $2n_x = \frac{k_1}{m_1}$ ;  $2n_{\eta} = \frac{k_3}{m_3}$ ;  $\omega_k^2 = \frac{C_1}{m_1}$  и полагая  $\frac{m_2}{m_3} \rightarrow 0$ , преобразуем полученные уравнения к виду

$$(1 + \rho)\ddot{x}_1 + 2n_x \dot{x}_1 + \omega_k^2 x_1 - \rho r (\dot{\eta} \cos \eta - \dot{\eta}^2 \sin \eta) = \frac{F(t)}{m_1}; \tag{1}$$

$$r \ddot{\eta} - \dot{x}_1 \cos \eta + 2n_{\eta} r \dot{\eta} \cos \eta \sin \eta = - \left( g \cos \eta + \frac{g \mu}{r} \text{sign} \dot{\eta} \right).$$

Установим частоту  $\omega_r$  и период  $T_r$  собственных колебаний роликового гасителя. Для этого зафиксируем несущее тело ( $\dot{x}_1 := 0$ ) и, положив  $n_{\eta} = 0$ ,  $\mu = 0$ , из второго уравнения (1) получаем

$$\ddot{\eta} + \omega_r^2 \cos \eta = 0, \quad \omega_r^2 = \frac{g}{r}, \quad T_r = 2\pi \sqrt{\frac{r}{g}}.$$

Таким образом, частота колебаний гасителя обратно пропорциональна радиусу ролика.



ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА С КАТКОВОЙ СИСТЕМОЙ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

Уравнения (1) представляют систему нелинейных дифференциальных уравнений, исследование которой затруднительно. Исследование динамического поведения системы компенсации проведем с помощью линеаризованной математической модели.

Рассмотрим плоскость  $OXZ$ . На рис. 3 дуга КВН – циклоида, представляющая собой рабочую кривую роликового гасителя. Дугу циклоиды АВ разбиваем на прямолинейные участки с углом наклона  $\alpha$ . Тогда угол поворота ролика  $\eta$  равен отношению дуги АВ к радиусу ролика  $r$ . Считаем, что угол  $\alpha$  постоянен на соответствующем участке циклоиды. Вектор  $S$  приблизительно равный по модулю дуге АВ циклоиды, определяет изменение положения центра масс несомого тела.

Введем две обобщенные координаты:  $x_1$  – перемещение центра масс несущего тела;  $S$  – перемещение центра масс несомого тела, причем его проекции на оси координат и скорости равны:

$$\begin{aligned} S_x &= x_1 - S \cos \alpha; & S_z &= S \sin \alpha; \\ \dot{S}_x &= \dot{x}_1 - \dot{S} \cos \alpha; & \dot{S}_z &= \dot{S} \sin \alpha. \end{aligned}$$

Кинетическая энергия трехмассовой системы:

$$\begin{aligned} 2T &= 2(T_1 + T_2 + T_3) = m_1 \dot{x}_1^2 + 2J_y \frac{\dot{S}^2}{r^2} + m_3 v_B^2 = \\ &= m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 r^2 \frac{\dot{S}^2}{r^2} + m_3 (\dot{S}_x^2 + \dot{S}_z^2), \end{aligned}$$

где  $T_1$  и  $T_3$  – кинетическая энергия поступательного движения несущего и несомого тела;  $T_2$  – кинетическая энергия вращательного движения ролика;  $J_y$  – момент инерции ролика, принятого в виде однородного тела радиуса  $r$ . Поскольку  $m_2 \ll m_1$  и  $m_3$ , то кинетической энергией ролика пренебрегаем.

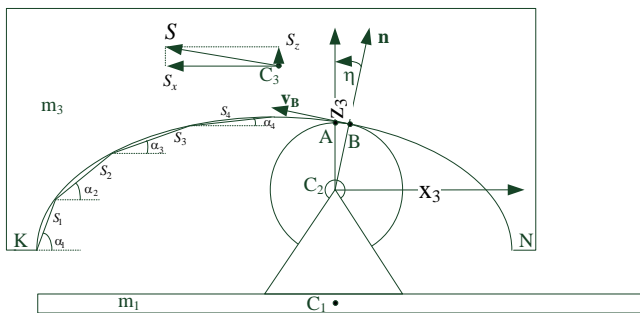


Рис. 3. Кинематика системы компенсации

Выражение для обобщенной работы имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta A &= (F(t) - C_1 x_1 - k_1 \dot{x}_1) \delta x_1 - P_3 \delta S \sin \alpha - \\ &\quad - k_3 (\dot{S}_x - \dot{x}_1) (\delta S_x - \delta x_1) - \\ &\quad - m_3 g \mu \operatorname{sign} \frac{\dot{S}}{r} \delta S = (F(t) - C_1 x_1 - k_1 \dot{x}_1) \delta x_1 - \\ &\quad - P_3 \delta S \sin \alpha - k_3 \dot{S} \cos^2 \alpha \delta S - \\ &\quad - m_3 g \mu \operatorname{sign} \frac{\dot{S}}{r} \delta S = (F(t) - C_1 x_1 - k_1 \dot{x}_1) \delta x_1 + \\ &\quad + \left( -P_3 \sin \alpha - k_3 \dot{S} \cos^2 \alpha - m_3 g \mu \operatorname{sign} \frac{\dot{S}}{r} \right) \delta S. \end{aligned}$$

Составляя уравнения движения Лагранжа, получим:

$$\ddot{x}_1 + 2n_{x1} \dot{x}_1 + \omega_k^2 x_1 = \frac{F(t)}{m_1} + \frac{k_3}{m_1} \dot{x}_3;$$

$$+ 2n_{x3} \dot{x}_3 = 2n_{x3} \dot{x}_1, \quad (2)$$

где обозначено:  $2n_{x1} = \frac{k_1}{m_1}$ ;  $2n_{x3} = \frac{k_3}{m_3}$ ;  $\omega_k^2 = \frac{C_1}{m_1}$ .

Систему (2) подвергнем преобразованию Лапласа и составим передаточные функции:

- без компенсации  $W(p) = \frac{1}{m_1(p^2 + 2n_{x1}p + \omega_k^2)}$ ;

- с катковым гасителем колебаний

$$WG(p) = \frac{(p + 2n_{x3})}{m_1(p^2 + 2n_{x1}p + \omega_k^2)(p + 2n_{x3}) - 2n_{x3}k_3p}.$$

Варьируемым параметром гасителя является коэффициент демпфирования  $n_{x3}$ . Для численного анализа используем параметры виброзащитной системы: частота основного тона колебаний несомой конструкции  $\omega_k = 1$  Гц, частота сейсмозвозбуждения близка к частоте основного тона  $\omega_0 = 0.9$  Гц,  $n_{x1} = 0.1 \div 0.3$  (для гибкого сооружения и сооружения, возведенного в скользящей опалубке);  $F_0 = 0.3 \div 0.5$  g (сейсмическое воздействие интенсивностью 7÷9 баллов). Максимальная АЧХ сооружения без гасителя  $A(\omega) = 5.025$ .

Методика определения параметров настройки гасителя основана на том, что АЧХ виброзащитной системы с оптимально настроенными параметрами имеет вид, симметричный относительно частоты  $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$  [10]. Находим фиксированные частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , на которых должен достигать максимум АЧХ с гасителем. Из рис. 4 определяем  $\omega_1 = 0.5$  Гц и  $\omega_2 = 1.2$  Гц.

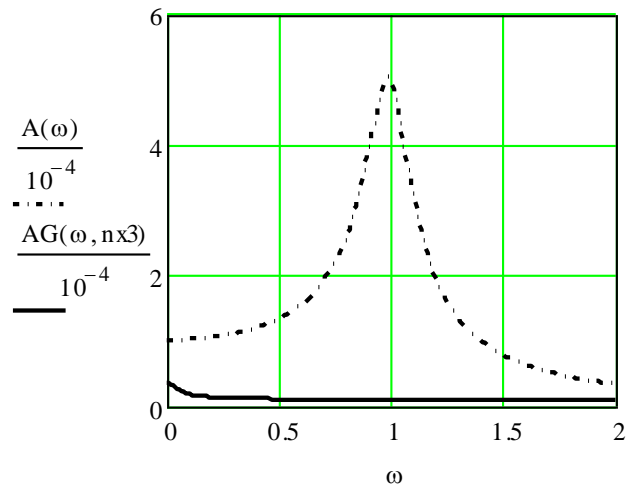


Рис. 4. АЧХ сооружения без гасителя  $A(\omega)$  и с оптимально настроенным роликовым гасителем  $AG(\omega_1, n_{x3})$

Далее графически определяем точку пересечения двух графиков  $AG(\omega_1, n_{x3})$  и  $AG(\omega_2, n_{x3})$ , построенных при изменении  $n_{x3}$ . Значение  $n_{x3}$ , при котором имеет место это пересечение, и определяет оптимальное значение коэффициента демпфирования  $n_{x3} = 0.2$ , см. рис. 5.

Амплитудно-частотная характеристика сооружения без гасителя  $A(\omega)$  и с оптимально настроенным гасителем приведена на рис. 5. Максимальная амплитуда колебаний сооружения с роликовым гасителем  $AG(\omega, n_{x3}) = 0.35$ , что свидетельствует о высокой эффективности системы компенсации.

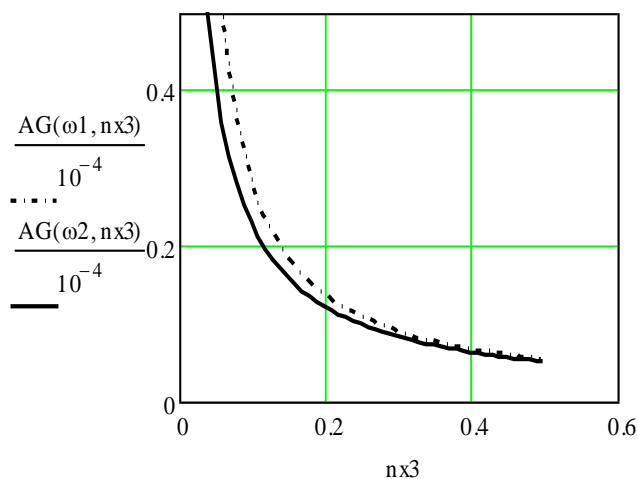


Рис. 5. Определение оптимального коэффициента демпфирования

#### ВЫВОДЫ

Разработанная в данной статье динамическая модель катковой системы компенсации развивает новый метод виброзащиты гибких сооружений, работающих по основной частоте колебаний в низкочастотном диапазоне. Предложенная система компактна и эффективно снижает уровень максимальных амплитуд вынужденных колебаний высотных сооружений в указанном частотном диапазоне.

Полученные уравнения движения линеаризованной системы компенсации позволили определить уравнения АЧХ. На их основе предложен графический метод определения параметров настройки роликового виброгасителя, который позволяет настроить его по частоте и амплитуде.

Результаты исследований, полученные в статье, пред-

ставляют научный и практический интерес для специалистов в области теории колебаний. Они также могут быть использованы разработчиками катковых виброгасителей для снижения уровня вынужденных колебаний разнообразных объектов в низкочастотном диапазоне.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сейсмоизоляция и адаптивные системы сейсмозащиты. – М.: Наука, 1983. – 324 с.
2. Сейсмостойкие здания и развитие теории сейсмостойкости // Материалы 6 Международной конференции по сейсмостойкому строительству. – М.: Стройиздат, 1984. – 255 с.
3. White R.G. Vibration control // Noise and Vibr., Chchester, 1989. – P. 685-712.
4. Черепинский Ю.Д. К сейсмостойкости зданий на кинематических опорах // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1972. – № 3. – С. 13-15.
5. Неймарк Ю.И., Фуфаев НА. Динамика неавтономных систем. – М.: Наука, 1967. – 520 с.
6. Lobas L.G. On rolling system // Int. Appl. Mech. – 2000. – 36, №5. – P. 691-696.
7. Легеза В.П. Динамика виброзащитных систем с роликовым гасителем низкочастотных колебаний // Проблемы прочности. – 2004. – № 2. – С. 106-118.
8. Легеза В.П., Ахметов Ю.Г. Эффективность виброзащитной системы с циклоидальным катковым сейсмоамортизатором // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2006. – № 4. – С. 56-68.
9. Легеза В.П. Эффективность виброзащитной системы с изохронным роликовым гасителем // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2013. – № 2. – С. 65-76.
10. Корнев Б.Г., Резников Л.М. Динамические гасители колебаний: теория и технические приложения. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 304 с.

## Roller System of Oscillation Neutralization for High-Rise Building at Seismic Impact

Burtseva O.A., Tkachev A.N., Chipko S.A.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Novocherkassk, Russian Federation

[kuzinaolga@yandex.ru](mailto:kuzinaolga@yandex.ru)

**Abstract.** The passive neutralization oscillations systems for high-rise construction are under consideration. Their advantages and disadvantages have been revealed. A roller system neutralization of oscillation for high-rise constructions subject to seismic affecting is offered. The principle of its work is described and its advantages are estimated. The mathematical movement model for carrying and carried bodies is made. Low-frequency oscilla-

tion vibration protection systems under the influence of external harmonious impact are considered. Optimum adjustment parameters for a roller damper in the structure of the compensation system are defined.

**Keywords:** high-rise building, damping oscillations, passive systems, neutralization roller system, vibration insulation.

# Система управления технологическим процессом изготовления изделий типа «BOXER»

Григорюк Е.Н.

Муромский институт (филиал)

Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
г. Муром, Российская Федерация

[kat-grigoryuk@yandex.ru](mailto:kat-grigoryuk@yandex.ru)

**Аннотация.** Высокий уровень автоматизации технологических процессов положительно влияет на качество выпускаемой продукции и на ее количественный коэффициент. В докладе рассматривается технологический процесс изготовления изделий патронного производства. Данная отрасль народного хозяйства является актуальной в связи со сложившейся неблагоприятной обстановкой в Мире. Бесперебойный выпуск продукции повышает потенциал обороноспособности России. Предлагается система управления (СУ). На входе в систему материальные и энергетические ресурсы. Центральная (основная) процедура СУ и процесс преобразования – это процесс изготовления изделий. Процедуры сравнения в СУ – эталонное сравнение с идеальным ходом технологического процесса. На выходе изделие соответствующее стандартам качества.

**Ключевые слова:** сложный технологический процесс, автоматизированная система управления, капсюль-воспламенитель, структура управления.

## ВВЕДЕНИЕ

Изготовление изделий высокого качества и различной номенклатуры является приоритетным для производителя. Предлагаемая СУ сложным технологическим процессом промышленного производства основана на структурном исследовании конкретного технологического процесса. СУ представляют собой различные потоки информации, материалы и энергию (на входе и выходе из системы), различные процессы преобразования, а также процедуры сравнения [1, 2]. В докладе представлен вариант построения СУ технологическим процессом производственного предприятия с полным технологическим циклом (предполагает наличие заготовительных, вспомогательных и сборочных подразделений) на примере изготовления изделий, выпускаемых на полуавтоматической линии.

## ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Технология изготовления КВ состоит из технологических операций, включающих изготовление УВС [3], колпачка, наковаленки и их сборки на полуавтоматической линии [4]. Технология изготовления КВ на полуавтоматической линии представлена на рис. 1.

Полуавтоматическая линия имеет защитное ограждение 1. Подача групповой сборки осуществляется при помощи шагового транспортера 2. Заполнение гнезд групповой сборки колпачками производится с помощью механизма наборы 3, которые поступают поочередно по транспортеру 2 к механизму дозирования УВС 4. Механизм дозирования загружается УВС при помощи механизма

загрузки 5. Позиция 7 механизм для наложения на сборки и досылки парафинированных защитных бумажных кружков в колпачки (вырубка защитных кружков производится на механизме 6, перфорированные накладки после позиции 7 возвращаются на позицию 6). На прессе 8 происходит прессование бумажного кружка, сборка передается на пресс 9 предназначенный для досылки наковаленки из перфорированной накладки в колпачок (наборка наковаленки в перфорированную накладку осуществляется на механизме 10). Пресс 11 производит калибровку КВ по высоте. Затем групповая сборка подается на механизм 12, который выталкивает КВ, далее КВ подается на механизм 13 предназначенный для чистки изделий от пыли УВС. Групповые сборки после механизма выталкивания 12 подаются на механизм 14 предназначенный для чистки групповой сборки, а далее по напольному транспортеру на позицию 3. Устройство управления 15 предназначено для управления последовательностью работы механизмами линии. Позиция 16 представляет собой механизм подачи доз лака в колпачок. Позиция 17 место лакирования защитного кружка. Переход на другой типоразмер КВ возможен при смене инструмента [5, 6].

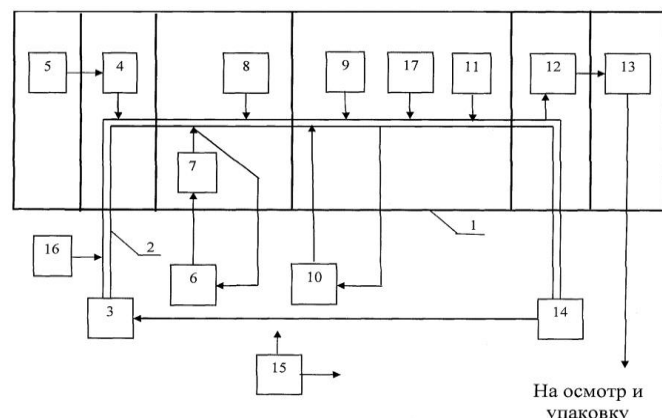


Рис. 1. Линия изготовления КВ

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Стремительное развитие техносферы повышает вероятность возникновения неконтролируемых выбросов энергии, которые выражаются в виде аварий и техносферных катастроф. Согласно этому актуальным становится разработка СУСП, цель и мотивация которой – прогнозирование и выявление возможных отклонений, приводящих к неконтролируемому выбросу энергии.

Разработанная СУСТП основана на структурном исследовании технологического процесса изготовления капсуль-воспламенителей (КВ) предприятия оборонного назначения [7], на линии изготовления КВ рис. 1. На входе в систему материальные и энергетические ресурсы, поставляемые вспомогательным производством. Исходя из теории автокомпенсации помеховых воздействий описание потребности представлено в виде:

$$P = U_0(t) \cdot e^{j[\omega t + \varphi_0(t)]}, \quad (1)$$

где  $U_0(t)$  – количественная характеристика эталонного потока;  $\omega$  – качественная характеристика;  $\varphi_0(t)$  – фаза (временное отклонение) эталонного потока;  $t$  – время;  $j$  – мнимая единица. Составляющие физической операции  $Q$  ( $Q = \{A, E, C\}$ , где  $A$  и  $C$  – соответственно входной и выходной потоки;  $E$  – операция по преобразованию  $A$  в  $C$ .) выражены через соотношения

$$A = U_1(t) \cdot e^{j[\omega t + \varphi_1(t)]} \quad (2)$$

и

$$C = U_2(t) \cdot e^{j[\omega t + \varphi_2(t)]}, \quad (3)$$

где  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  – количественные характеристики, соответственно, входного и выходного потоков;  $\varphi_1(t)$  и  $\varphi_2(t)$  – фазы (временные отклонения) входного и выходного потоков.

Основная (центральная) процедура СУСТП – это процесс изготовления изделий (процесс преобразования)  $E$  выражена через коэффициент количественно-качественного преобразования  $K(p, u, \varepsilon)$

$$E = K(p, u, \varepsilon), \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – внешние дестабилизирующие факторы (факторы торможения, изменения планов под давлением внешних обстоятельств и т.д.);  $p = d/dt$  – оператор Лапласа, позволяющий учесть инерционность системы;  $u$  – управляющее воздействие.

Тогда (3), с учётом (4), можно представить в виде

$$C = U_2(t) \cdot e^{j[\omega t + \varphi_2(t)]} = E \cdot U_1(t) \cdot e^{j[\omega t + \varphi_1(t)]}. \quad (5)$$

Процедуры сравнения в СУСТП представляют собой эталонное сравнение с реальным ходом технологического процесса. На выходе обеспечивается изделие, соответствующее стандартам качества [2, 8]. Система управления технологическим процессом изготовления КВ представлена на рис. 2.

При создании АСУТП организуется информационно-вычислительный центр (ИВЦ) – совершенно новое структурное подразделение. Основными функциями ИВЦ АСУТП являются:

- сбор и автоматизированная обработка технологической и экономической информации, а также выдача отчетов;
- решение технико-экономических задач АСУТП;
- совершенствование алгоритмов с учетом внесенных изменений и дополнений ситуационного характера;
- организация, хранение и мобильность нормативно-справочных массивов на машинных носителях;
- бесперебойная работа комплекса технических средств;
- разработка и функционирование перспективных направлений развития ИВЦ.

