

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ А.Н. КОСЫГИНА  
(ТЕХНОЛОГИИ. ДИЗАЙН. ИСКУССТВО)**



United Nations  
Educational, Scientific and  
Cultural Organization

Организация  
Объединенных Наций по  
вопросам образования,  
науки и культуры

Under the patronage of  
**UNESCO**

Под патронатом  
**ЮНЕСКО**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОСЫГИНСКИЙ ФОРУМ**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СИМПОЗИУМ  
«ВТОРЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ:  
«ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ  
БЕЗОПАСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ»,  
ПРИУРОЧЕННЫЕ К 100-ЛЕТИЮ РГУ ИМЕНИ А.Н. КОСЫГИНА»**

**Симпозиум проводится под эгидой всемирной федерации инженерных  
организаций (WFEO)**

**при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных  
исследований – проект № 19-08-20053/19**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ  
(ТОМ 2)**

**МОСКВА  
29 ОКТЯБРЯ – 1 НОЯБРЯ 2019 ГОДА**

УДК 66.02(06)

С 56

**ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ** [Текст]: сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина»: Т. 2 / М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2019. – 260 с.

**ISBN 978-5-87055-815-8**

В сборник включены статьи российских и зарубежных ученых, в которых приводятся результаты научных исследований энергоресурсоэффективных процессов и технологических систем, их проектирования и конструктивного оформления, рассматриваются современные пути энергоресурсосбережения в технологических процессах и оборудовании в химической, текстильной, лёгкой, пищевой и других отраслях промышленности и агропромышленного комплекса и методы повышения энергоресурсоэффективности процессов, оборудования и производств, вопросы производственной и экологической безопасности.

**ISBN 978-5-87055-815-8**

УДК 66.02(06)

© ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»,  
2019

© Авторы статей, 2019

**Международный научно-технический симпозиум (МНТС)**

«Вторые международные Косыгинские чтения:  
«Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование», приуроченные к 100-летию РГУ имени А.Н. Косыгина»

**проводится в РГУ имени А.Н. Косыгина в рамках  
Международного Косыгинского Форума  
29 октября – 1 ноября 2019 года**

**Организаторами Симпозиума являются:**

- Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
- Российская академия наук
- Российский Союз научных и инженерных общественных объединений
- Российское химическое общество имени Д.И. Менделеева
- Российская инженерная академия
- Евразийский информационно-аналитический консорциум
- Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)
- Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН РФ
- Комитет РосСНИО по проблемам энергоресурсоэффективных химических технологий
- Комитет РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов
- Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси
- Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
- Московский государственный университет пищевых производств

**Рабочие языки Симпозиума: русский и английский.**

**Материалы публикуются в авторской редакции.**

**ПРОГРАММНЫЙ (НАУЧНЫЙ) КОМИТЕТ  
МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СИМПОЗИУМА  
«ВТОРЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ:  
«ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ  
БЕЗОПАСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ»,  
ПРИУРОЧЕННЫЕ К 100-ЛЕТИЮ РГУ им. А. Н. КОСЫГИНА»**

**Председатель комитета:**

Президент Российского Союза научных и инженерных общественных объединений (РосСНИО), Президент Академии инженерных наук имени А. М. Прохорова, академик РАН **Гуляев Юрий Васильевич**

**Сопредседатели комитета:**

Ректор Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), профессор

**Белгородский Валерий Савельевич;**

Президент Российского химического общества имени Д.И. Менделеева академик РАН **Цивадзе Аслан Юсупович;**

Президент Российской инженерной академии, член-корреспондент РАН **Гусев Борис Владимирович;**

Заместитель Президента РАН, член Президиума РАН, член-корреспондент РАН, **Иванов Владимир Викторович;**

Вице-президент РХО им. Д.И. Менделеева, профессор

**Кулов Николай Николаевич;**

Член правления РХО имени Д.И. Менделеева, директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики академик РАН **Мешалкин Валерий Павлович.**

**Учёный секретарь комитета:**

профессор РГУ имени А.Н. Косыгина **Кошелева Мария Константиновна** (тел. моб. 8 (926) 355 04 48, e-mail: oхtрaxt@ya.ru).