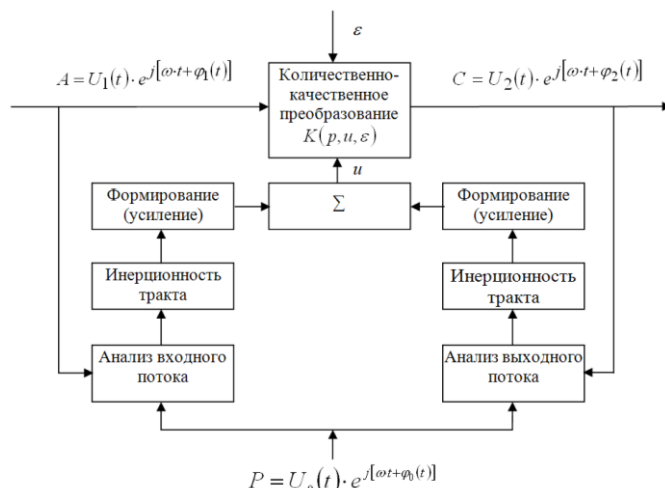


Рис. 2. Система управления технологическим процессом изготовления КВ

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Человек занимает одно из значимых мест в мире не потому, что он есть «вершина» эволюционного процесса, а потому что человек может стать фактором «направляемости» или «управляемости» развития, при этом направляя последнее в сторону повышения стабильности. А именно нестабильность техносферы способствует актуальности разработок всевозможных СУ. Представленная СУ предназначена в первую очередь на принятие мер по увеличению уровня роста производственного труда, снижению количества бракованной продукции, экономии материальных и трудовых ресурсов, оптимизации затрат на производство, тем самым является весомой на нынешнем этапе развития техносферы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Булкин В.В. Структурный анализ системы управления воздушным движением с точки зрения повышения безопасности в системе «человек-машина» / В.В. Булкин, Е.Н. Григорюк, А.Е. Лашин. - Изд. «НАУЧТЕХЛИТ-ИЗДАТ», 2013. – №12. – С. 1-7.
2. Курилов И.А. Принципы управления информационными потоками в технологических процессах / И.А. Курилов, Е.Н. Григорюк, М.В. Калинин, И.Н. Кириллов, А.Е. Лашин, В.В. Булкин // Методы и устройства передачи обработки информации. – 2013. – № 1. – С.13-18.
3. Батин В.А., Ховансков В.Н., Дудукин В.Н., Окишев О.И., Карачев Г.Н., Мушкаев А.К., Бибнев Н.М., Беляев В.В., Рудаков Е.В., Потриденный В.В., Савин А.П., Которов Н.Е. Неоржавляющий ударный состав // Патент России № 2106330 С06В. 1998.
4. Волков В.С., Бибнев Н.М., Веденеев М.Ф., Рыбцов В.В., Демидов В.А., Кузьмин С.А., Ховансков В.Н., Бабочкин С.Ю. Линия изготовления капсулей-воспламенителей // Патент России № 2436036. 2011.
5. Меркулов В.А., Авсеенко И.М., Киселев В.Н., Даниленко А.М., Меркулова С.А. Способ сборки капсулей-воспламенителей в устройство пресс-инструмента для его осуществления // Патент России № 2174668. 2000.
6. Коробчук М.В. Современное смесительное оборудование для приготовления многокомпонентных энергонасыщенных композиций / М.В. Коробчук, А.Н. Веригин, В.Г.



Джангирян, Д.В. Фадеев, И.А. Абдуллин // Вестник Казанского технического университета. – 2013. – Т. 16, № 4. – С. 240-243.

7. Открытое Акционерное Общество «Муромский Приборостроительный Завод» – URL: <http://mpzflame.ru/>

[primers.php](#) (дата обращения 03.09 2015)

8. Потапова Т.Б. Структурный анализ системы управления непрерывным замкнутым производством / Приборы и системы управления. – 1999. – №12. – С. 16-24.

# Control System of Technological Process of Manufacturing Products of the Type «BOXER»

Grigoryuk E.N.

Murom Institute of Vladimir State University

Murom, Russian Federation

[kat-grigoryuk@yandex.ru](mailto:kat-grigoryuk@yandex.ru)

*Abstract.* High level of process automation has a positive impact on the quality of the products and its quantitative coefficient. The report examines the technological production process of cartridge production. This sector of the economy is relevant in the current unfavorable situation in the World, uninterrupted production increases the potential of Russia's defense capability. Proposed control system. At the entrance to the system of material and energy resources. The Central (main) procedure SU and

the conversion process is the process of manufacturing products. The procedure of comparison of the SU – reference comparison with an ideal process. The output product meets the quality standards.

*Keywords:* complex technological process automated control system, primer-igniter, the structure of management.

# Прочность кулачковой муфты блокировки дифференциала грузовых автомобилей

Келлер А.В., Чернявский А.О.

Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[andreikeller@rambler.ru](mailto:andreikeller@rambler.ru), [a.o.cher@mail.ru](mailto:a.o.cher@mail.ru)

Вдовин Д.С.

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
г. Москва, Российская Федерация  
[vdovin@kamaz.ru](mailto:vdovin@kamaz.ru)

**Аннотация.** Блокировка дифференциала без остановки вращения колес может быть выполнена при помощи кулачковой муфты без механических синхронизирующих элементов. Для обеспечения прочности такой муфты разность угловых скоростей колес в момент включения не должна превышать определенной величины. Эта разность может быть обеспечена, например, системой управляемого раздельного торможения колес. Анализ прочности муфты рационально выполнять, комбинируя современные численные методы (метод конечных элементов), позволяющие достаточно точно учесть реальную геометрию деталей, и аналитические решения, дающие оценки напряжений в контактных зонах с большими градиентами. Требования к функционированию системы выравнивания скоростей колес перед блокировкой, найденные из условий прочности проектируемой для автомобиля КАМАЗ муфты, оказываются достаточно жесткими – разность угловых скоростей колес в момент включения блокировки не должна превышать 2,9 об/мин.

**Ключевые слова:** грузовой автомобиль, блокировка дифференциала, муфта, прочность.

Среди различных систем блокировки дифференциалов наибольшей простотой и наименьшими габаритами отличаются кулачковые муфты. Традиционно кулачковые муфты включаются и выключаются в ненагруженном состоянии – когда передача крутящего момента отсутствует. Для автомобиля это означает необходимость полного выравнивания угловых скоростей полуосей, соединяемых муфтой, перед включением. Самым простым способом такого выравнивания является полная остановка колес, однако задачи повышения проходимости требуют поиска путей включения блокировки дифференциала без остановки (например, при буксовании на подъеме). Особенно актуально – и особенно сложно – решение этой задачи для грузовых автомобилей, где большие силы инерции и передаваемые крутящие моменты предъявляют высокие требования к прочности деталей.

Работоспособность кулачковой муфты при действии ударных нагрузок, сопровождающих ее включение «на ходу», может быть обеспечена только при ограниченных величинах этих нагрузок, что соответствует ограниченным разностям угловых скоростей колес в момент включения. Технически это может быть обеспечено, например, системой торможения, раздельно регулирующей тормозные усилия на разные колеса, и связанной с ней системой включения муфты, срабатывающей только в соответствующие моменты времени. Допустимая разность угловых скоростей зависит от прочности деталей муфты; разработке методики определения этой зависимости и посвящена данная работа.

Пусть одно из колес моста движется без проскальзывания с угловой скоростью  $\omega_1$ , второе – буксует, вращаясь с угловой скоростью  $\omega_2$ . Исключая из рассмотрения равномерное движение, не влияющее на инерционные силы, получим следующую расчетную схему (рис.1, а): одно колесо неподвижно, второе вращается с угловой скоростью  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ .

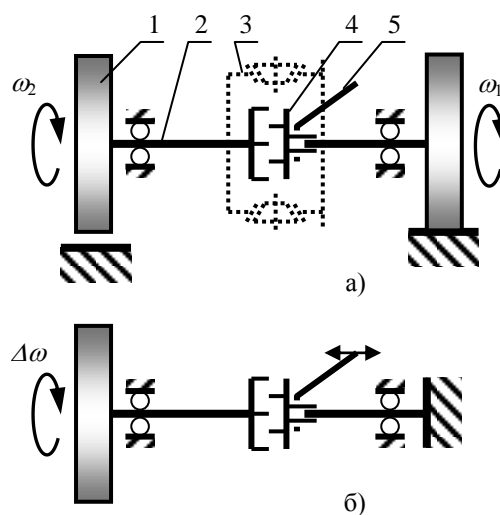


Рис. 1. Схема конструкции (а) и расчетная схема (б): 1 – колесо, 2 – полуось, 3 – дифференциал, 4 – муфта блокировки дифференциала, 5 – привод муфты

Примем следующие допущения:

- 1) Колеса будем рассматривать как жесткие массивные диски, податливость их, в том числе податливость шин, учитывать не будем (это дает ошибку в запас прочности);
- 2) Полуоси будем считать податливыми, но невесомыми (пренебрежем инерцией полуосей по сравнению с инерцией колес). Массой движущихся деталей дифференциала и муфты блокировки также пока будем пренебрегать. Связанная с этим предположением ошибка идет не в запас прочности, но она невелика и на начальном этапе анализа ей можно пренебречь;
- 3) Пренебрежем потерями энергии на трение в контакте буксующего колеса с грунтом за время включения муфты, считая это время малым. Пренебрежем также проскальзыванием 2-го (правого на рис. 1) колеса – если оно возникнет, это приведет к снижению динамических нагрузок (до 2 раз при полном отсутствии сцепления под правым колесом, как несложно показать).

Показанная на рис. 1, б расчетная схема соответствует известной в сопротивлении материалов схеме круглого удара, и максимальное значение динамического крутящего момента в полуосях определяется из закона сохранения энергии:

$$\frac{J \cdot (\Delta\omega)^2}{2} = \frac{T^2 \cdot 2 \cdot l}{2 \cdot G \cdot I} \quad (1)$$

Здесь  $J$  – массовый момент инерции колеса,  $\Delta\omega$  – угловая скорость перед включением муфты,  $T$  – крутящий момент,  $G$  – модуль сдвига материала полуоси,  $I$  – полярный момент инерции сечения полуоси,  $l$  – длина полуоси.

При расчете на прочность деталей муфты найденный момент  $T$  может быть применен к ним в статической постановке, поскольку периоды собственных колебаний системы «колесо – полуось» и деталей (кулачков, венцов) полумуфт различаются на несколько порядков. Замена динамической постановки статической существенно снижает трудоемкость расчета и, при использовании численных методов определения напряжений, позволяет повысить точность, давая возможность использовать более мелкие сетки.

Положение полумуфт в момент, когда возникают максимальные усилия, зависит от их положения перед началом включения, скорости привода включения, угловой скорости  $\Delta\omega$ . Если система включения не имеет датчиков положения колес (реагирует на угловые скорости, но не на углы поворота), то положение полумуфт в момент передачи максимального усилия является случайным. Обоснование прочности требует в этом случае рассмотрения наихудшего положения, которым является контакт кулачков муфты кромками (рис. 2). С учетом расположения конструкции в картере дифференциала и хорошей смазки угол  $\alpha$ , определяющий возможные направления контактных сил  $F_k$  (рис. 3), оказывается мал и может быть без больших погрешностей принят равным 0, а центры скруглений – располагаться на одной горизонтальной (на рис. 3) прямой.

При этом, как легко видеть, возникают опасные точки 2 типов: в зоне контакта и появления высоких контактных напряжений ( $A$ ) и в зоне концентрации напряжений у впадины зуба ( $B$ ).

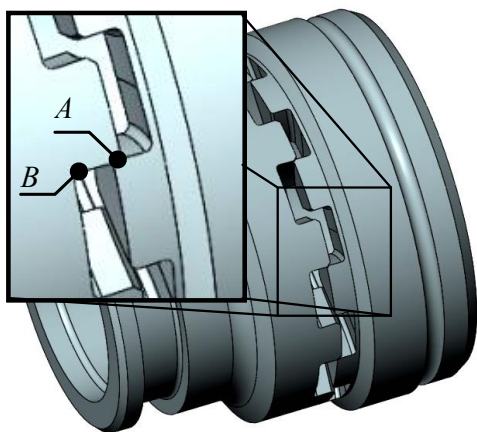


Рис. 2. Положение полумуфт в момент включения и опасные точки

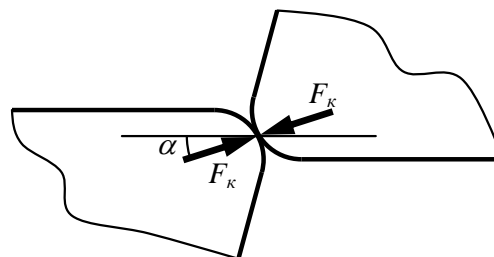


Рис. 3. Контактирующие кромки

Оценка контактных напряжений для подобных конструкций (зубья и кулачки полумуфт, зубья шестерен, ролики и т.п.) подробно разобрана в машиностроительной литературе – см., например, [1]. Литературные решения базируются на известном аналитическом решении Герца (контакт двух цилиндров с радиусами, равными радиусам скругления кромок) и дополняются рядом поправочных коэффициентов. Отметим, что применение современных численных методов в данной задаче, по-видимому, нецелесообразно – в силу двух причин. Во-первых, малая зона контакта приводит к большим градиентам напряжений, для адекватного описания которых нужна очень мелкая сетка конечных элементов. Исходя из традиционного требования «не менее 6...10 элементов на зону краевого эффекта» [2] и размера зоны контакта порядка 0,01 мм (радиус скругления кромок порядка 1 мм), получим требуемый размер конечных элементов порядка 0,001 мм, что делает размерность задачи неоправданно большой. Использование специальных технологий типа «числовой лупы» (применительно к контактной задаче – см., например, [3]) здесь не помогает получить точный ответ в силу второй причины: для справочных аналитических решений долгой практикой выработаны коэффициенты запаса прочности, которые учитывают такие трудно моделируемые особенности задачи, как остаточные напряжения вследствие изготовления деталей, неравномерность нагрузки по кулачкам при типичных технологических отклонениях размеров и т.п. Изменение метода расчета (переход от простых аналитических оценок к численным) должно сопровождаться соответствующим обоснованным изменением коэффициентов запаса, что не входило в рамки рассматриваемой работы.

Для точки  $B$  численная оценка напряжений, наоборот, полезна, поскольку позволяет – по сравнению с упрощенными справочными подходами – более точно учесть геометрию детали, приводящую, в частности, к неравномерному распределению напряжений по радиусу. При получении оценок напряжений с помощью метода конечных элементов (рис. 3) использовались традиционные приемы: циклическая симметрия (позволяющая за счет специальной записи граничных условий обойтись расчетом только одного из повторяющихся секторов конструкции), моделирование контактного взаимодействия, доказательство сходимости решения путем выполнения серии решений с уменьшающимся размером конечного элемента (при этом сходимость в зоне контакта не анализировалась и не обеспечивалась). Пример результатов расчетов показан на рис. 4.

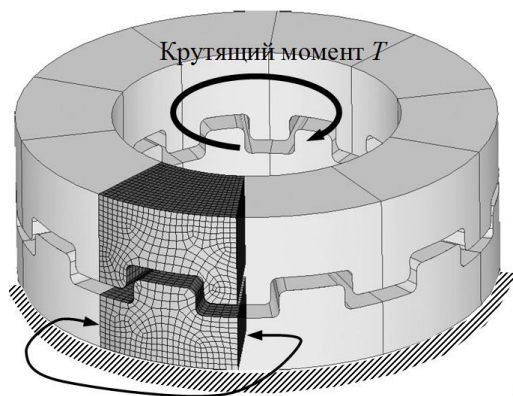


Рис. 3. Конечно-элементная модель. Стрелками показаны поверхности с условиями циклической симметрии. Для наглядности показана крупная сетка конечных элементов.

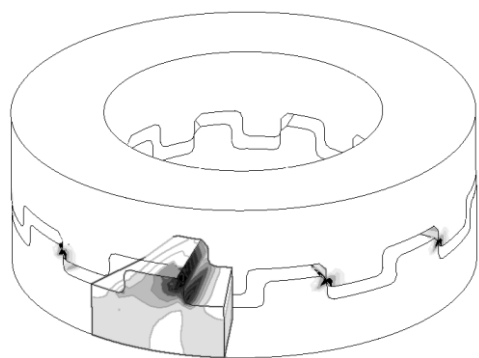


Рис. 4. Напряженное состояние нижней полумуфты. Темная закраска соответствует высоким напряжениям (расчет с помощью пакета ANSYS)

Работа муфты не может сопровождаться значительными пластическими деформациями, поэтому условия прочности могут быть записаны через напряжения:

$$\sigma_A^{\text{экв}} < [\sigma_A], \quad \sigma_B^{\text{экв}} < [\sigma_B], \quad (2)$$

где допускаемые напряжения в точках  $A$  и  $B$   $[\sigma_A]$  и  $[\sigma_B]$  различаются в силу различия коэффициентов запасов прочности для этих точек с разными напряженными состояниями. Поскольку действующие эквивалентные напряжения  $\sigma_A^{\text{экв}}$  и  $\sigma_B^{\text{экв}}$  зависят от приложенного крутящего момента  $T$ , комбинация условий (2) и формулы (1) позволяет получить ограничение на разность угловых скоростей колес перед включением муфты  $\Delta\omega$ .

В рамках предварительных работ по проекту, выполняемому совместно Южно-Уральским государственным университетом и научно-техническим центром КАМАЗ, были выполнены оценки допускаемой угловой скорости при числовых данных, соответствующих деталям заднего моста автомобиля КАМАЗ и спроектированной инженерами НТЦ КАМАЗ муфты (рис. 2). Как и следовало ожидать, лимитирующей оказалась контактная прочность (точка  $A$  на рис. 2). Условия прочности (2) для первоначально спроектированной муфты привели к очень жестким (трудно реализуемым на практике) ограничениям на разность угловых скоростей колес в момент включения блокировки –  $\Delta\omega < 0,7$  об/мин. Изменение материала муфты с первоначально заложенной в расчеты стали 40Х на гораздо менее технологичные ШХ15, У10 и т.п. не ис-

правляет положения, позволяя поднять ограничение лишь до 0,8 об/мин. Несколько более эффективно увеличение числа кулачков: при 14 кулачках (вместо первоначально принятых 10) ограничение поднимается до 1 об/мин, а при 16 – до 1,1 об/мин (дальнейшее увеличение числа кулачков неэффективно как в силу конструктивно-технологических причин, так и в силу роста напряжений в точке  $B$  – рис. 2). Наибольший выигрыш дает увеличение радиуса скругления кромки кулачка: при радиусе скругления 2 мм (вместо первоначально рассмотренного 0,9 мм) ограничение удается поднять до 2,9 об/мин.

#### Выводы

1. Существенное различие собственных частот системы «колесо – полуось» и системы «венцы муфты – кулачки» позволяют решать задачу прочности кулачков муфты в квазистатической постановке, определяя действующий на муфту момент в соответствии с известной схемой крутильного удара.

2. Для расчета напряжений в муфте рационально применить комбинацию подходов: аналитический расчет контактных напряжений и численный (МКЭ) расчет напряжений около впадины зуба. Применение метода конечных элементов обеспечивает достаточно точный учет реальной геометрии муфты, но в зоне контакта оно затруднено требованием мелкой сетки (с размерами элемента порядка 1 мкм, что связано с высокими градиентами напряжений в этой зоне).

3. При выбранной схеме и конструктивных ограничениях наибольшее влияние на прочность муфты оказывает радиус скругления кромки кулачка – этот радиус должен быть насколько возможно большим. Марка материала муфты влияет в гораздо меньшей степени. Рациональное число кулачков – 14...16.

4. Для обеспечения прочности муфты при найденных параметрах угловые скорости колес в момент включения муфты не должны различаться более чем на 2,9 об/мин.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта «Разработка научно-технических решений по управлению распределением мощности в трансмиссиях грузовых автомобилей для повышения их энергоэффективности и топливной экономичности» по соглашению № 14.574.21.0106 от 08.09.2014 г. между Министерством образования и науки Российской Федерации и исполнителем ПНИР - Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57414X0106.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. / Биргер И.А., Шорп Б.Ф., Иосилевич Г.Б. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
2. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 15.0 – Canonsburg, USA: SAS IP, Inc., 2013. – 988 p.
3. Kuznetsova N.B. Kinetics of accumulation of deformations and damages in the event of a cyclic rolling contact / N.B. Kuznetsova, A.O. Chernyavskii // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2009. – Vol. 38, № 1. – P. 87-90.



# Strength of a Claw Clutch, Blocking a Truck Inter-Wheel Differential

Keller A.V., Cherniavsky A.O.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian Federation

[andreikeller@rambler.ru](mailto:andreikeller@rambler.ru), [a.o.cher@mail.ru](mailto:a.o.cher@mail.ru)

Vdovin D.S.

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russian Federation

[vdovin@kamaz.ru](mailto:vdovin@kamaz.ru)

*Abstract.* A truck inter-wheel differential can be locked without stopping of the wheels rotation by a claw clutch without mechanical synchronizers. To ensure strength of the clutch, a difference between the angular velocities of the wheels must not exceed a certain value at the clutch turning on; this difference can be achieved, for example, by split braking system controlling the individual wheel angular speed. Efficient way of the clutch strength analysis is a combination of numerical methods (finite element method), accurately considering the actual part geome-

try, and analytic solutions that provide stress evaluation in contact zones with high gradients. It is shown that the clutch strength establishes strict requirements on the functioning of the system, controlling the wheel speeds difference: for KAMAZ truck at the moment of the clutch turning on the difference should not exceed 2.9 rpm.

*Keywords:* truck, differential lock, clutch, strength.

# Моделирование колесного транспортного средства 8×8 в программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел\*

Горелов В.А., Комиссаров А.И.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
г. Москва, Российская Федерация  
[gvas@mail.ru](mailto:gvas@mail.ru), [alexander\\_2@rambler.ru](mailto:alexander_2@rambler.ru)

Мирошниченко А.В.  
ОКБ «Техника»,  
г. Москва, Российская Федерация  
[avm179@yandex.ru](mailto:avm179@yandex.ru)

**Аннотация.** Разработана пространственная нелинейная динамическая модель колесного транспортного средства (КТС) 8×8. Модель КТС реализована в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм». Представлена модель взаимодействия шины с недеформируемым опорным основанием. Модель взаимодействия шины с опорным основанием реализована в пакете Matlab/Simulink. Апробирована технология подключения модели Matlab/Simulink к модели КТС в виде динамической библиотеки. На основе разработанной математической модели проведены исследования динамики КТС при различных режимах движения. Приведены результаты расчета для маневра «переставка 20 м», которые подтверждают адекватность физического поведения модели. Разработанная модель может применяться для оценки динамических свойств КТС на этапе проектирования в широком спектре режимов движения.

**Ключевые слова:** динамика автомобиля, имитационное моделирование, модель шины, программные комплексы автоматизированного моделирования динамики систем тел.

## ВВЕДЕНИЕ

Для достоверной оценки показателей основных эксплуатационных свойств колесных транспортных средств (КТС) на этапе проектирования требуется создание пространственных динамических моделей с учетом кинематики подвески и рулевого привода. Для многоосных КТС число тел модели может достигать нескольких десятков, что существенно усложняет аналитический вывод уравнений движения. Эффективным инструментом для решения данных задач являются программные комплексы автоматизированного анализа динамики систем тел [1-5]. В таких комплексах по описанию системы в виде набора твердых тел, шарниров и силовых взаимодействий из библиотеки типовых элементов производится автоматическое формирование уравнений движения, и имеются встроенные средства для их численного решения. Кроме того, большинство таких комплексов позволяют подключать пользовательские модели силовых взаимодействий в виде динамических библиотек.

В данной работе решается задача создания динамической модели для определения основных эксплуатационных свойств многоосного КТС в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм» с подключением специально разработанной модели взаимодействия шины с недеформируемым опорным основанием, реализованной в модуле Simulink пакета Matlab.

## МОДЕЛЬ КТС

В качестве объекта исследования рассматривается КТС полной массой 36 т с колесной формулой 8x8, формулой рулевого управления 12-00 и независимой подвеской всех колес на сдвоенных поперечных рычагах с пневмогидравлической рессорой (ПГР). Модель КТС состоит из подсистем, показанных на рис. 1. Модели тормозной системы и моторно-трансмиссионной установки (МТУ) описываются непосредственно в модели машины в сборе.

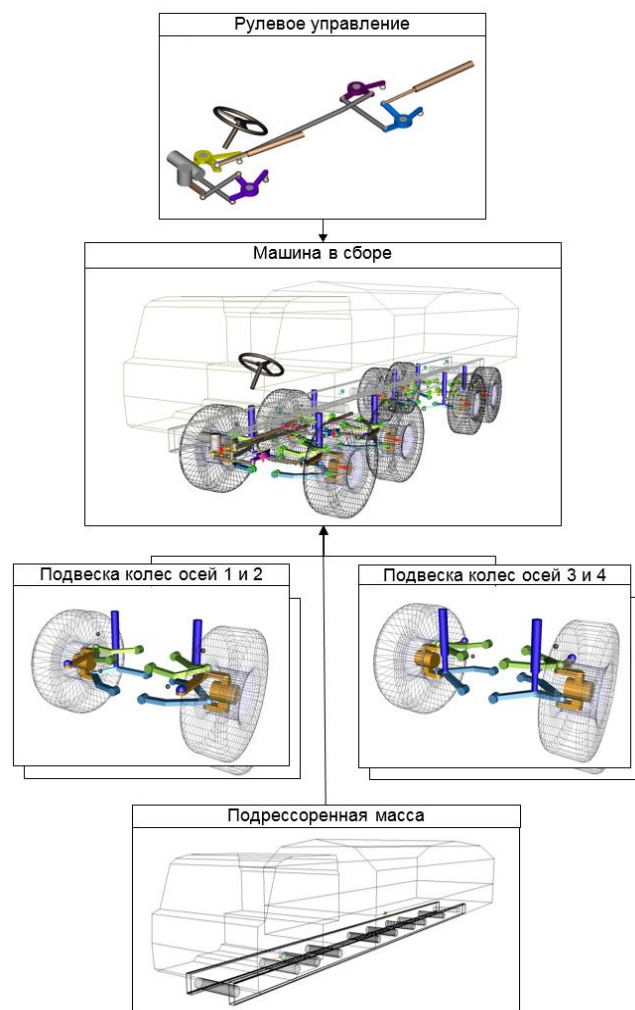


Рис. 1. Структура модели колесного транспортного средства (КТС) 8×8

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора №9905/17/07-к-12 между ОАО «КАМАЗ» и «Московским государственным техническим университетом имени Н.Э. Баумана»

Модель подрессоренной части состоит из невесомой геометрической модели и массово-инерционной модели, задаваемой в виде точечной массы и тензора инерции.

Направляющий аппарат подвесок и рулевой привод моделируются в виде набора твердых тел, связанных идеальными шарнирами и силовыми элементами. Массы тел подвесок и рулевого привода задаются в виде параметров, а моменты инерции вычисляются по геометрическим моделям.

ПГР представлена в модели виде параллельно работающих пружины и демпфера с таблично задаваемыми характеристиками. Гидравлические связи между ПГР отсутствуют.

Модель тормозной системы распределяет суммарный тормозной момент, формируемый по управляющему сигналу тормозной системы, между колесами КТС в заданном постоянном соотношении. Модель МТУ распределяет момент двигателя, формируемый по заданному управляющему сигналу, поровну между всеми колесами КТС, что соответствует полностью дифференциальной схеме привода. Для различных видов испытаний используются две разных модели МТУ. Для испытаний с поддержанием постоянной продольной скорости ТС создана модель МТУ с двигателем постоянной мощности и постоянным передаточным числом трансмиссии. Для оценки динамики разгона ТС разработана модель МТУ с аналитическим заданием внешней характеристики двигателя внутреннего сгорания и переменным передаточным числом трансмиссии.

#### Модель взаимодействия шины с дорогой

Вычисление сил и моментов, действующих на колесо со стороны опорной поверхности, производится при помощи модели шины, реализованной в пакете Matlab/Simulink и скомпилированной в подключаемую динамическую библиотеку Tire.dll. Схема совместной работы модели шины и модели динамики колеса ПК «Универсальный механизм» приведена на рис. 2.

Из модели динамики колеса в модель шины передаются кинематические параметры колеса, а вычисленные на

их основе силы и моменты поступают в модель динамики колеса. В моделях используются следующие системы координат (см. рис. 2):

- полусвязанная система координат (ПСК) колеса  $OXYZ$  – подвижная прямоугольная система координат с началом в центре колеса, ось  $Z$  перпендикулярна плоскости дороги, ось  $X$  перпендикулярна оси вращения колеса;
- неподвижная система координат (НСК) дороги  $O_r X_r Y_r Z_r$  – неподвижная прямоугольная система координат, связанная с дорогой.

Передаваемые кинематические параметры включают: радиус-вектор  $\vec{\rho}_O$  центра колеса в проекциях на оси НСК, проекции  $V_x, V_y, V_z$  скорости центра колеса на оси ПСК колеса, проекции  $\omega_x, \omega_y$  угловой скорости колеса на оси СК колеса и угол  $\gamma$  поперечного наклона (развала) колеса.

Схема модели взаимодействия шины с твердым опорным основанием показана на рис. 3.

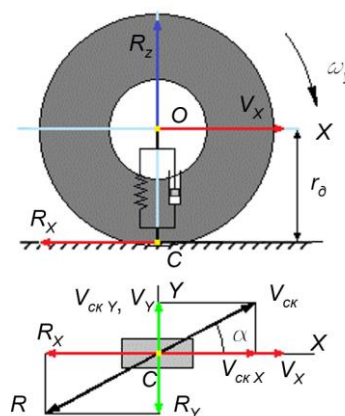


Рис. 3. Модель взаимодействия шины с дорогой

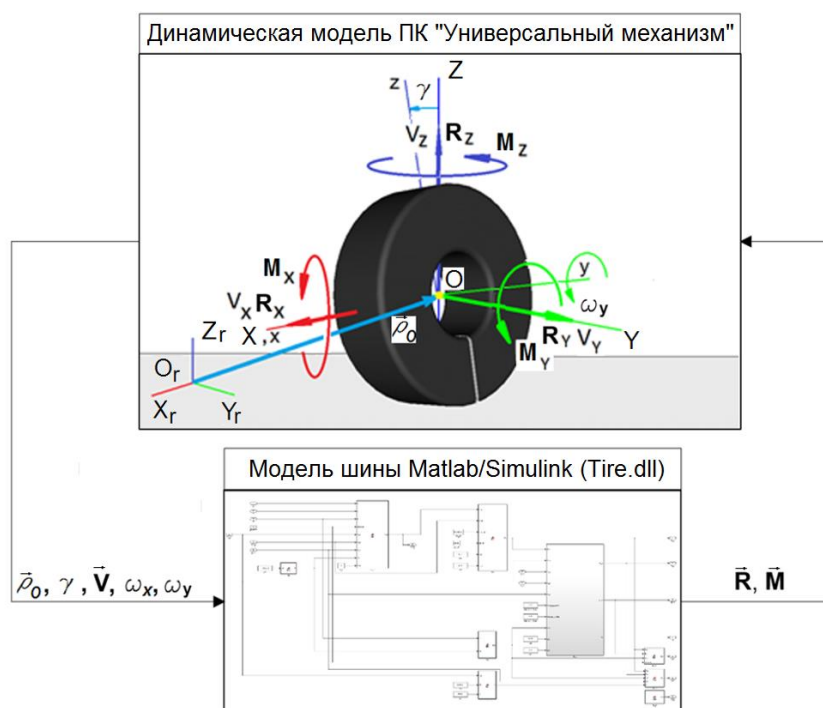


Рис. 2. Взаимодействие динамической модели ПК «Универсальный Механизм» и модели шины Matlab/Simulink

Вертикальная реакция вычисляется по упруго-вязкой модели:

$$R_Z = P_{z\_st} \cdot \left( \frac{h_z}{h_{z\_st}} \right)^{1.5} - b_z \cdot V_Z,$$

где  $P_{z\_st}$  – статическая нагрузка на колесо,  $h_{z\_st}$  – статический прогиб шины;  $b_z$  – коэффициент линейно-вязкого сопротивления шины в вертикальном направлении;  $h_z$  – нормальный прогиб шины

$$h_z = \min(0, r_0 \cdot \cos(\gamma) - r_d),$$

где  $r_0$  – свободный радиус колеса;  $r_d$  – динамический радиус колеса, равный проекции радиус-вектора центра колеса на вертикальную ось НСК.

Величину силы в плоскости дороги определяют по зависимости [6, 7]

$$R = \mu_s(S_k) \cdot R_Z,$$

где  $S_k$  – коэффициент скольжения;  $\mu_s(S_k)$  – коэффициент взаимодействия движителя с опорным основанием.

Для связных грунтов справедливо следующее выражение для  $\mu_s(S_k)$ , [8, 9]

$$\mu_s(S_k) = \mu_{s\alpha\max} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{S_k}{S_0}} \right) \cdot \left( 1 + e^{-\frac{S_k}{S_1}} \right),$$

где  $S_0, S_1$  – константы, определяющие форму кривой;  $\mu_{s\alpha\max}$  – коэффициент взаимодействия при полном скольжении в контакте шина – дорога

$$\mu_{s\alpha\max} = \frac{\mu_{sx\max} \cdot \mu_{sy\max}}{\sqrt{\mu_{sx\max}^2 \cdot \sin^2 \alpha + \mu_{sy\max}^2 \cdot \cos^2 \alpha}},$$

где  $\mu_{sx\max}, \mu_{sy\max}$  – параметры эллипса трения (см. рис. 4).

Коэффициент  $S_k$  определяется по формуле:

$$S_k = \frac{V_{ск}}{\omega_y \cdot r_{кc}},$$

где  $r_{кc}$  – радиус качения колеса в свободном режиме [10]

$$r_{кc} = \frac{3 \cdot r_d}{1 + \frac{2 \cdot r_d}{r_0}}$$

$V_{ск}$  – скорость скольжения, определяемая как:

$$\begin{aligned} V_{ск} &= \sqrt{V_{скX}^2 + V_{скY}^2} \\ V_{скY} &= V_Y - \omega_x \cdot r_d; \\ V_{скX} &= V_X - \omega_y \cdot r_{кc}. \end{aligned}$$

Вектор  $\vec{R}$  силы взаимодействия шины с опорной поверхностью направлен противоположно вектору скорости скольжения  $\vec{V}_{ск}$ . Угол  $\alpha$  поворота вектора скорости скольжения относительно оси X ПСК колеса, определяется следующими выражениями:

$$\sin \alpha = \frac{V_{скY}}{V_{ск}}; \quad \cos \alpha = \frac{V_{скX}}{V_{ск}};$$

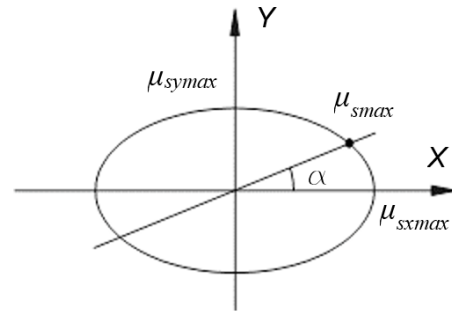


Рис. 4. Эллипс трения

Проекции вектора силы, действующей в плоскости дороги, на оси ПСК колеса рассчитываются следующим образом

$$R_X = -R \cdot \cos \alpha; \quad R_Y = -R \cdot \sin \alpha.$$

Моменты, действующие на колесо вычисляются следующим образом

$$M_X = R_Y \cdot r_d - R_Z \cdot r_d \cdot \frac{\sin(\gamma)}{\cos(\gamma)};$$

$$M_Y = -R_X \cdot r_d + M_f;$$

$$M_Z = 0;$$

где  $M_f$  – момент сопротивления качению колеса, определяемый по формуле:

$$M_f = -R_Z \cdot r'_k \cdot f \cdot \text{sign}(\omega_y),$$

$f$  – коэффициент сопротивления качению:

$$f = f_0 + k_f \cdot (V_X)^2,$$

$f_0$  – коэффициент сопротивления качению при малой скорости (около 5 км/ч),  $k_f$  – коэффициент роста сопротивления качению с увеличением скорости;  $r'_k$  – радиус качения колеса без скольжения:

$$r'_k = r_{кc} - \lambda_p \cdot P_x,$$

где  $\lambda_p$  – коэффициент тангенциальной эластичности шины;  $P_x$  – сила тяги колеса.

#### ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ КТС

Для проверки модели по ней проведены расчеты динамического поведения КТС при различных режимах движения.

На рис. 5, а-в показаны графики параметров движения, полученные при моделировании маневра «переставка 20 м» в соответствии со стандартом [11] при предельно возможной по условию отрыва колес от дороги скорости 40 км/ч. На рис. 6 приведены кадры анимации для характерных положений КТС.

Довольно низкая для данной категории КТС предельная скорость выполнения маневра «переставка 20 м» объясняется отсутствием конструктивных мероприятий по стабилизации поперечного крена кузова (отсутствием гидробалансирных связей между гидроцилиндрами ПГР подвесок колес). Это косвенно подтверждается большими углами крена кузова при выполнении маневра (см рис. 5, а).

Полученные результаты расчета для маневра «переставка 20 м» свидетельствуют об адекватном физическом поведении модели.



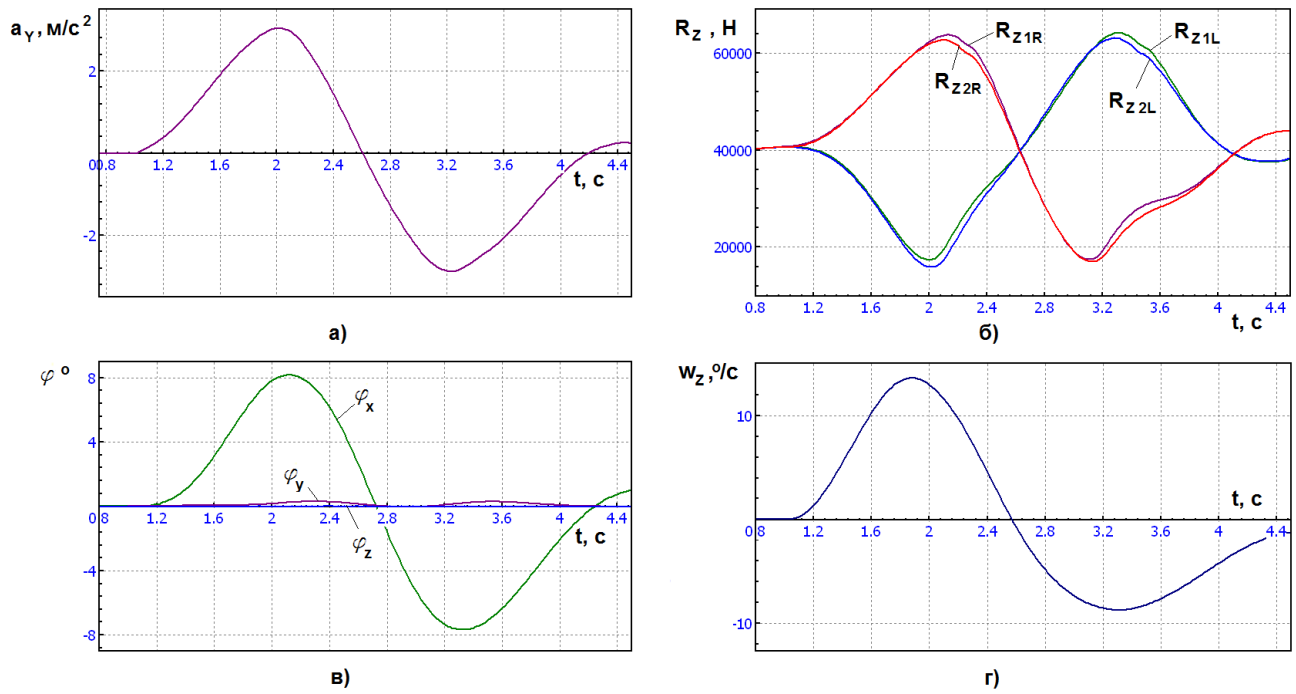


Рис. 5. Графики параметров движения КТС полученные при моделировании маневра «переставка 20 м» для скорости 40 км/ч:  
 а) – боковое ускорение центра масс поддрессоренной части КТС;  
 б) –вертикальные реакции шин управляемых колес (L –левого борта; R – правого борта)

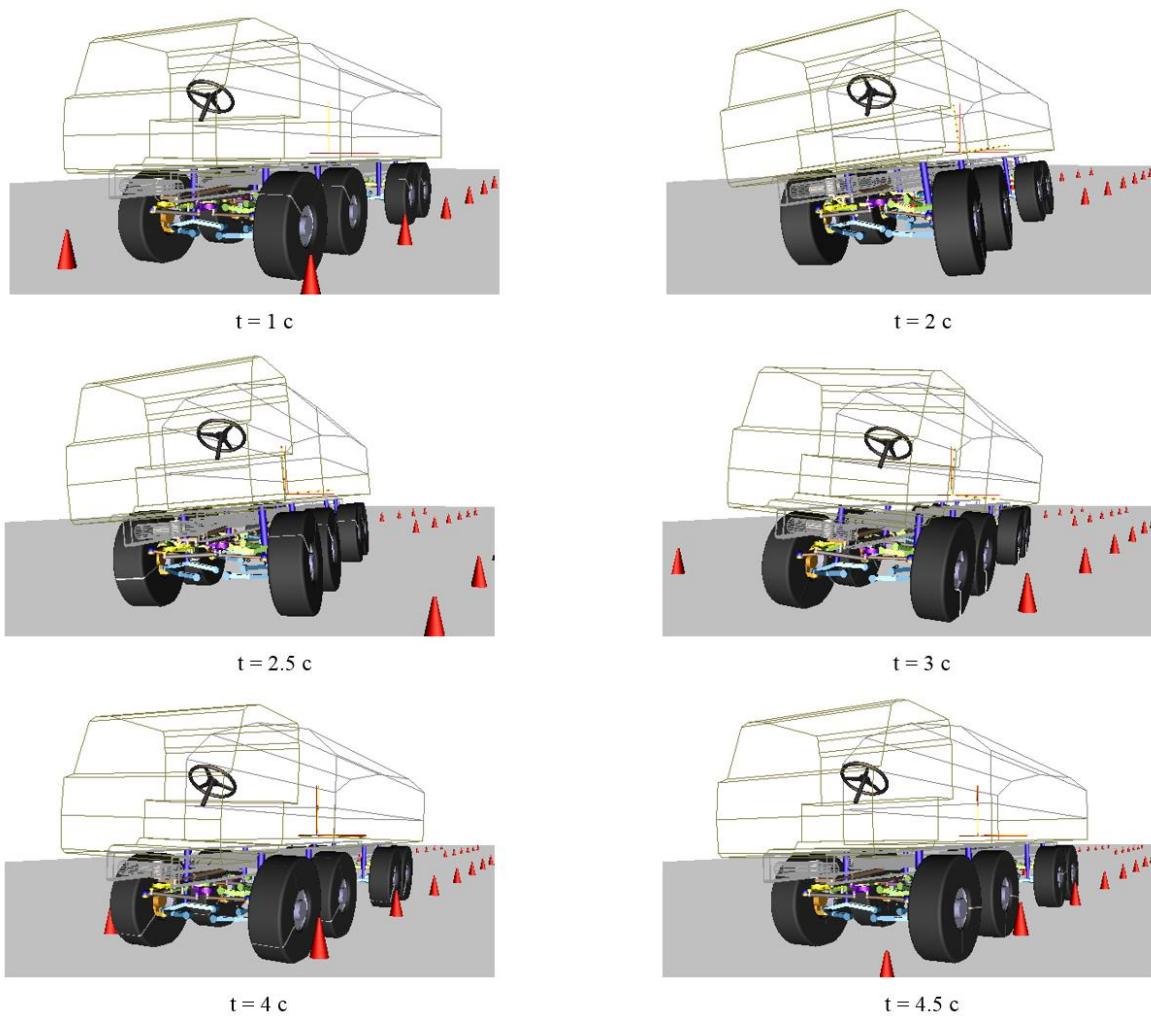


Рис. 5. Кадры характерных положений КТС, полученные при моделировании маневра «переставка 20 м» для скорости 40 км/ч

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение программного комплекса автоматизированного моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм» позволило создать пространственную нелинейную динамическую модель многоосного КТС с подключением специально созданной модели взаимодействия шины с поверхностью дороги, реализованной в модуле Simulink пакета Matlab.

Разработанная модель обеспечивает возможность оценки параметров управляемости и устойчивости, тяговой и тормозной динамики КТС при помощи численного моделирования типовых испытаний на ранних этапах проектирования до создания первых образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blundell M. The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics / M. Blundell, D. Harty. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 518 p.
2. <http://www.umlab.ru> (дата обращения 01.09.2015).
3. <http://www.euler.ru> (дата обращения 01.09.2015).
4. <http://www.simpack.com> (дата обращения 01.09.2015).
5. <http://www.mscsoftware.com/product/adams> (дата обращения 01.09.2015).
6. Рождественский Ю.Л. О формировании реакций при качении упругого колеса по недеформируемому основа-

нию / Рождественский Ю.Л., Машков К.Ю // Труды МВТУ. – 1982. – № 390. – С. 56-64.

7. Дик А.Б. Расчет стационарных и нестационарных характеристик тормозящего колеса при движении с уводом: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 1988. – 228 с.

8. Марохин С.М. Прогнозирование характеристик криволинейного движения спецавтомобиля при выполнении типовых маневров, соответствующих натурным испытаниям на устойчивость и управляемость. / Марохин С.М. Котиев Г.О., Ергин А.А. // Известия Академии инженерных наук РФ им. акад. А.М. Прохорова. Транспортно-технологические машины и комплексы. – М.-Н.Новгород: НГТУ, 2003. – Т. 5. – С. 26-35.

9. Марохин С.М. Прогнозирование характеристик подвижности спецавтомобиля, оснащенного системами активной безопасности: автореф. дисс. канд. техн. наук. – М., 2005. – 16 с.

10. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.

11. ГОСТ 31507-2012 Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний.

## 8×8 Wheeled Vehicle Modeling in a Multibody Dynamics Simulation Software

Gorelov V.A., Komissarov A.I.

Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russian Federation  
[gvas@mail.ru](mailto:gvas@mail.ru), [alexander\\_2@rambler.ru](mailto:alexander_2@rambler.ru)

Miroshnichenko A.V.

ОКБ «Техника»,  
Moscow, Russian Federation  
[avm179@yandex.ru](mailto:avm179@yandex.ru)

**Abstract:** The article discloses a three-dimensional non-linear dynamic model of a 8×8 wheeled vehicle. The authors used the “Universal Mechanism” MBS software for building the model. The article also presents a tire – rigid terrain interaction model built in Matlab/Simulink. The authors tested the process of linking a Matlab/Simulink DLL to the vehicle MBS model. The authors used the developed model for analysis of the wheeled vehicle dynamical behavior at different operation conditions. The article contains results of the lane change test simulation. The simulation results confirmed validity of the model. The developed

model allows estimation of the dynamic behavior of the wheeled vehicle at various operation conditions at the design stage.

**Keywords:** vehicle dynamics, simulation, tire model, multi-body dynamics simulation software.

# Расчеты электрических цепей с помощью метода сопряженных градиентов

Бурцев Ю.А.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
г. Новочеркасск, Российская Федерация

[proton36@yandex.ru](mailto:proton36@yandex.ru)

**Аннотация.** Задачи расчета электрических цепей известны давно. Однако качество и скорость их решения оставляют желать лучшего, особенно для нелинейных цепей. Предложенный метод расчета основан на табличной форме записи уравнений электрических цепей. Дифференциально-алгебраические системы уравнений электрических цепей приводятся к системам линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) методом конечных разностей. При этом важно, что СЛАУ решаются методом сопряженных градиентов (МСГ), хорошо приспособленным к системам с разреженными матрицами. Решение СЛАУ на предыдущем шаге по времени служит хорошим начальным приближением для решения на текущем шаге, поэтому МСГ сокращает вычисления, обрабатывая типично 20-40% алгоритма. Возможность применения МСГ для решения СЛАУ со знаконеопределенными матрицами доказана численными экспериментами. Предложен способ ускорения решения СЛАУ электрических цепей. Он отличается от метода узловых потенциалов тем, что СЛАУ цепи не формируется в явном виде. Дано сравнение программы «Электроскоп» на основе описанного метода с программами PSIM и Fastmean. «Электроскоп» лидирует по качеству и скорости расчета тестовых цепей.

**Ключевые слова:** электрические цепи, табличная форма, метод сопряженных градиентов, знаконеопределенные матрицы, ускорение счета.

## ВВЕДЕНИЕ

Задачи расчета электрических цепей и методы их решения известны давно. Но качество и скорость счета существующих компьютерных программ для расчета электрических цепей оставляют желать лучшего, особенно для нелинейных цепей. Например, в статье [1] показано, что программы Micro-Cap 10.8.0, Multisim 10.0.144 и PSpice 9.1 дают решения с дефектами и к тому же работают значительно медленнее, чем программы «Электроскоп», Fastmean 5.2 и PSIM 9.0. Программа Micro-Cap не допускает контуров, образованных из «элементов, определяемых напряжением» – источников напряжения или индуктивностей, а также из соединений этих элементов. Программы Multisim, PSpice и Micro-Cap не допускают наличия узлов, не имеющих связи по постоянному току с заземленным базовым узлом.

Готовые программы для расчета электрических и магнитных цепей не могут покрыть все потребности инженерных расчетов, так как новая техника нередко содержит оригинальные компоненты и взаимосвязи, не предусмотренные создателями программных продуктов.

В цифровой и в силовой электронике преобладают цепи с переключающими и нелинейными элементами, сопротивление которых меняется на несколько порядков.

Сложными элементами электрических цепей являются также нелинейные индуктивности электрических машин, которые к тому же зависят от времени вследствие вращения ротора. Существующие методы расчета электрических цепей либо сложны и громоздки, либо имеют существенные ограничения и не обладают универсальностью. Поэтому важной задачей является разработка алгоритмов и программ, позволяющих эффективно рассчитывать электрические цепи для проектирования современной техники.

## РАСЧЕТ РЕЗИСТИВНЫХ ЦЕПЕЙ

Распространенные на практике методы расчета цепей обычно представляют собой варианты метода узловых потенциалов. Однако для этого метода расчет цепей с магнитными связями представляет проблемы. Системы уравнений для цепей с большим разбросом сопротивлений получаются плохо обусловленными. Между тем именно такие цепи часто встречаются в инженерной практике – например, сопротивления закрытых и открытых полупроводниковых приборов различаются на несколько порядков.

Так называемая табличная форма уравнений электрических цепей обладает рядом преимуществ [2, 3], из которых главными являются простота и универсальность. Обычно в табличной форме уравнений присутствуют и напряжения ветвей, и потенциалы узлов. Однако напряжения легко выразить через потенциалы и удалить из системы уравнений. Тогда для резистивной цепи система уравнений может быть записана в виде

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{R} & \mathbf{K}^T \\ \mathbf{K} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \boldsymbol{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{j} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{R}$  – диагональная матрица сопротивлений ветвей;  $\mathbf{K}$  – матрица инцидентности графа цепи без строки и столбца, соответствующих узлу с нулевым потенциалом;  $\mathbf{0}$  – нулевая подматрица;  $\mathbf{i}$  – вектор токов цепи;  $\boldsymbol{\varphi}$  – вектор узловых потенциалов цепи;  $\mathbf{e}$  – вектор источников Э.Д.С. ветвей;  $\mathbf{j}$  – вектор источников тока. Обозначим матрицу системы (1) буквой  $\mathbf{A}$ .

По сравнению с матрицей метода узловых потенциалов она в несколько раз больше. Однако она очень сильно разрежена и не требует для своего формирования никаких вычислений. Ее структура настолько проста, что ее можно вообще не хранить в памяти компьютера в явном виде, достаточно для каждого элемента цепи знать номера узлов, к которым он подключен. Например, для цепи, показанной на рис. 1, система уравнений будет выглядеть так:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_3 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_4 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ j_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Принципиально важно, что структура матрицы **A** позволяет использовать метод сопряженных градиентов (МСГ) [4-12], весьма эффективный для решения систем уравнений с разреженными матрицами. Этот метод не изменяет матрицу системы уравнений, что в полной мере позволяет использовать ее разреженность. МСГ использует многократное умножение векторов на матрицу системы уравнений и скалярное умножение векторов. Умножение на матрицу **A** требует всего *N* арифметических умножений и *4N* сложений, где *N* – число ветвей цепи.

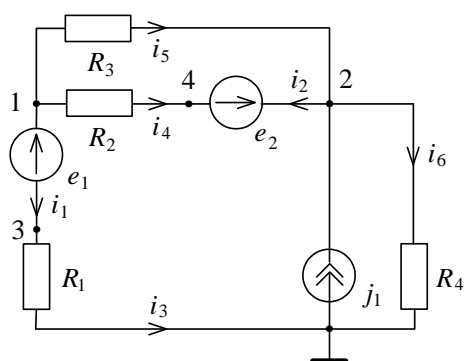


Рис. 1. Схема электрической цепи

МСГ удобен еще и по той причине, что напряжения и токи электрической цепи являются непрерывными или кусочно-непрерывными функциями. Поэтому состояние цепи на предыдущем шаге обычно является хорошим начальным приближением для расчета состояния в текущий момент времени и требует малого количества итераций – типично 20-40% от числа уравнений системы (1). Кроме того, МСГ позволяет очень просто организовать параллельные вычисления.

В математической литературе (например, [4-12]) при описании МСГ предполагается симметрия и положительная определенность матрицы системы уравнений. Матрица **A** симметричная, но знаконеопределенная. Однако в ходе большого числа численных экспериментов не удалось выявить ни одного случая, когда этот метод не давал бы верного решения системы линейных уравнений с матрицей **A**.

Исследования показали, что вероятность отказа МСГ при решении системы уравнений с симметричной знаконеопределенной матрицей ничтожно мала, хотя и не равна нулю. Практически, только специальное конструирование особого случая позволяет получить отказ МСГ из-за критически малого значения знаменателя (**As<sub>k</sub>**, **s<sub>k</sub>**) в одной из формул МСГ, здесь **s<sub>k</sub>** – «вектор направления» в алгоритме МСГ. Если даже отказ метода случится, он может быть легко и быстро выявлен и исправлен в компьютерной про-

грамме – достаточно взять для решения соответствующей системы уравнений другое начальное приближение.

Вырожденность матрицы также не мешает использованию МСГ. Это показывают расчеты электрических цепей, в которых подматрица **K** являлась полной матрицей инцидентности графа цепи (включала все узлы), а также расчеты цепей, разделенных на изолированные части («плавающими» потенциалами). Цепи, состоящие из отдельных частей, представляют один из двух случаев топологического вырождения. Важно, что цепи на грани такого вырождения часто возникают на практике. Например, при работе диодного выпрямителя на нагрузку, параллельно которой подключен конденсатор, периодически закрываются все диоды выпрямителя и отделяют своими большими сопротивлениями источник от нагрузки.

Опишем применение предложенного метода для расчета нелинейных цепей. Пусть задано некоторое начальное приближение для токов ветвей и потенциалов узлов цепи. Рассчитаем по ним статические сопротивления нелинейных ветвей и подставим их в систему (1). Решив ее, получим следующее приближение токов и потенциалов. Далее будем повторять процесс до тех пор, пока не найдем решение с требуемой точностью. Такой практический способ расчета нелинейных цепей известен в электротехнике и кратко изложен, например, в книге [13]. В математической литературе такой метод решения нелинейных уравнений называется «метод ложного положения», «метод линейной интерполяции», или «regula falsi».

Для большого количества расчетов, проведенных для различных цепей с диодами, тиристорами, транзисторами и нелинейными индуктивностями, описанный выше процесс последовательных приближений всегда сходился не более чем за три итерации. Как показано ниже, наиболее популярный метод Ньютона-Рафсона дает частые сбои даже для простых цепей.

#### РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ С РЕАКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Системы уравнений электрических цепей с реактивными элементами являются дифференциально-алгебраическими. Метод конечных разностей [6] позволяет преобразовать дифференциальные уравнения в алгебраические. Если не рассчитывать длительные переходные процессы в цепях с высокой добротностью, то трехточечной «формулы дифференцирования назад» в большинстве случаев вполне хватает для обеспечения инженерной точности. Например, вычисленная по трехточечному шаблону, производная тока катушки в момент *t* имеет вид:

$$i'_L(t) \approx \frac{i_L(t - 2\Delta t) - 4i_L(t - \Delta t) + 3i_L(t)}{2\Delta t}, \quad (2)$$

где *i<sub>L</sub>* – ток катушки, *t* – время,  $\Delta t$  – шаг по времени.

Производную напряжения конденсатора в конечно-разностной форме получим аналогично формуле (2), с учетом того что

$$u_C(t) = \varphi_{C1}(t) - \varphi_{C2}(t),$$

найдем:

$$u'_C(t) \approx \frac{u_C(t - 2\Delta t) - 4u_C(t - \Delta t) + 3u_C(t)}{2\Delta t} = \frac{[\varphi_{C1}(t - 2\Delta t) - \varphi_{C1}(t - \Delta t) - 4(\varphi_{C1}(t - \Delta t) - \varphi_{C2}(t - \Delta t)) + 3(\varphi_{C1}(t) - \varphi_{C2}(t))]/2\Delta t}{}, \quad (3)$$

где *u<sub>C</sub>* – напряжение конденсатора,  $\varphi_{C1}$ ,  $\varphi_{C2}$  – потенциалы узлов, к которым подключен конденсатор.



Подставив выражения (2) и (3) в уравнения катушек и конденсаторов, получим уравнения, аналогичные уравнениям резистивных ветвей:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{3L}{2\Delta t} i_L(t) + \varphi_{L1}(t) - \varphi_{L2}(t) = \\
 & = \frac{L}{2\Delta t} [i_L(t - 2\Delta t) - 4i_L(t - \Delta t)], \quad (4) \\
 & -\frac{2\Delta t}{3C} i_C(t) + \varphi_{C1}(t) - \varphi_{C2}(t) = \\
 & = -\frac{1}{3} (\varphi_{C1}(t - 2\Delta t) - \varphi_{C2}(t - 2\Delta t)) + \\
 & + \frac{4}{3} (\varphi_{C1}(t - \Delta t) - \varphi_{C2}(t - \Delta t)), \quad (5)
 \end{aligned}$$

где  $L$  – индуктивность катушки,  $C$  – емкость конденсатора,  $i_C$  – ток конденсатора,  $\varphi_{L1}$ ,  $\varphi_{L2}$  – потенциалы узлов, к которым подключена катушка.

Уравнения вида (4), (5) позволяют представить систему уравнений электрической цепи с реактивными элементами в виде системы вида (1) для соответствующей резистивной цепи и решать ее МСГ на каждом шаге по времени. Коэффициенты при токе в уравнениях (4), (5) играют роль резистивных квазисопротивлений. Введение магнитных связей лишь нарушает диагональность подматрицы  $\mathbf{R}$ , ничего не изменяя по существу.

При расчетах цепей с зависящими от времени (в том числе нелинейными) реактивными элементами индуктивности и емкости удобно считать дифференциальными параметрами, вычисленными в заданной точке кулон-вольтной или вебер-амперной характеристики:

$$\mathbf{C} = \frac{dq}{du}, \quad \mathbf{L} = \frac{d\Psi}{di}.$$

Тогда в дифференциальных уравнениях конденсаторов и катушек не присутствуют производные от переменных параметров  $C$  и  $L$ , уравнения сохраняют обычную форму:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}, \quad u = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt}.$$

Если же емкость и индуктивность понимать как статические параметры

$$\mathbf{C} = \frac{q}{u}, \quad \mathbf{L} = \frac{\Psi}{i},$$

то их производные также должны войти в уравнения, что придает расчетам излишнюю сложность.

#### УСКОРЕНИЕ РАСЧЕТОВ ПОДСТАНОВКАМИ

В случае, когда матрица  $\mathbf{R}$  диагональная и не содержит очень малых сопротивлений, умножение вектора на матрицу  $\mathbf{A}$ , необходимое при использовании МСГ, может выполняться в два этапа. Вначале находим фиктивные токи, обусловленные напряжениями ветвей без учета источников:

$$\mathbf{i}_0 = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{K}^T \boldsymbol{\varphi}.$$

Затем подставляем эти токи в уравнения первого закона Кирхгофа, находим вектор

$$\boldsymbol{\varphi}_0 = \mathbf{K} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{K}^T \boldsymbol{\varphi}.$$

Правая часть системы уравнений (1) предварительно должна быть приведена к виду

$$[\mathbf{0} \quad \mathbf{j} + \mathbf{K} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{e}]^T,$$

что соответствует преобразованию источников ЭДС в источники тока. При этом только вектор потенциалов  $\boldsymbol{\varphi}$  находится из решения системы уравнений, что сокращает число неизвестных по сравнению с непосредственным

решением системы (1). Токи ветвей вычисляются после решения системы как

$$\mathbf{i} = \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{K}^T \boldsymbol{\varphi} + \mathbf{e}).$$

Описанная процедура отличается от метода узловых потенциалов в основном тем, что матрица и правая часть системы уравнений не вычисляются явным образом. Это позволяет существенно сократить вычисления и время счета. Разработан и проверен также вариант подстановок токов при наличии малых и нулевых сопротивлений, а также магнитных связей. Кроме того, время счета можно сократить путем ликвидации ветвей, состоящих только из идеальных источников ЭДС, с помощью переноса источников ЭДС через узлы (редукция ЭДС).

#### СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММ

На рис. 2, рис. 3 показаны тестовые цепи, на которых проводилось сравнение программы «Электроскоп», созданной на основе описанного выше метода, с двумя наиболее качественными и быстрыми программами из рассмотренных в статье [1] – с американской программой PSIM Professional Version 9.0.3.400 и российской программой Fastmean версия 5.2 (сборка Oct 30 2012/08:38:55).

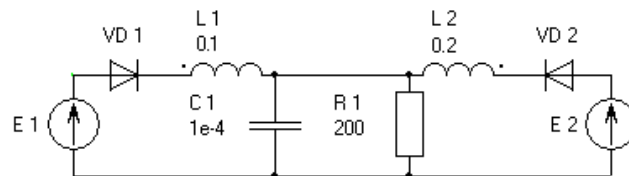


Рис. 2. Тестовая цепь № 1

(источники дают меандр скважностью 0,5 с напряжением от -10 до +10 В, частоты источников ЭДС 50 и 111 Гц)

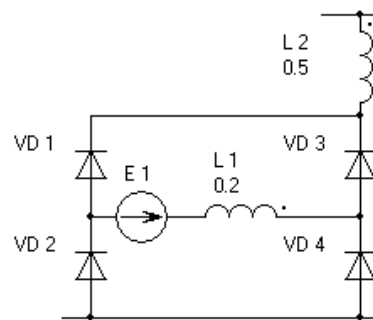


Рис. 3. Фрагмент тестовой цепи № 2.

(цепь состоит из семи таких секций, включенных параллельно к резистору сопротивлением 10 Ом, все источники ЭДС дают меандр скважностью 0,5 с напряжением от -400 до +400 В, частоты источников ЭДС: 10,1; 10,3; 10,7; 10,9; 11,3; 12,7 и 13,1 кГц)

Программа «Электроскоп» работает только с нелинейными ВАХ диодов. Программы PSIM и Fastmean могут использовать простейшие линейные модели диодов, или же настоящие нелинейные ВАХ. В табл. 1 и 2 показано время счета для различных шагов по времени (во всех программах используется фиксированный шаг).

Для обозначения вариантов программы «Электроскоп» использованы следующие сокращения: «Токи + ЭДС» –

программа с ускоряющими подстановками фиктивных токов и редукцией источников ЭДС; «Токи» – программа с ускоряющими подстановками фиктивных токов без редукции ЭДС; «С-ма (1)» – программа с непосредственным решением системы (1).

Таблица 1

Сравнение времени счета тестовых цепей (в секундах).  
Модельное время 0,2 с, шаг по времени 1 мкс

№ цепи	Электроскоп			Fastmean		PSIM	
	Токи + ЭДС	Токи	С-ма (1)	линейн. модель	нелин. модель	линейн. модель	нелин. модель
1	1,031	1,531	5,484	1,750	3,312	2,3	57
2	5,719	12,391	31,265	12,89	13,94	10,3	111

Таблица 2

Сравнение времени счета тестовых цепей (в секундах).  
Модельное время 2 с, шаг по времени 10 мкс

№ цепи	Электроскоп			Fastmean		PSIM	
	Токи + ЭДС	Токи	С-ма (1)	линейн. модель	нелин. модель	линейн. модель	нелин. модель
1	1,141	1,547	6,344	1,828	3,094	2,0	50
2	13,297	16,734	93,125	34,36	33,218	17,8	112

Критически важно, что программа «Электроскоп» дает расчеты без грубых дефектов. Программы «PSIM» и «Fastmean» показывают значительные (двухкратные и более) ложные пиковые перенапряжения на диодах. Программа PSIM, очевидно, использует для решения нелинейных уравнений метод Ньютона-Рафсона. При расчетах представленных здесь тестовых цепей она выдает многочисленные сообщения об отсутствии сходимости решения. Качество работы программ можно оценить по графикам, показанным на рис. 4 – рис. 6.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод расчета электрических цепей позволяет единым образом, просто, быстро и с малыми вычислительными затратами рассчитывать любые процессы для любых цепей, состоящих из двухполюсников. При этом сопротивления двухполюсников могут отличаться на несколько порядков, что типично для цепей с нелинейными и переключающими элементами. В том числе, цепь может распадаться на несколько не связанных друг с другом частей либо быть на грани такого распада. Многополюсники могут быть представлены в виде эквивалентных соединений двухполюсников.

Возможность расчета электрических цепей с произвольными магнитными связями является одним из важных преимуществ предложенного метода по сравнению с широко применяемым методом узловых потенциалов. По-видимому, недостатки последнего являются основной причиной того, что многие программы расчета электрических цепей не допускают наличия произвольно заданных магнитных связей. Между тем, наличие сложных магнитных связей характерно, например, для трансформаторов и электрических машин.

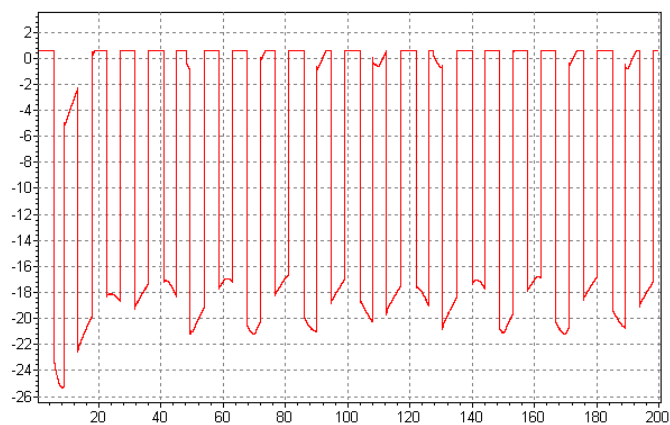


Рис. 4. Программа «Электроскоп». Цепь № 1, напряжение на диоде  $VD_2$  (в вольтах), шаг по времени 1 мкс. Решение без ошибок

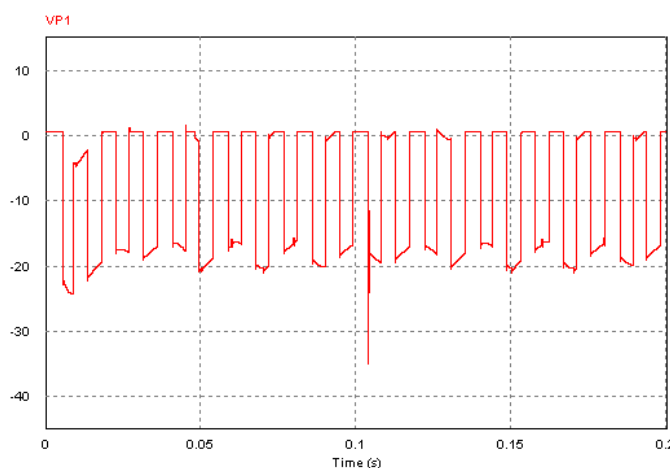


Рис. 5. Программа «PSIM». Цепь № 1, напряжение на диоде  $VD_2$  (в вольтах), шаг по времени 1 мкс. Линейная модель диодов. Искажения решения и ложное пиковое перенапряжение диода

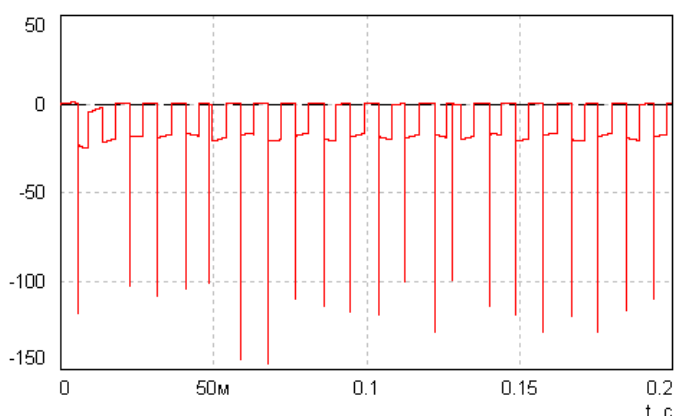


Рис. 6. Программа «Fastmean». Цепь № 1, напряжение на диоде  $VD_2$  (в вольтах), шаг по времени 1 мкс. Линейная модель диодов. Ложные пиковые перенапряжения диода

Предложенный метод отличается надежностью, что показывает сравнение с другими программами, дефекты в результатах расчетов которых вызваны, по-видимому, некорректным решением нелинейных уравнений цепи.

Отметим, что разработанный в статье математический аппарат может быть использован не только для расчетов электрических цепей, но также для расчетов гидравлических, пневматических и механических систем, а также для расчета распространения тепла в твердотельных конструкциях. Для этого соответствующие объекты должны быть представлены в виде эквивалентных электрических цепей. Кроме того, существуют способы преобразования различных полевых задач в задачи расчета соответствующих электрических цепей, которые могут быть решены предложенным методом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурцев Ю.А. Сравнение программы расчета электрических цепей на основе модифицированного табличного метода с известными аналогами. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 8.-13.
2. Петренко А.И. Табличные методы моделирования электронных схем на ЭЦВМ. / А.И. Петренко, А.И. Влахов, А.П. Тимченко. – Киев: Вища школа, 1977. – 192 с.
3. Влах И. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: пер. с англ. / И. Влах, К. Сингхал. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
4. Хейгеман Л. Прикладные итерационные методы: пер. с англ. / Л. Хейгеман, Д. Янг. – М.: Мир, 1986. – 448 с.
5. Бахвалов Н.С. Численные методы. / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Наука, 1987. – 600 с.
6. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – 4-е изд., перераб. и доп. / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1978. – 832 с.
7. Виноградов И.М. Математическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 1052 с.
8. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1989. – 608 с.
9. Березин И.С. Методы вычислений: [в 2 т.]. Т.2 / И.С. Березин, Н.П. Жидков. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры., 1962.
10. Фаддеев Д.К. Вычислительные методы линейной алгебры. / Д.К. Фаддеев, В.Н. Фаддеева. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963.
11. Воеводин В.В. Численные методы алгебры (теория и алгоритмы). – М., 1966. – 248 с.
12. Хокни Р. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ. / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
13. Каплянский А.Е. Теоретические основы электротехники. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1972. – 448 с.

# Simulation of Electrical Circuits Using Conjugate Gradient Algorithm

Burtsev Yu.A.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Novocherkassk, Russian Federation

[proton36@yandex.ru](mailto:proton36@yandex.ru)

**Abstract.** Problems of electrical circuits' simulation are known for long time. However, quality and speed of simulation are far from perfect, especially for non-linear circuits. Proposed method is based on table form of electrical circuits' equations. Differential-algebraic equations of electrical circuits are converted to systems of linear algebraic equations (SLAE) with finite differences method. It is important that SLAE are solved with Conjugate Gradient Algorithm (CGA) that is well adapted to systems with sparse matrixes. Solution of the SLAE at previous time step is good initial approximation of the solution at present time step. That is why CGA reduces calculations to 20-40% of the full algorithm typically. Possibility of using CGA for solving SLAE with matrixes that have no specific sign is proved by nu-

merical experiments. A method for acceleration of solving electrical circuits' SLAE is proposed. It differs from the Nodal Voltages Method by not forming any apparent avatar of circuit SLAE. Comparing of program "Electroscope" based on proposed method with programs "PSIM" and "Fastmean" is presented. "Electroscope" is leading in quality and speed of test circuits' simulations..

**Keywords:** electrical circuits, simulation, table form of equations, conjugate gradient algorithm, matrixes with no specific sign, simulation speed, reliability, comparing.

# Испарительная установка обессоливания воды основанная на вихревом эффекте Ранка-Хилша\*

Терехин А.А.

Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[aleksandr.terekhin@gmail.com](mailto:aleksandr.terekhin@gmail.com)

Золотых И.К.

ЗАО РПК «Системы управления»  
г. Челябинск, Российская Федерация  
[zol.asu@rpk-su.ru](mailto:zol.asu@rpk-su.ru)

**Аннотация.** Объектом исследования является вихревая труба испарительной установки обессоливания воды основанная на вихревом эффекте Ранка-Хилша. Математическая модель описания вихревых эффектов базируется на системе уравнений Рейнольдса замкнутой дифференциальной моделью турбулентности  $k-\omega$  SST. Одной из целей работы является определение основных геометрических и технических параметров масштабной модели прототипа. Другой целью работы является определение основных входных параметров для проведения математического моделирования вихревых процессов с использованием математической модели турбулентности Рейнольдсовых напряжений. В процессе работы проведено численное моделирование вихревых процессов для различных конфигураций прототипов, предложена наиболее эффективная геометрическая схема прототипа и определены основные параметры для постановки численного эксперимента с использованием модели Рейнольдсовых напряжений.

**Ключевые слова:** гидродинамика, эффект Ранка-Хилша, вихревой эффект, вихревая труба, численное моделирование термодинамических и гидродинамических процессов.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России производство обессоленной воды осуществляется, преимущественно, химическим обессоливанием. Технология дорогостоящая, требует большого количества работающего персонала, морально устарела, наносит экологический ущерб природе из-за необходимости использования большого количества реагентов, которые с отработанными регенерационными растворами сбрасываются в водоемы.

Предлагаемая к исследованию конструкция испарительной установки обеспечивает обессоливание воды за счет интенсифицированных тепло-массообменных процессов в поле центробежных сил.

Важной особенностью циклонно-вихревых устройств является сильная зависимость эффективности их работы от конструктивных и режимных параметров. По этой причине важным условием использования вихревых устройств является определение оптимальных конструктивных и режимных характеристик работы аппаратов.

Для проведения численного моделирования течения вязкого турбулентного газа с учетом теплопроводности и дальнейшего учета фазового перехода воспользуемся математической моделью на основе системы уравнений Рейнольдса широко используемой при моделировании турбулентных течений. Неизвестные пульсационные составляющие определяются на основе теории Буссинеска [1, 2] по дифференциальной модели турбулентности  $k-\omega$  SST [3, 4].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основная цель проведения расчетов – определение геометрических и технических параметров вихревой трубы испарительной установки обессоливания воды, которые необходимы для проектирования и дальнейшего изготовления макета, а так же в работе необходимо определить входные параметры для построения математической модели описания вихревых эффектов на основе модели Рейнольдсовых напряжений.

Принципиальная схема вихревой трубы отображена на рис. 1.

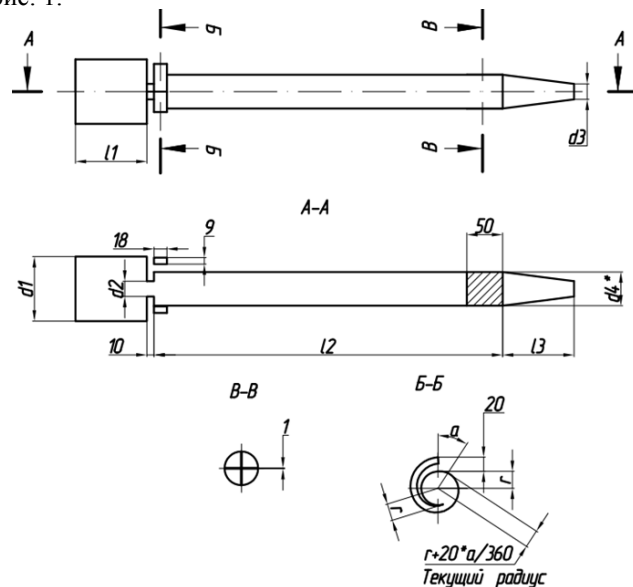


Рис. 1. Принципиальная схема вихревой трубы

Размеры трубы принимались с учетом рекомендаций [5] и сведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры расчетных моделей

Обозначение модели	Размеры модели					
	L, мм	l3, мм	d1, мм	d2, мм	d3, мм	d4, мм
Модель №1	488	50	60	13,5	6,750	21,6
Модель №2					10,125	
Модель №3					13,500	
Модель №4	418	50	60	21,6	6,750	47,1
Модель №5	488				10,8	
Модель №6	418				13,5	
Модель №7	303	50	60	13,5	3	21,6
Модель №8	3030	500	600	135	30	216
Модель №9						
Модель №10						

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ по соглашению №14.579.21.0063 от 20.10.2014, идентификатор RFMEFI57914X0063



Необходимо отметить, что модели № 1-7 являются уменьшенными моделями – прототипами, на которых будут проводиться физические эксперименты для уточнения математической модели описания вихревого процесса внутри установки. Модели 8, 9 и 10 являются полномасштабными промышленными моделями.

На рис. 2 приведена схема задания граничных условий и их название. Числовые значения задаваемых параметров на границах и параметры моделей приведены в табл. 2 и 3. Теплофизические свойства пара выбирались в соответствии с рекомендациями [6, 7].

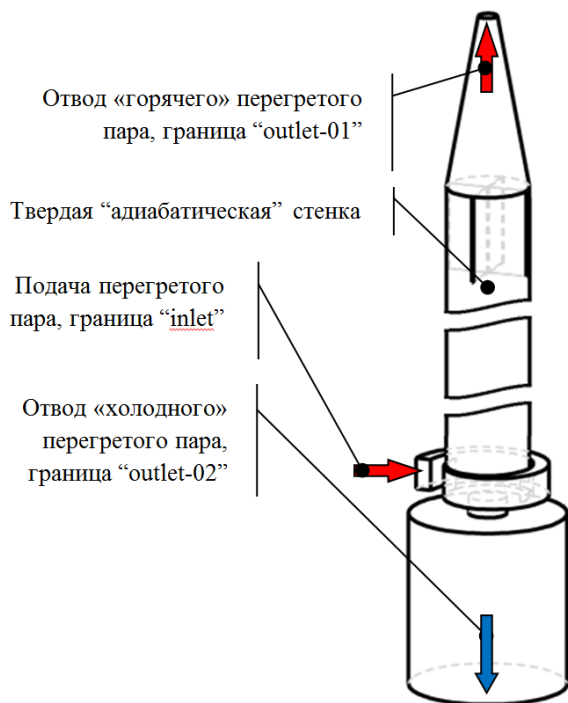


Рис. 2. Принципиальная схема задания граничных условий

Таблица 2

Параметры расчетной сетки и выбранного рабочего газа

Обозначение модели	Кол-во контрольных объемов в расчётной области	Рабочий газ
Модель № 1	640 742	Воздух
Модель № 2	653 580	
Модель № 3	657 833	
Модель № 4	604 087	
Модель № 5	826 909	
Модель № 6	817 558	
Модель № 7	4 852 368	
Модель № 8	4 212 802	Пар
Модель № 9		
Модель № 10		

Таблица 3

Параметры рабочего газа

	Параметры рабочего газа					
	$T_{inlet}, K$	$P_{outlet-01}, P_{outlet-02}, Pa$	$\mu, Pa \cdot c$	$c_p, Дж/(кг \cdot K)$	$\lambda, Вт/(м \cdot K)$	$R, Дж/(кг \cdot K)$
Воздух	373,15	-9700	$1,83 \cdot 10^{-5}$	1004,4	0,0261	287
Пар			$1,85 \cdot 10^{-4}$	2042,0	1,4000	461

В табл. 3  $T_{inlet}$  – температура рабочего газа на входе в вихревую трубу;  $P_{outlet-01}$  – давление рабочего газа на «горячем» выходе вихревой трубы;  $P_{outlet-02}$  – давление рабочего газа на «холодном» выходе вихревой трубы;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $R$  – газовая постоянная.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для численного моделирования внутреннего течения газа использована система уравнений движения вязкого газа, осреднённая по Рейнольдсу [1, 4, 8]. Неизвестные пульсационные составляющие определяются на основе теории Буссинеска [1, 2] по дифференциальной модели турбулентности  $k-\omega$  SST [3, 4, 8]. Решение системы дифференциальных уравнений проведено с использованием широко применяемого в отечественной и зарубежной практике модифицированного метода контрольного объема [9] реализованного в программном средстве Dinam-LGTM [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 приведена схема вихреобразования для расчетных моделей № 6, 7 и 9, которая является характерной для всех рассмотренных течений. На приведенном рисунке отчетливо видно вихреобразование и разделение потока на две составляющие в соответствии с эффектом Ранка-Хилша.

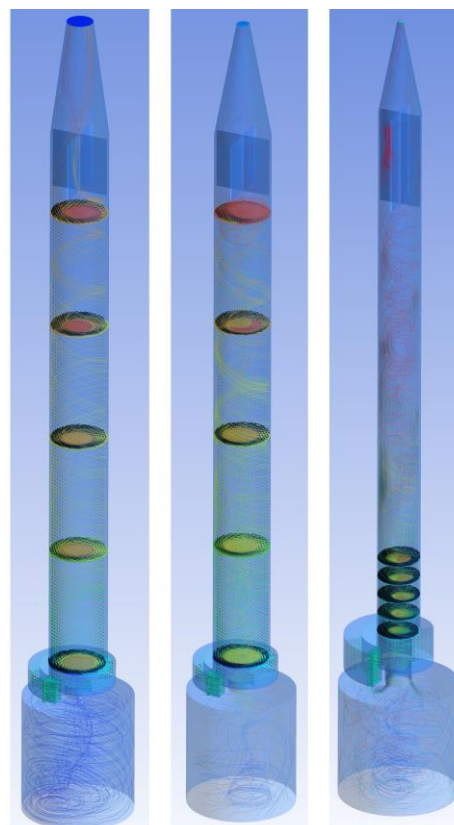


Рис. 3. Принципиальная схема вихреобразования

Основной задачей проведения расчетов, является выбор оптимальных параметров прототипа. Результаты проведения математического моделирования для всех случаев сведены в табл. 4.

Таблица 4

Геометрические параметры расчетных моделей

Модель №	Расчетные параметры						
	Скорость на входе, м/с	Давление на входе, атм	Отношение массового расхода горячего газа (пара) к холодному	Разница температур горячего газа (пара) и холодного, 0С	Среднее давление в расчетной области, атм	Массовый расход газа (пара), кг/с	Объемный расход газа (пара), н.л./мин
1	100	0,09	6,9	7,1	-0,05	0,01644	818,5
	150	0,53	7,7	31,9	0,09	0,03468	1727,0
	200	1,52	8,0	63,5	0,37	0,07610	3789,2
	250	3,65	9,2	104,1	0,96	0,17549	8738,1
2	100	0,09	11,1	7,1	-0,05	0,01645	818,9
	150	0,54	9,8	28,5	0,07	0,03497	1741,5
	200	1,77	7,4	65,0	0,40	0,08370	4167,4
	250	6,06	7,5	109,3	1,51	0,26651	13270,2
3	100	0,001	30,0	1,1	-0,14	0,01513	753,4
	150	0,41	20,3	11,7	0,00	0,03191	1588,7
	200	1,70	12,0	49,7	0,32	0,08153	4059,6
	250	8,07	10,0	122,0	1,85	0,34243	17050,5
4	100	0,09	6,8	7,1	-0,05	0,01642	817,5
	150	0,56	6,2	32,7	0,09	0,03536	1760,4
	200	1,73	6,1	69,1	0,41	0,08249	4107,2
	250	4,46	5,1	110,3	1,11	0,20614	10264,2
5	100	-0,04	1500	-0,8	-0,09	0,01443	718,6
	150	0,02	316,4	0,6	-0,08	0,02312	1151,2
	200	0,16	192,2	3,4	-0,07	0,03504	1744,8
	250	0,43	111,2	1,5	-0,05	0,05418	2697,8
6	100	-0,04	22,9	0,4	-0,09	0,01453	723,7
	150	0,05	21,3	3,0	-0,08	0,02375	1182,8
	200	0,20	18,4	8,4	-0,05	0,03614	1799,5
	250	0,56	22,6	21,6	0,01	0,05903	2939,3
7	100	-0,04	22,9	0,4	-0,09	0,01453	723,7
	150	0,05	21,3	3,0	-0,08	0,02375	1182,8
	200	0,20	18,4	8,4	-0,05	0,03614	1799,5
	250	0,56	22,6	21,6	0,01	0,05903	2939,3
8	100	0,06	13,3	5,1	-0,07	0,01601	797,1
	110	0,14	16,2	10,3	-0,04	0,01896	944,3
	120	0,26	28,0	15,4	-0,01	0,02283	1136,5
	130	0,33	27,0	17,8	0,00	0,02605	1297,3
	140	0,40	26,4	20,7	0,02	0,02952	1469,8
9	100	0,06	12,8	4,1	-0,07	1,59833	79585,0
	120	0,24	47,1	10,1	-0,03	2,24131	111600,7
	150	0,46	48,2	21,1	0,02	3,29885	164258,0
	100	0,34	26,5	3,1	0,00	1,27337	63404,4
10	120	0,79	17,2	11,5	0,14	2,03187	101171,7
	150	1,42	17,1	17,2	0,29	3,43358	170966,5

Определяющей характеристикой качества процесса обессоливания, является отношение расходов “горячего” и “холодного” рабочего газа, что советуется граничным условиям “outlet-01” и “outlet-02”, рис. 2. Расчетные модели №1-4 имели одинаковую структуру разбиения расчетной области на контрольные объемы. Отличие моделей заключается лишь в геометрии. Как показали расчеты, наиболее удачная модель по геометрическим соотношениям является модель №4, рис. 4.

Модели №5 и 6 отличаются от моделей №1-4 увеличенным объемом камеры закручивания потока. Модель № 6 имеет производительность в 4 раза меньше чем модель № 4, табл. 4, рис. 4 и 5.

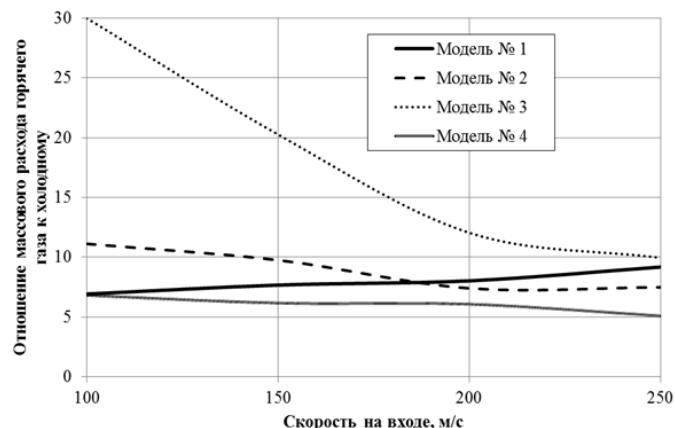


Рис. 4. Отношения массовых расходов “горячего” и “холодного” рабочего газа для моделей №1-4

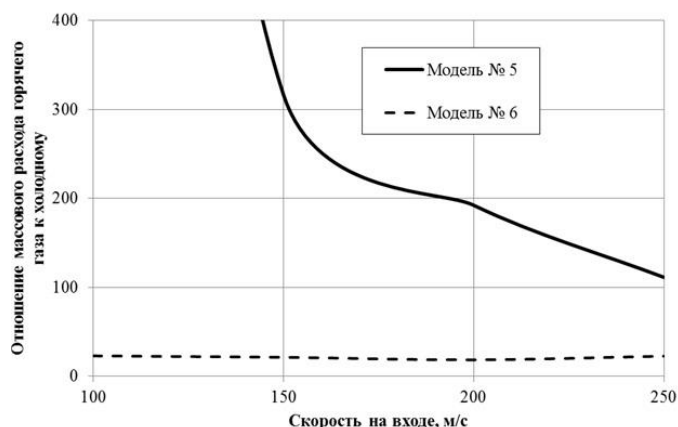


Рис. 5. Отношения массовых расходов “горячего” и “холодного” рабочего газа для моделей №5 и 6

Модель № 4 и 7 отличаются качеством аппроксимации расчетной области. Количество контрольных объемов отличается в 6 раз (табл. 2). Время счета для модели № 4 и 7 составляет примерно 10 и 0,8 часов соответственно. На крупных сетка удобно проводить предварительный расчет, а с использованием мелких сеток проводилось уточнение параметров расчетной модели. Как показало сравнение полученных результатов, измельчение существенно влияет на результаты и для подобных крупномасштабных вихревых структур необходимо отдельно проводить анализ полученного решения на сеточную независимость, рис. 5.

Влияние длины камеры вихреобразования можно проследить путем сравнения моделей № 7 и 8, модель № 8 на 30 % короче. Расчетные параметры модели № 7 и 8 принципиально не отличаются (табл. 4, рис. 6), но модель № 8 более компактная, что является предпочтительной для изготовления прототипа.

Модель № 8 и 9 отличаются масштабом, модель № 9 в 10 раз больше модели № 8. Масштаб вихревых структур, образующихся в камере существенно отличаются, как и переход от воздуха к горячему пару (рис. 7).

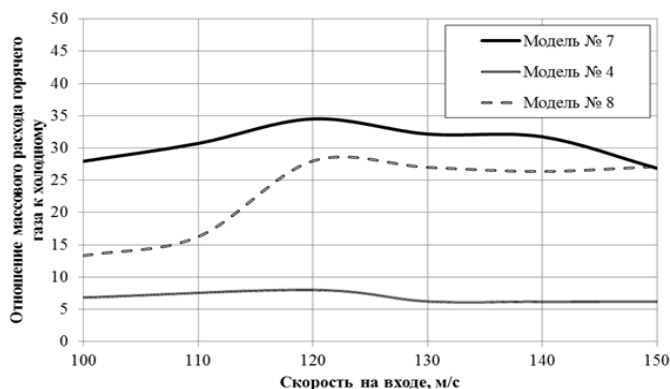


Рис. 6. Отношения массовых расходов “горячего” и “холодного” рабочего газа для моделей № 4, 7 и 8

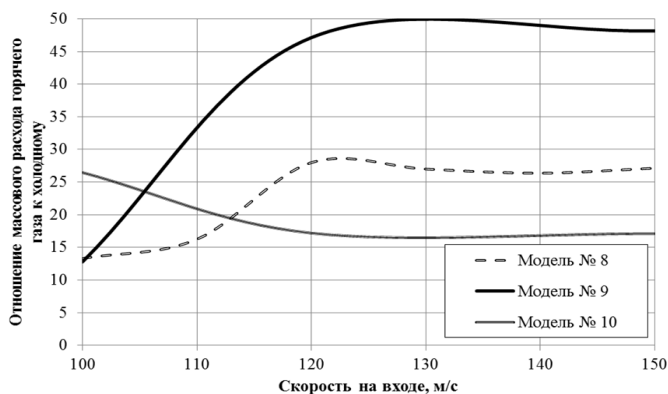


Рис. 7. Отношения массовых расходов “горячего” и “холодного” рабочего газа для моделей №8-10

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение хотелось бы напомнить основные цели работы: определить геометрические параметры прототипа, изготовление которого необходимо для уточнения математической модели и выработка основных параметров математической модели основанной на модели турбулентности Рейнольдсовых напряжений.

Для прототипирования установки рекомендуется остановиться на модели № 8, являющейся уменьшенной модели промышленной установки № 10. Изготовление модели

и проведение эксперимента на воздухе позволит уточнить математическую упрощенную математическую модель.

Дальнейшее исследование параметров вихреобразования и разделения потоков в соответствии эффекта Ранка-Хилша на базе модели Рейнольдсовых напряжений необходимо вести только на мелкой сетке и обязательно проводить анализ полученного решения на сеточную независимость. Количество контрольных объемов для начала постановки численного эксперимента необходимо брать не менее 4,5 млн. с последующим увеличением их количества.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. – DCW Industries, 1994 – 460 p.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1974. – 712 с.
3. Menter F.R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. – 1994. – № 1. P. 1299-1310.
4. Chung T.J. Computational Fluid Dynamics. – Cambridge university press, 2002. – 1022 p.
5. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. – М.: Машиностроение, 1969. – 182 с.
6. Вукалович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. – М.: Машиностроение, 1955. – 92 с.
7. Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М.: МЭИ, 1999. – 168 с.
8. Versteeg H.K. An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method. – Longman Group Ltd, 1995. – 257 p.
9. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоиздат, 1984. – 152 с.
10. Терехин А.А., Терехина Т.В., Щеглов А.В., Сидельников Р.В., Карташев А.Л. DynamLGTM: программа трехмерного моделирования газодинамических процессов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Заявка № 2009613165. 2009.

## Evaporator System of Water Desalination Based on the Vortex Effect of Ranque-Hilsch

Terekhin A. A.

South Ural State University (national research university)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[Aleksandr.Terekhin@gmail.com](mailto:Aleksandr.Terekhin@gmail.com)

Zolotkyh I.K.

CJS Russian Instrument-Making Corporation  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[zol.asu@rpk-su.ru](mailto:zol.asu@rpk-su.ru)

**Abstract.** The object of the research is the vortex tube of evaporator system of water desalination based on the vortex effect of Ranque-Hilsch. Mathematical model for vortex effects is based on the Reynolds-Averaged Equations closed Two-Equation k- $\omega$  SST turbulence models. One of the goal of research is definition geometry of vortex tube prototype model. Another of the goal of research is definition input general parameters for Reynolds Stress Turbulence Model. Results of the work is opti-

mal geometrical parameters of prototype of vortex tube based on the vortex effect of Ranque-Hilsch and input general parameters for Reynolds Stress Turbulence Model necessary for next step this work.

**Keywords:** computational fluid dynamics, ranque-hilsch effect, vortex tube.

# Диагностика электромагнитов по вебер-амперной характеристике рабочего цикла\*

Гречихин В.В., Ланкин М.В., Ланкин А.М.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
г. Новочеркасск, Российская Федерация

[lankinjohn@rambler.ru](mailto:lankinjohn@rambler.ru)

**Аннотация.** В статье описано метод определения вебер-амперной характеристики электротехнических устройств переменного тока с подвижными частями магнитопровода, в частности, электромагнитов. Решение обратной задачи гармонического баланса и метод натурно-модельных испытаний позволяют получить вебер-амперную характеристику электромагнитов, по которой можно не только определить состояние электромагнита, но и тип неисправности. Методика базируется на проведенных ранее исследованиях по получению вебер-амперных характеристик электротехнических устройств с неподвижными частями магнитопровода. Актуальность предложенного метода заключается в возможности диагностики электромагнитов как при производстве, так и в ходе их эксплуатации. Метод позволяет получить вебер-амперную характеристику рабочего цикла электромагнитов с погрешность не превышающей 3 %.

**Ключевые слова:** вебер-амперная характеристика рабочего цикла, гармонический баланс, метод натурно-модельных испытаний, диагностика.

## ВВЕДЕНИЕ

Все электромагнитные устройства переменного тока имеют подвижную и неподвижную части магнитопровода и как минимум одну рабочую катушку. В ходе эксплуатации электромагнитов переменного тока в рабочей катушке протекает ток, создается рабочий магнитный поток в неподвижной части магнитопровода, приводящий в движение подвижную его часть. Величина магнитного потока определяется конструкцией, взаимным расположением частей магнитопровода и рабочей катушки, а так же количеством витков в ней и величиной протекающего тока. В течение рабочего цикла электромагнитов переменного тока подвижная часть магнитопровода перемещается относительно неподвижной, что так же приводит к изменению магнитного потока. Напрашивается вывод о том, что в качестве интегральной характеристики содержащей не только информацию об эксплуатационных параметрах электромагнитов переменного тока, но и о качестве его отдельных частей является вебер-амперная характеристика рабочего цикла.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕБЕР-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

В основе метода определения вебер-амперных характеристик электромагнитов лежит решение обратной задачи гармонического баланса методом натурно-модельных испытаний [1-9], объединяющим измерение на физическом объекте и моделирование исследуемого объекта.

Метод позволяет определить форму вебер-амперной характеристики, по известному, протекающему через катушку электромагнита току, заданному в виде разложения в ряд Фурье:

$$i(t) = \sum_{m=1}^n I_{(2m-1)} \sin((2m-1)\omega t), \quad (1)$$

где  $I_{(2m-1)}$  – амплитуда  $(2m-1)$ -ой гармоники тока и по известной форме и амплитуда  $U_a$  напряжения приложенного к катушке электромагнита:

$$u(t) = U_a \sin(\omega t). \quad (2)$$

Искомая вебер-амперная характеристика электромагнита, задана аппроксимирующим выражением:

$$\Phi(i) = \sum_{m=1}^n k_{(2m-1)} i^{2m-1}, \quad (3)$$

где  $\Phi$  – значение магнитного потока,  $k_{(2m-1)}$  – коэффициенты аппроксимирующего выражения вебер-амперной характеристики,  $m = \overline{(1, n)}$ ,  $n$  – количество слагаемых в аппроксимирующем выражении,  $i$  – сила тока протекающего через катушку электромагнита.

В нашем случае имеется электромагнит с неизвестной вебер-амперной характеристикой, известны законы изменения напряжения (2) приложенного к электромагниту и протекающего по нем тока (1). Требуется определить коэффициенты  $k_{(2m-1)}$  выражения (3), аппроксимирующего вебер-амперную характеристику.

Запишем уравнение цепи электромагнита:

$$u(t) = Ri + \frac{d\Phi}{dt}.$$

Перепишем его с учетом известных законов изменения тока (1) и напряжения (2):

$$U_a \sin \omega t = R \left( \sum_{m=1}^n I_{(2m-1)} \sin((2m-1)\omega t) \right) + \frac{d \sum_{m=1}^n k_{(2m-1)} \sum_{m=1}^n (I_{(2m-1)} \sin((2m-1)t\omega))^{2m-1}}{dt}.$$

Проведены эксперименты с электротехническими устройствами без подвижных частей магнитопровода, где в качестве метода для определения вебер-амперной характеристики электротехнического устройства использовался алгоритм натурно-модельных испытаний, который состоит в следующем: на электротехническое устройство подается синусоидальное напряжение и с помощью датчиков тока и напряжения производятся измерения входного

\* Результаты работы получены при поддержке проекта № 1.2690.2014/К "Методы решения обратных задач диагностики сложных систем (в технике и медицине) на основе натурно-модельного эксперимента", выполняемого в рамках проектной части государственного задания с использованием оборудования ЦКП "Диагностика и энергоэффективное электрооборудование" ЮРГПУ (НПИ).



(напряжение) и выходного (ток) сигналов электротехнического устройства, далее полученные данные поступают в персональный компьютер, где в модель задаются входные данные и получают выходные данные модели, а с помощью оптимизационного алгоритма добиваются совпадения выходных данных электротехнического устройства и его модели. При совпадении выходных данных строится полученная на последней итерации вебер-амперная характеристика. В качестве основы построения оптимизационного алгоритма работы управляющей программы используем метод симплекс-оптимизации. Разработана программа реализующая модель электромагнита и оптимизационная программа на основе симплекс-планирования [10].

Алгоритм натурно-модельных испытаний в случае электромагнита, имеющего в своем составе подвижные части магнитопровода состоит в следующем. На не демонтированный из электротехнического изделия переменного тока электромагнит подают синусоидальное напряжение, амплитуда которого ступенчато изменяется от нулевого значения до номинального и обратно (рис. 1). При этом электромагнит совершает рабочий цикл, преодолевая сопротивление исполнительных механизмов, соединенных с ним.

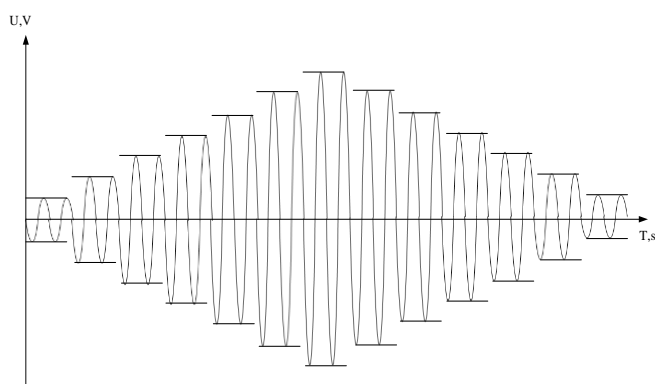


Рис. 1. Ступенчато-изменяющееся синусоидальное напряжение

На каждой ступени напряжения измеряется частная вебер-амперная характеристика и амплитуда тока. Фиксируя местоположение конечных точек частных вебер-амперных характеристик получаем вебер-амперную характеристику рабочего цикла (рис. 2).

Проведены исследования показавшие, что по виду полученных вебер-амперных характеристик рабочего цикла электромагнитов переменного тока можно определить тип неисправности (рис. 3).

Проведен математический анализ решения обратной задачи гармонического баланса, проведены вычислительный и натурный эксперименты с использованием математической модели и ряда электротехнических устройств (электромагнитного реле, электродвигателя и тороидального трансформатора). Результаты которых позволяют утверждать, что предложенный метод измерения ВАХ позволяет получить характеристику электротехнического устройства с погрешность не превышающей 3 % [11]. Проведено исследование [7, 8] влияния погрешности измерения гармоник тока на точность метода определения

вебер-амперных характеристик. Значения гармоник тока варьировались в интервале  $\pm 4,4\%$ , дополнительная погрешность получения вебер-амперных характеристик не превысила 1%.

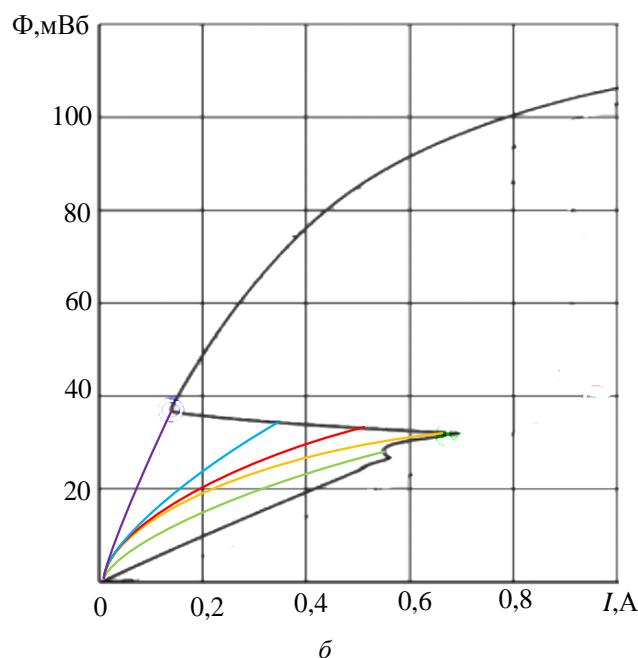
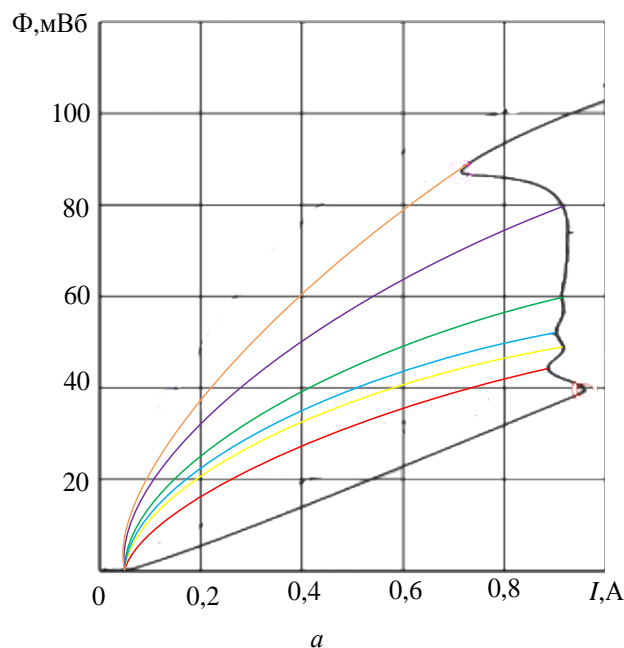


Рис. 2. Методика получения ВАХРЦ:  
а – прямая и б – обратная ветвь

#### Выводы

Предложенный метод позволяет проводить диагностику электротехнических устройств переменного тока с подвижными частями магнитопровода, таких как электромагниты, реле переменного тока и т.п. Актуальность предложенного метода заключается в возможности диагностики электромагнитов как при производстве [12], так и в ходе их эксплуатации. Метод позволяет получить вебер-амперную характеристику рабочего цикла электромагнитов с погрешность не превышающей 3 %.

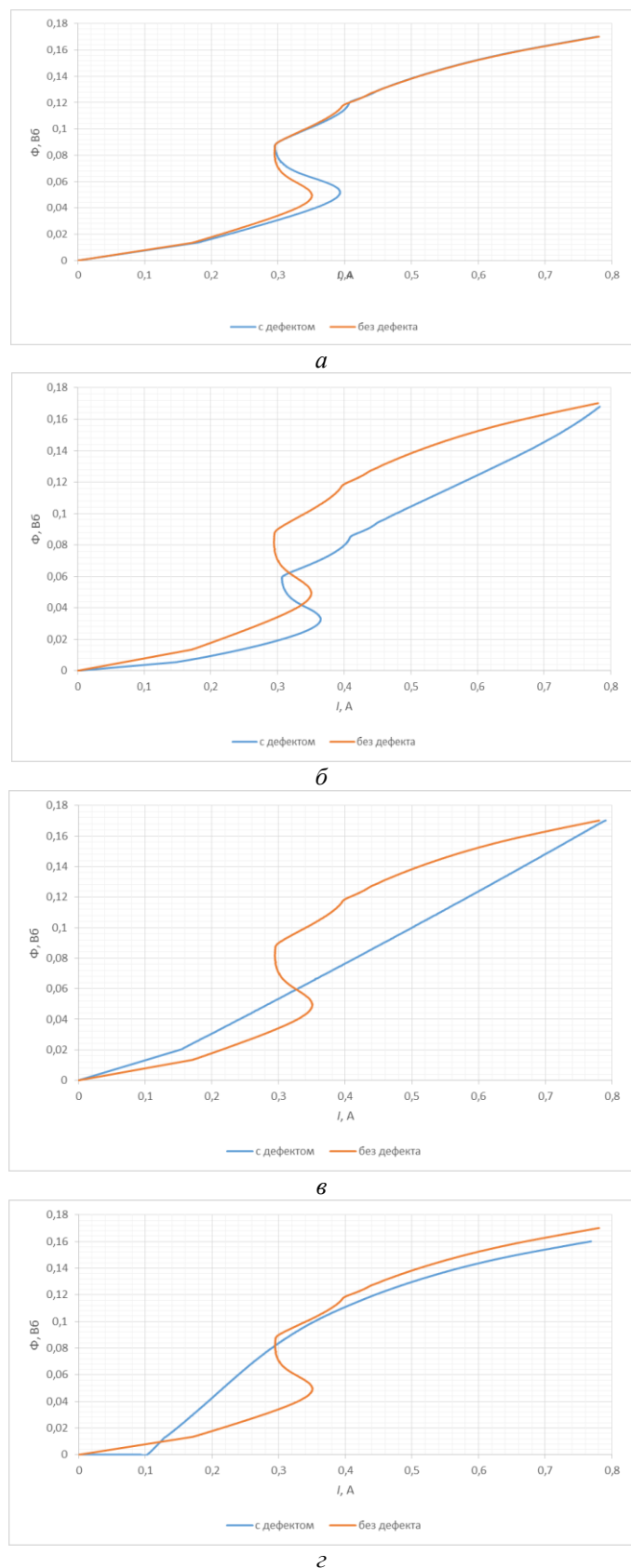


Рис. 3. Вебер-амперные характеристики рабочего цикла электромагнитов переменного тока с дефектами:

а – засорение на верхней поверхности якоря; б – межвитковое короткое замыкание; в – залипание якоря в начальном положении; г – залипание якоря в притянутом положении

ЛИТЕРАТУРА

1. Ланкин А.М. Метод измерения вебер-амперной характеристики электротехнических устройств / А.М. Ланкин, М.В. Ланкин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №1. URL: <http://www.science-education.ru/115-12186>.

2. Ланкин А.М. Метод измерения вебер-амперной характеристики базирующийся на решении обратной задачи МГБ / А.М. Ланкин, М.В. Ланкин, Н.Д. Наракидзе // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №4. URL: <http://www.science-education.ru/118-13942>.

3. Ланкин А.М. Применение алгоритма натурно-модельных испытаний для диагностики электротехнических систем / А.М. Ланкин, М.В. Ланкин, В.А. Кучеров, О.А. Наугольнов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1. URL: <http://www.science-education.ru/125-19975>.

4. Ланкин А.М. Метод измерения вебер-амперной характеристики электротехнических устройств / А.М. Ланкин, М.В. Ланкин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №1. URL: <http://www.science-education.ru/115-12186>.

5. Lankin A.M. Getting weber-voltage characteristics using the method of harmonic balance / A.M. Lankin, M.V. Lankin // The Second International Conference on Eurasian scientific development Proceedings of the Conference, 2014. – P. 264-270.

6. Gorbatenko N.I. Determination Of Weber-Ampere Characteristic For Electrical Devices Based On The Solution Of Harmonic Balance Inverse Problem / N.I. Gorbatenko, A.M. Lankin, M.V. Lankin, D.V. Shayhutdinov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – vol. 10, is. 3. – P. 6509-6519.

7. Ланкин А.М. Решение обратной задачи гармонического баланса в натурно-модельном эксперименте определения вебер-амперных характеристик электро-технических изделий: монография. / А.М. Ланкин, М.В. Ланкин. – Москва: ООО "Книжный перекресток", 2015. – 127 с.

8. Ланкин М.В. Устройства измерения ВАХ электротехнических изделий переменного тока: монография. / М.В. Ланкин., А.М. Ланкин – Саарбрюккен: LAP LAMBERT, 2015. – 112 с.

9. Lankin A.M. Determination of Weber-Ampere Characteristics of Electric Devices Using Solution of Inverse Problem of Harmonic Balance / A.M. Lankin, M.V. Lankin, N.I. Gorbatenko, D.V. Shayhutdinov // Modern Applied Science. – 2015. – vol. 9, is. 8. – P. 247-261. URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v9n8p247>.

10. Кучеров В.А. Программа симплекс-планирования / В.А. Кучеров, А.М. Ланкин, М.В. Ланкин, Л.Г. Тарасова // Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах: тезисы докл. 15 Международной научно-практической конф. (Новочеркасск, 2015 г.). – Новочеркасск, 2015. – С. 52.-56.

11. Ланкин А.М., Ланкин М.В. Определение погрешности измерения вебер-амперной характеристики // Свидетельство РФ № 2015610308. 2015.

12. Шайхутдинов Д.В. Адаптивная подсистема автоматического управления производством интеллектуальных электроприводов / Д.В. Шайхутдинов, Н.И. Горбатенко, К.М. Широков, В.В. Гречихин, А.М. Ланкин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1. URL: <http://www.science-education.ru/125-20095>.

# Diagnosis of Electromagnets for Weber-Ampere Characteristic the Operating Cycle

Grechihin V.V., Lankin M.V., Lankin A.M.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Novocherkassk, Russian Federation

[lankinjohn@rambler.ru](mailto:lankinjohn@rambler.ru)

*Abstract.* The article describes the method of determining the weber-ampere characteristics electrotechnical AC devices with moving parts of the magnetic circuit, in particular electromagnets. The solution of the inverse problem of harmonic balance and the method of natural-model tests allow to obtain weber-ampere characteristic of the electromagnets, in which it is possible not only to determine the state of the electromagnet, and the type of fault. The technique is based on the previously conducted studies to obtain weber-ampere characteristics of electrotechnical

devices to a fixed part of the magnetic circuit. The relevance of the proposed method is the possibility of the diagnosis of electromagnets as in production and in the course of their operation. The method provides a weber-ampere characteristic of the operating cycle with electromagnets error does not exceed 3 %.

*Keywords:* weber-ampere characteristic of the operating cycle, the harmonic balance method, natural-model testing, diagnostics.

# Метод резонансной последовательно-параллельной идентификации

Ткаченко Г.И., Бакланов А.Н.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
г. Новочеркасск, Российская Федерация

[baklanov-88@mail.ru](mailto:baklanov-88@mail.ru)

**Аннотация.** В настоящей работе описан метод резонансной последовательно-параллельной идентификации параметров резистивно-емкостных датчиков и решение системы уравнений модели объекта, что позволяет определить ее параметры, недоступные прямым измерениям. Проведенный вычислительный эксперимент показал, что метод резонансной последовательно-параллельной идентификации позволяет определять параметры резистивно-емкостных объектов с распределенными параметрами. Предлагаемый метод обладает следующими преимуществами: высокое быстродействие при сохранении желаемой точности измерения и небольшая погрешность расчетов.

**Ключевые слова:** резистивно-емкостные датчики, решение системы уравнений, метод резонансной последовательно-параллельной идентификации.

## ВВЕДЕНИЕ

Контроль за основными параметрами технологических процессов осуществляется с целью получения информации, необходимой для своевременной ликвидации нарушений режимов работы оборудования [1]. При измерении параметров технологических процессов широкое применение находят потенциметрические датчики [2, 3]. При большом количестве положительных качеств таких датчиков у них есть существенный недостаток: ограниченное число циклов работы из-за износа подвижной контактной части датчика. Причина этого в трении между резистивным слоем и подвижным токосъемным элементом [4]. Такого недостатка лишены резистивно-емкостные датчики с распределенными параметрами [5].

В настоящее время широко распространены резистивно-емкостные датчики, представляющие собой потенциометр с подвижным электродом, перемещающимся под действием измеряемой величины над резистивным элементом, не касаясь последнего. В результате электрическая схема параметрического резистивно-емкостного датчика представляет собой многополюсную многоэлементную электрическую цепь. В резистивно-емкостных датчиках с распределенными параметрами используется не гальваническая, а емкостная связь подвижного элемента с резистивным слоем. Однако изменения относительно своего среднего значения емкости связи в условиях реальной эксплуатации резистивно-емкостных датчиков с распределенными параметрами, а также при перемещении подвижного элемента приводят к искажению передаточной функции датчика и, следовательно, выходного сигнала [6, 7]. Добиться постоянства емкости связи проблематично без существенного удорожания датчика. Таким образом контроль значений емкости связи и информация о ее девиации очень актуальна для проведения точных измерений, математического и схемотехнического моделирова-

ния процессов измерений, при проектировании резистивно-емкостных датчиков и разработке измерительных преобразователей к ним [8].

## МЕТОД РЕЗОНАНСНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Для определения параметров резистивно-емкостных датчиков с распределенными параметрами предлагается использовать метод резонансной последовательно-параллельной идентификации. Он объединяет измерения на физическом объекте в трех режимах (штатном, резонансов напряжения и тока) и решение системы уравнений его модели, что позволяет определить параметры схемы замещения, недоступные прямым измерениям [9].

Алгоритм метода резонансной последовательно-параллельной идентификации содержит следующие этапы:

- измерения на физическом объекте в трех режимах: штатном, резонансов напряжения и тока;
- составление схемы замещения исследуемого объекта;
- составление и решение системы уравнений модели относительно искомых параметров объекта.

Обобщенная схема измерений токов в вышеупомянутых режимах приведена на рис. 1.

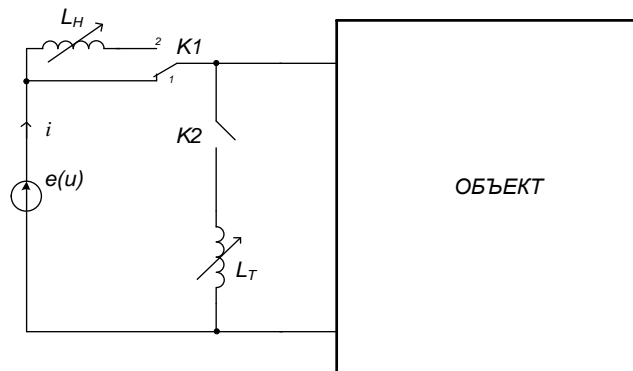


Рис. 1. Обобщенная схема эксперимента

К измеряемому объекту подключен генератор синусоидального напряжения  $e(u)$ . Предусмотрена возможность подключения при помощи ключей  $K1$  и  $K2$  переменных индуктивностей  $L_H$  последовательно и  $L_T$  параллельно с объектом исследования.

В штатном режиме (ключ  $K1$  находится в положении 1, ключ  $K2$  разомкнут) производятся измерения действующих значений тока  $I$ , напряжения  $U$  и сдвига фаз  $\varphi$  между ними. Во втором режиме измерительного эксперимента (резонанс напряжений) ключ  $K1$  переключен в положение 2, ключ  $K2$  разомкнут. Изменяя индуктивность  $L_H$  добива-



емся, чтобы сдвиг фаз  $\varphi$  между током  $i$  и напряжением  $u$  равнялся нулю. В этом режиме измеряются ток  $I=I_H$  и напряжение  $U$ . В третьем режиме измерительного эксперимента (режим резонанса токов) ключ  $K1$  переключен в положение 1, а ключ  $K2$  замкнут. Изменяя индуктивность  $L_T$  добиваемся чтобы сдвиг фаз  $\varphi$  между током  $i$  и напряжением  $u$  равнялся нулю. В этом режиме измеряются ток  $I=I_T$  и напряжение  $U$ .

Резистивно-емкостным датчикам с распределенными параметрами соответствует схема замещения, приведенная на рис. 2 [8].

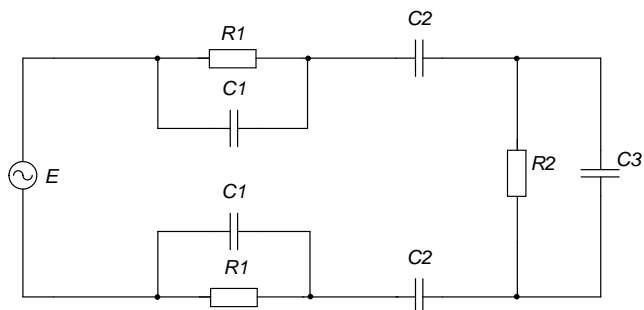


Рис. 2. Схема замещения

Для получения модели, описывающей работу объекта, составим систему уравнений, причем принимаем емкости  $C1$  и  $C2$  равными.

В первом (штатном) режиме измерений:

$$I = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{2R_1 X_{C1}^2}{R_1^2 + X_{C1}^2} + \frac{R_2 X_{C3}^2}{R_2^2 + X_{C3}^2}\right)^2 + \left(\frac{2R_1^2 X_{C1}}{R_1^2 + X_{C1}^2} + 2X_{C2} + \frac{R_2^2 X_{C3}}{R_2^2 + X_{C3}^2}\right)^2}}; \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg \left( 1 + \frac{2X_{C2}}{\frac{2R_1 X_{C1}^2}{R_1^2 + X_{C1}^2} + \frac{R_2 X_{C3}^2}{R_2^2 + X_{C3}^2}} \right); \quad (2)$$

в режиме резонанса напряжений:

$$I_H = \frac{U}{\left(\frac{2R_1 X_{C1}^2}{R_1^2 + X_{C1}^2} + \frac{R_2 X_{C3}^2}{R_2^2 + X_{C3}^2}\right)}; \quad (3)$$

в режиме резонанса токов:

$$I_T = \frac{U \cdot \left(\frac{2R_1 X_{C1}^2}{R_1^2 + X_{C1}^2} + \frac{R_2 X_{C3}^2}{R_2^2 + X_{C3}^2}\right)}{\left(\frac{2R_1 X_{C1}^2}{R_1^2 + X_{C1}^2}\right)^2 + \left(\frac{2R_1^2 X_{C1}}{R_1^2 + X_{C1}^2} + 2X_{C2} + \frac{R_2^2 X_{C3}}{R_2^2 + X_{C3}^2}\right)^2}; \quad (4)$$

Решение системы уравнений (1-4) дает искомые параметры схемы:  $C1$ ,  $C3$  и  $R1$ ,  $R2$ .

#### РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА РЕЗОНАНСНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Экспериментальное исследование метода произведено путем выполнения вычислительного эксперимента. Измерения токов, напряжений и сдвигов фаз произведено при помощи эмулятора Micro-CAP [10]. Схема вычислительного эксперимента приведена на рис. 3.

На выходе генератора  $V1$  синусоидальное напряжение  $U = 3$  В, частотой  $f = 50$  кГц. Значения параметров схемы замещения  $R1 = 100$  Ом,  $C1 = C2 = 1$  нФ,  $R2 = 16$  кОм,  $C3 = 0,1$  нФ.

В первом режиме измерений получены следующие результаты:  $I = 207,5$  мкА,  $U = 3$  В,  $\varphi = 0,98$  рад. Во втором режиме индуктивность  $L_H = 21$  мГн дает резонансный ток  $I_H = 231,2$  мкА, а в третьем – индуктивность  $L_T = 200$  мГн дает  $I_T = 237,7$  мкА.

Решение системы уравнений осуществлено при помощи программы Maple [11]. Данный пакет широко используется при решении задач электротехники и медицины связанных с решением систем уравнений [12-14].

В ходе решения системы уравнений получены следующие результаты:  $R1 = 99,708$  Ом,  $R2 = 16,002$  кОм,  $C1 = C2 = 0,999$  нФ,  $C3 = 0,099$  нФ,

Найдем погрешность полученного результата по соотношению [15-17]

$$\gamma = \left| \frac{X - X_{\text{выч}}}{X} \right| \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $X$  – истинное значение, заданное в эмуляторе Micro-CAP,  $X_{\text{выч}}$  – значение, полученное из системы уравнений.

По формуле (5) вычислены следующие погрешности:  $\gamma_{R1} = 0,3\%$ ;  $\gamma_{R2} = 0,02\%$ ;  $\gamma_{C1} = \gamma_{C2} = 0,3\%$ ;  $\gamma_{C3} = 1\%$ .

Проведенный вычислительный эксперимент показал, что метод резонансной последовательно-параллельной идентификации позволяет определять параметры резистивно-емкостных объектов с распределенными параметрами. При этом может быть определены четыре параметра схемы замещения. В случае необходимости определения большего количества параметров измерительный эксперимент должен производиться на нескольких частотах, что позволит сформировать систему, содержащую большее количество уравнений.

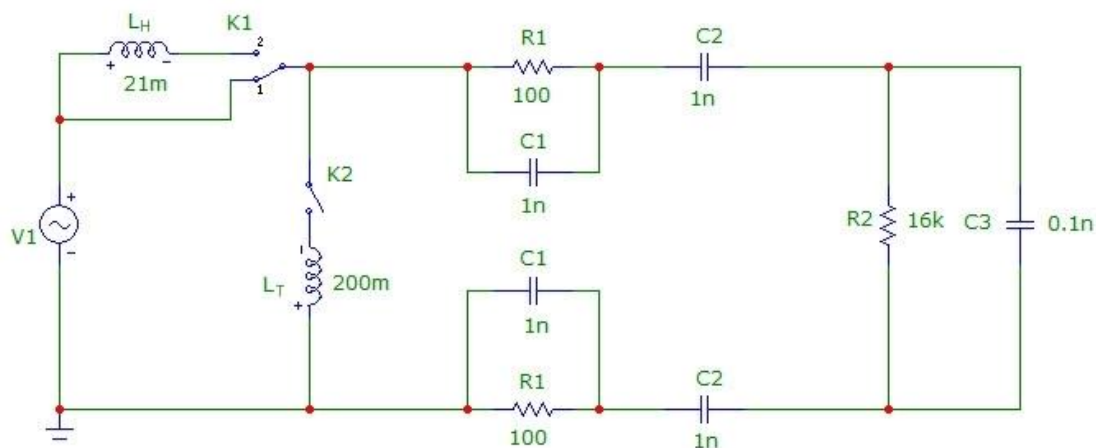


Рис. 3. Схема замещения в Micro-CAP 9.0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод позволяет определять параметры резистивно-емкостных датчиков с распределенными параметрами. В случае необходимости определения большего количества параметров измерительный эксперимент должен производиться на нескольких частотах, что позволит сформировать систему, содержащую большее количество уравнений. Проведенный эксперимент показывает, что при данном методе погрешность расчетов не превышает 1 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шайхутдинов Д.В. Адаптивная подсистема автоматического управления производством интеллектуальных электроприводов / Д.В. Шайхутдинов, Н.И. Горбатенко, К.М. Широков, В.В. Гречихин, А.М. Ланкин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1. URL: <http://www.science-education.ru/125-20095>.
2. Кончаловский В.Ю. Электрические измерительные преобразователи / В.Ю. Кончаловский, Я.А. Купершмидт, Р.Я. Сыропятова, Р.Р. Харченко. – М.-Л.: Энергия, 1968. – 408 с.
3. Шарапов В.М. Датчики: Справочное пособие / В.М. Шарапов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой, Г.Г. Ишанин, И.Г. Минаев, А.С. Совлуков. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.
4. Андреев А.Н. Измерительные преобразователи датчиков перемещения / А.Н. Андреев, А.И. Мартяшин, Б.Л. Свистунов, В.И. Чернецов // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. научн. тр. – Пенза: ПГТУ, 1995. – С. 47.-52.
5. Андреев А.Н. Особенности проектирования резистивно-емкостных датчиков / А.Н. Андреев, М.В. Чернецов, В.И. Чернецов // Комплексное обеспечение точности автоматизированных производств: тезисы докл. Международной конф. (Пенза, 1995 г.). – С. 204.-207.
6. Бровка И.В. Высокочувствительный датчик малых перемещений / И.В. Бровка, М.В. Чернецов, В.И. Чернецов // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. научн. тр. – Пенза: ПГТУ, 1996. – С. 42.-46.
7. Зябиров А.Х., Мартяшин А.И., Чернецов В.И. Способ преобразования параметров резистивно-емкостных

датчиков / А.Х. Зябиров, А.И. Мартяшин, В.И. Чернецов // Цифровая информационно измерительная техника: Межвуз. сб. научн. тр. – Пенза: ПГТУ, 1986. – С. 24.-28.

8. Алиев Т.М. Измерительная техника. / Т.М. Алиев, А.А. Хачатуров. – М.: Высшая школа, 1991. – 382 с.

9. Гроп Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979. – 302 с.

10. Амелина М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. / М.А. Амелина, С.А. Амелин. – Смоленск: Смоленский ф-ал НИУ МЭИ, 2012. – 617 с.

11. Аладьев В.З. Программирование и разработка приложений в Maple. / В.З. Аладьев, В.К. Бойко, Е.А. Ровба. – Гродно: Межд. Акад. Ноосферы, 2007. – 458 с.

12. Lankin A.M. Development of principles of computer appliance functioning, determination of characteristics of the biological object / A.M. Lankin, M.V. Lankin, G.K. Aleksanyan, N.D. Narakidze // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – vol. 10, no.3. – P. 6489-6498.

13. Gorbatenko N.I. Determination of weber-ampere characteristic for electrical devices based on the solution of harmonic balance inverse problem / N.I. Gorbatenko, A.M. Lankin, M.V. Lankin, D.V. Shayhutdinov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – vol. 10, no.3. – P. 6509-6519.

14. Lankin A.M. Determination of Weber-Ampere Characteristics of Electric Devices Using Solution of Inverse Problem of Harmonic Balance / A.M. Lankin, M.V. Lankin, N.I. Gorbatenko, D.V. Shaykutdinov // Modern Applied Science. – 2015. – vol. 9, no.8.

15. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

16. Ланкин М.В. Методика метрологической аттестации устройств автоматического контроля // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2003. – №1. – С. 69.-72.

17. Ланкин М.В. Метрологическое обеспечение процессорных средств испытания постоянных магнитов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2004. – №3. – С. 69.-73.

## Method of Resonant Series-Parallel Identification

Tkachenko G.I., Baklanov A.N.  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)  
Novocherkassk, Russian Federation  
[baklanov-88@mail.ru](mailto:baklanov-88@mail.ru)

**Annotation.** This paper describes a method of resonant series-parallel identification of parameters of resistive-capacitive sensors and the solution of the system object model that allows you to define its parameters, inaccessible to direct measurements. Of computational experiments showed that the method of resonant series-parallel identification allows you to define the parameters of RC-objects with distributed parameters. The proposed method

has the following advantages: high speed while maintaining the desired accuracy of measurement and a small error in calculations.

**Keywords:** resistive-capacitive sensors, the solution of equations, the method of resonant series-parallel identification.

# Решение обратной задачи гармонического баланса методом натурно-модельных испытаний электротехнических устройств\*

Горбатенко Н. И., Ланкин М.В., Ланкин А.М.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
г. Новочеркасск, Российская Федерация

[lankinjohn@rambler.ru](mailto:lankinjohn@rambler.ru)

**Аннотация.** В статье описано решение обратной задачи гармонического баланса методом натурно-модельных испытаний, для получения гистерезисных вебер-амперных характеристик электротехнических устройств. В ходе диагностики электротехнических устройств переменного тока зачастую необходимо получать гистерезисную вебер-амперную характеристику. При намагничивании магнитного материала переменным полем петля гистерезиса, характеризующая затраты энергии за один цикл перемагничивания, расширяется за счет возникновения потерь на вихревые токи и потерь на последствие. Целью исследования является разработка методики определения гистерезисных вебер-амперных характеристик на основе решения обратной задачи гармонического баланса для электротехнических устройств. Методика базируется на проведенных ранее исследованиях по получению вебер-амперных характеристик электротехнических устройств, а так же вебер-амперных характеристик рабочего цикла электротехнических устройств переменного тока.

**Ключевые слова:** вебер-амперная характеристика, гармонический баланс, метод натурно-модельных испытаний.

## ВВЕДЕНИЕ

Системы автоматического управления производством позволяют повысить эффективность использования материалов и эксплуатационные параметры электротехнических устройств (ЭУ). Не возможно создать систему управления производственным процессом без эффективных методов и средств контроля выпускаемой продукции [1]. Из проведенных исследований [2] известно, что вебер-амперная характеристика (ВАХ) ЭУ переменного тока позволяет определять работоспособность ЭУ и тип неисправности.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ВАХ ЭУ

ВАХ полученная при протекании переменного тока по рабочей обмотке ЭУ будет иметь гистерезисный характер. При измерении такой ВАХ необходимо учитывать два явления: искажение формы кривой и сдвиг по фазе между магнитным потоком  $\Phi$  и током в катушке  $I$ , создающем этот поток. Зависимость между  $\Phi$  и  $I$  определяется формой динамической петли, поэтому при синусоидальном изменении одной из рассматриваемых величин в общем случае вторая будет изменяться не синусоидально (появятся высшие гармоники).

Отставание по фазе кривой потока от кривой тока объясняется действием вихревых токов и магнитной вязко-

стью. Угол отставания  $\delta$  называется углом потерь [3].

Для учета явлений искажения формы кривой и наличия сдвига по фазе в зависимости  $\Phi = f(I)$  при намагничивании переменным полем В.К. Аркадьевым [4] было предложено заменить реальную динамическую петлю эквивалентным эллипсом, для которого справедливо уравнения в координатах  $\Phi$  и  $I$ :

$$i(t) = I_{max} \sin(\omega t); \quad (1)$$

$$\Phi(t) = \Phi_{max} \sin(\omega t - \delta). \quad (2)$$

Если ввести в составляющую потока  $\Phi_{max1} = \Phi_{max} \cos \delta$ , совпадающую по фазе с направлением  $I$ , и составляющую  $\Phi_{max2} = \Phi_{max} \sin \delta$ , отстающую на  $90^\circ$  от направления  $I$ , тогда [5]  $\Phi_{max1}$  связана с обратимыми процессами превращения энергии при перемагничивании, а  $\Phi_{max2}$  – с необратимыми. Выражение (2) примет вид:

$$\Phi(t) = \Phi_{max1} \sin(\omega t) - \Phi_{max2} \cos(\omega t). \quad (3)$$

Мы предлагаем метод определения петли  $\Phi = f(I) + \Phi_{max2} \cos(\omega t)$  в котором учитывается ее гистерезисный характер. Для этого будем осуществлять решение обратной задачи гармонического баланса методом натурно-модельных испытаний [6-11], объединяющим измерение на физическом объекте и моделирование исследуемого объекта. Метод позволяет определить форму петли  $\Phi = f(I) + \Phi_{max2} \cos(\omega t)$ , по известному протекающему через катушку электротехнического устройства току, заданному в виде разложения в ряд Фурье:

$$i(t) = \sum_{m=1}^n I_{(2m-1)} \sin((2m-1)\omega t), \quad (4)$$

где  $I_{(2m-1)}$  – амплитуда  $(2m-1)$ -ой гармоники тока и по известной форме и амплитуда  $U_a$  напряжения приложенного к катушке электротехнического изделия:

$$u(t) = U_a \sin(\omega t). \quad (5)$$

Обратимая составляющая гистерезисной вебер-амперная характеристика электротехнического изделия, задана аппроксимирующим выражением:

$$\Phi(i) = \sum_{m=1}^n k_{(2m-1)} i^{2m-1}, \quad (6)$$

где  $\Phi$  – значение магнитного потока,  $k_{(2m-1)}$  – коэффициенты аппроксимирующего выражения вебер-амперной характеристики,  $m = (1, n)$ ,  $n$  – количество слагаемых в аппроксимирующем выражении,  $i$  – сила тока протекающего через катушку электротехнического изделия.

\* Результаты работы получены при поддержке проекта № 1.2690.2014/К "Методы решения обратных задач диагностики сложных систем (в технике и медицине) на основе натурно-модельного эксперимента", выполняемого в рамках проектной части государственного задания с использованием оборудования ЦКП "Диагностика и энергоэффективное электрооборудование" ЮРГПУ (НПИ).

Задача формулируется следующим образом. Имеется электротехническое устройства с неизвестной гистерезисной ВАХ, известны законы изменения напряжения (5) приложенного к нелинейной индуктивности и протекающего по ней тока (4). Требуется определить коэффициенты  $k_{(2m-1)}$  выражения (6), аппроксимирующего гистерезисную вебер-амперную характеристику и амплитуду необратимой составляющей потока  $\Phi_{max2}$ .

Запишем уравнение цепи электротехнического устройства:

$$u(t) = Ri + \frac{d\Phi}{dt}$$

Перепишем его с учетом известных законов изменения тока (4) и напряжения (5):

$$U_a \sin \omega t = R \left( \sum_{m=1}^n I_{(2m-1)} \sin((2m-1)\omega t) \right) + \frac{d \sum_{m=1}^n k_{(2m-1)} \sum_{m=1}^n (I_{(2m-1)} \sin((2m-1)t\omega))^{2m-1}}{dt} + \Phi_{max2} \sin(\omega t) \quad (7)$$

Проведены эксперименты, где в качестве метода для определения гистерезисной вебер-амперной характеристики использовался Алгоритм натурно-модельных испытаний применительно к нашей задаче состоит в следующем: на электромагнит подается синусоидальное напряжение и с помощью датчиков тока и напряжения производятся измерения входного (напряжение) и выходного (ток) сигналов электромагнита, далее полученные данные поступают в персональный компьютер, где в модель задаются входные данные и получают выходные данные модели, а с помощью оптимизационного алгоритма добиваются совпадения выходных данных электромагнита и его модели. При совпадении выходных данных строится полученная на последней итерации вебер-амперная характеристика. В качестве основы построения оптимизационного алгоритма работы управляющей программы используем метод симплекс-оптимизации [12]. Разработана программа реализующая модель электротехнического устройства [13-15] и оптимизационная программа на основе симплекс-планирования [13-15].

#### РЕАЛИЗАЦИЯ НАТУРНО-МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ВАХ ЭУ

Проведен ряд опытов подтверждающих успешную реализацию метода. На рис. 1 приведены графики форм тока на первой итерации симплекс-оптимизации.

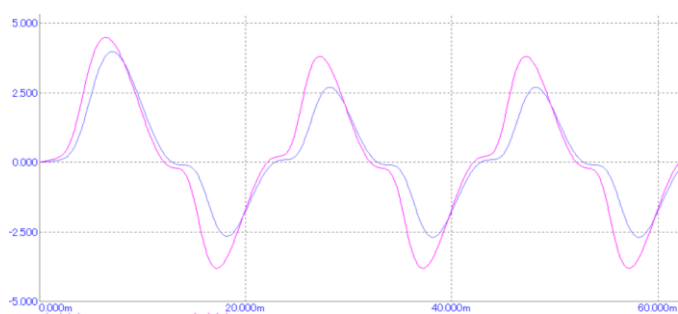


Рис. 1. Формы тока полученная на физическом объекте и в эмуляторе при первой итерации симплекс-оптимизации

Из рис. 1 видно, что формы тока физического объекта и эмулятора имеют существенные различия, как и гистерезисные ВАХ рис. 2.

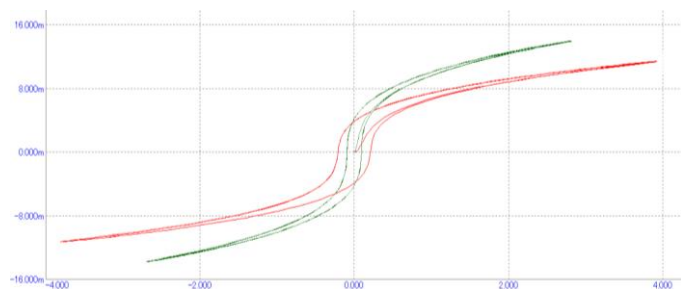


Рис. 2. Гистерезисные ВАХ физического объекта (1) и эмулятора (1) после первой итерации симплекс-оптимизации

Программой оптимизации было проведено 34 итерации, в результате которых форма тока полученная в эмуляторе (2) приближалась к форме тока физической модели (1) (рис. 3).

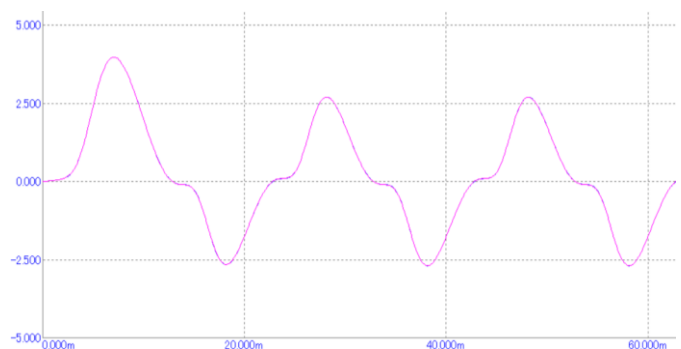


Рис. 3. Формы тока полученная на физическом объекте и в эмуляторе на последней итерации

На рис. 4 ВАХ полученная на последней итерации и на физическом объекте.

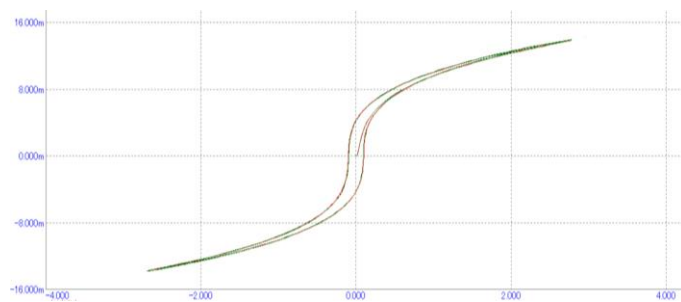


Рис. 4. Вебер-амперные характеристики физической модели и смоделированная в эмуляторе при последней итерации симплекс-оптимизации

Проведено исследование [13-16] влияния погрешности измерения гармоник тока на точность метода определения вебер-амперных характеристик. Значения гармоник тока варьировались в интервале  $\pm 4,4\%$ , дополнительная погрешность получения вебер-амперных характеристик не превысила  $1\%$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Предложенный метод является актуальным для систем контроля и его возможно использовать для получения гистерезисных магнитных характеристик электротехниче-



ских устройств как при их производстве, так и в ходе их эксплуатации. Метод позволяет получить характеристику электротехнического устройства с погрешность не превышающей 3 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шайхутдинов Д.В. Адаптивная подсистема автоматического управления производством интеллектуальных электроприводов / Д.В. Шайхутдинов, Н.И. Горбатенко, К.М. Широков, В.В. Гречихин, А.М. Ланкин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/125-20095>.
2. Gadyuchko A. Magnetische Messung – Neue Wege der Funktionsprüfung bei der Herstellung von Magnetaktoren / A. Gadyuchko, E. Kallenbach // Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik. – Würzburg. – 2010. – P. 59-64.
3. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард. – М.: Высш. шк., 1986. – 352 с.
4. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах. Часть 2. – Москва-Ленинград: Главная редакция энергетической литературы, 1936. – 303 с.
5. Поливанов К.М. Ферромагнетики: основы теории технического применения. – Л.: Энергоиздат, 1957. – 256 с.
6. Ланкин А.М. Метод измерения вебер-амперной характеристики электротехнических устройств / А.М. Ланкин, М.В. Ланкин // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1; URL: <http://www.science-education.ru/115-12186>.
7. Ланкин А.М. Метод измерения вебер-амперной характеристики базирующийся на решении обратной задачи МГБ / А.М. Ланкин, М.В. Ланкин, Н.Д. Наракидзе // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – URL: <http://www.science-education.ru/118-13942>.
8. Ланкин А.М. Применение алгоритма натурно-модельных испытаний для диагностики электротехнических систем / А.М. Ланкин, М.В. Ланкин, В.А. Кучеров, О.А. Наугольнов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/125-19975>.
9. Ланкин А.М. Метод измерения вебер-амперной характеристики электротехнических устройств / А.М. Ланкин, М.В. Ланкин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/115-12186>.
10. Lankin A.M. Getting weber-voltage characteristics using the method of harmonic balance / A.M. Lankin, M.V. Lankin // The Second International Conference on Eurasian scientific development Proceedings of the Conference. – 2014. – С. 264-270.
11. Gorbatenko N.I. Determination Of Weber-Ampere Characteristic For Electrical Devices Based On The Solution Of Harmonic Balance Inverse Problem / N.I.Gorbatenko, A.M. Lankin, M.V. Lankin, D.V. Shayhutdinov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 3. – P. 6509-6519.
12. Кучеров В.А. Программа симплекс-планирования / В.А. Кучеров, А.М. Ланкин, М.В. Ланкин, Л.Г. Тарасова // Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах: сб. науч. статей по материалам 15 Междунар. научн.-практ. конф. – Новочеркасск, 2015. – С. 52-56.
13. Ланкин А.М. Решение обратной задачи гармонического баланса в натурно-модельном эксперименте определения вебер-амперных характеристик электро-технических изделий: монография / А.М. Ланкин, М.В. Ланкин. – Москва: ООО «Книжный перекресток», 2015. – 127 с.
14. Ланкин М.В. Устройства измерения ВАХ электротехнических изделий переменного тока: монография / М.В. Ланкин., А.М. Ланкин – Саарбрюккен: LAP LAMBERT, 2015. – 112 с.
15. Lankin A.M. Determination of Weber-Ampere Characteristics of Electric Devices Using Solution of Inverse Problem of Harmonic Balance / A.M. Lankin, M.V. Lankin, N.I. Gorbatenko, D.V. Shayhutdinov // Modern Applied Science. – 2015. – Vol. 9, № 8. – P. 247-261. DOI: 10.5539/mas.v9n8p247.
16. Ланкин А.М., Ланкин М.В. Определение погрешности измерения вебер-амперной характеристики. Св. № 2015610308 Россия. – Заявл. 06.11.2014 Зарег. 12.01.2015.

# The Solution of the Inverse Problem of Harmonic Balance Method of Natural-Model Tests Electrotechnical Devices

Gorbatenko N.I., Lankin M.V., Lankin A.M.  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)  
Novocherkassk, Russian Federation  
[lankinjohn@rambler.ru](mailto:lankinjohn@rambler.ru)

**Abstract.** This article describes the solution of the inverse problem of harmonic balance method of natural-model tests for hysteresis weber-ampere characteristics of electrotechnical devices. During diagnostics AC electrotechnical devices often need to receive the hysteretic weber-ampere characteristic. When the magnetization of the magnetic material to the alternating field hysteresis loop that characterizes the energy consumption per cycle of magnetization reversal is expanding due to the appearance eddy current losses and loss-effect. The aim of the study is to

develop a methodology for determining the hysteresis Weber-voltage characteristics based on the inversion harmonic balance for electrotechnical devices. The technique is based on the previously conducted studies to obtain weber-ampere characteristics of electrical electrotechnical, as well as the weber-ampere characteristics of the operating cycle of electrotechnical devices AC.

**Keywords:** weber-ampere characteristic, harmonic balance, method of natural-model tests.

**Пром-Инжиниринг**  
**труды международной научно-технической конференции**

22-23 октября 2015 года  
Челябинск-Новочеркасск

Текстовое электронное издание

30,2 Мб

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

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано к использованию 14.11.2015.  
Заказ 512.

---

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76