**Информационное обеспечение Симпозиума на сайтах**  
**<https://www.eeste.org>, <http://chemtech-committee.ru>**

**Состав комитета:**

Абиев Р.Ш. проф. (Россия), Акулич А.В. проф. (Беларусь), Акулич П.В. проф. (Беларусь), Бабкин В.В. проф. (Россия), Балыхин М.Г. проф. (Россия), Белгородский В.С. проф. (Россия), Блиничев В.Н. проф. (Россия), Бокова Е.С. проф. (Россия), Вошкин А.А. проф. (Россия), Гуляев Ю.В. акад. РАН (Россия), Гусев Б.В., чл.-корр. РАН (Россия), Дорняк О.Р. проф. (Россия), Друкаренко С.П. д-р (Россия), Иванов В.В. чл.-корр. РАН (Россия), Кильдеева Н.Р. проф. (Россия), Кобраков К.И. проф. (Россия), Кошелева М.К. проф. (Россия), Кулов Н.Н. проф. (Россия), Левицкий С.П. проф. (Израиль), Леонтьев Л.И. акад. РАН (Россия), Лесовик В.С. чл.-корр. РААСН (Россия), Лукачевский Б.П. д-р. (Россия), Мешалкин В.П. акад. РАН (Россия), Мизонов В.Е. проф. (Россия), Павлюкевич Н.В., чл.-корр. НАН Р. Беларусь (Беларусь), Рудобашта С.П. проф. (Россия), Тураев А.С. акад. Академии наук р. Узбекистан (Узбекистан), Федосов С.В. акад. РААСН (Россия), Хмелёв В.Н. проф. (Россия), Холькин А.И. акад. РАН (Россия), Цивадзе А.Ю. акад. РАН (Россия), Черепенин В.А. чл.-корр. РАН (Россия), Юртов Е.В. чл.-корр. РАН (Россия), Alves-Filho O. prof. (Norway), Berthiaux Henri prof. (France), Dang Vu Minh, prof. (Vietnam), David Fletcher, prof. (Australia), Ditl P. prof. (Czech Reb.), Dmitry Yu. Murzin, prof. (Finland), Faiçal Larachi, prof. (Canada), Gerhardt Ribatski, prof. (Brazil), Gong K.E., prof. (China), Jirout T. prof. (Czech Reb.), Jürgen Brandner, prof. (Germany), Kiwi-Minsker Liubov, prof. (Switzerland), Thomas Kiefer, prof. (Germany), Krawczyk J. prof. (Poland), Mark Simmons, prof. (UK), Martin Woerner, prof. (Germany), Martine Poux, prof. (France), Martyn Poliakoff, prof. (UK), Mechtcherin Victor prof. (Germany), Mujumdar Arun S, prof. (Canada, Singapore), Rieger F. prof. (Czech Reb.), Ritunesh Kumar, prof. (India), Smechowski Krzysztof, prof. (Poland), Środulska-Krawczyk Małgorzata, prof. (Poland), Tapio Salmi, prof. (Finland), Volker Hessel, prof. (Netherlands).

**ОГЛАВЛЕНИЕ****СЕКЦИЯ 3. «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ» ..... 11****А. Г. ЛИПИН, А. А. ЛИПИН**

КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ РАСТВОРА НИТРАТА АММОНИЯ В ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОМ АППАРАТЕ..... 11

**С. В. ФЕДОСОВ, В. Е. РУМЯНЦЕВА, В. С. КОНОВАЛОВА, И. В. КАРАБАЕВ, А. С. ЕВСЯКОВ**

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ КОРРОЗИИ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ ..... 14

**А. В. ШАЛУНОВ, В. Н. ХМЕЛЕВ, В. А. НЕСТЕРОВ, Р. Н. ГОЛЫХ, А. С. БОЧЕНКОВ**

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ..... 18

**А. С. СЕВРЮКОВ, А. С. ПУШНОВ, М. Г. БЕРЕНГАРТЕН**

ТЕПЛОВЫЕ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ НАСАДКИ ИЗ ТКАННОГО МАТЕРИАЛА ..... 23

**А. В. МИТРОФАНОВ, Е. А. ШУИНА, И. А. ТИХОМИРОВА, К. TANNOUS**

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В АППАРАТЕ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ..... 26

**В. П. ЖУКОВ, А. Е. БАРОЧКИН, Н. OTWINOWSKI**

МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОПОТОЧНЫХ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ СО СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ПОТОКОВ..... 28

**Р. Н. ГОЛЫХ, В. Н. ХМЕЛЁВ, А. В. ШАЛУНОВ, Р. А. ЛОПАТИН, В. Д. МИНАКОВ, В. А. ШАКУРА, Е. В. ИЛЬЧЕНКО**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СИСТЕМ С ЖИДКОЙ ФАЗОЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ..... 31

**С. В. ВОРОБЬЕВ, И. В. ПОСТНИКОВА, В. Н. БЛИНИЧЕВ**

ГИДРОДИНАМИКА СВОБОДНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ В АППАРАТЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ..... 36

**А. Н. ВЕЛЕШКО, Н. Р. КИЛЬДЕЕВА, В. К. ОЖОГИНА, Е. В. РУМЯНЦЕВА, Н. В. ПАЛЬ**

СОРБЦИЯ УРАНА НА ВОЛОКОНИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ EUDRAGIT ИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ..... 42

**В. Н. ГРУНСКИЙ, М. Г. ДАВИДХАНОВА, М. Д. ГАСПАРЯН, С. Е. ЗОЛОТУХИН**

КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ..... 45

**Л. И. ЖМАКИН, Н. М. ШАРПАР, З. Н. ОСМАНОВ, А. Н. СОРОКИН**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ УСЛОВИЙ НА ПАРПРОНИЦАЕМОСТЬ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ..... 51

**Э. П. ДЯЧЕНКО, П. И. ГРИГОРЬЕВ, А. М. МЕНЬШИХ**

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПЛОДОВ ТОМАТА .... 55

**С. В. ВЕНДИН, А. Ю. МАМОНТОВ**

К РАСЧЕТУ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ПОДОГРЕВЕ БИОМАССЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ БИОГАЗОВОМ РЕАКТОРЕ ..... 58

**А. В. МАКАРОВ, Ю. А. МАКСИМЕНКО, Э. П. ДЯЧЕНКО, КАО ТХИ ХУЕ**

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННОЙ ПЕНОСУШКИ ЖЕЛАТИНОВОГО БУЛЬОНА ИЗ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ РЫБЫ..... 61

<b>М. Г. ЕРМОЧЕНКОВ, Ю. П. СЕМЕНОВ</b> ПОЛУЧЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ .....	64
<b>А. С. КАРПЕНКО, А. С. ПУШНОВ, М. Г. БЕРЕНГАРТЕН</b> ИСПЫТАНИЕ РЕГУЛЯРНОЙ СОТОВОЙ НАСАДКИ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА В КОЛОННЫХ АППАРАТАХ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ .....	68
<b>В. Ф. СОРОЧИНСКИЙ, А. Л. ДОГАДИН</b> ИЗМЕНЕНИЕ МАССООБМЕННОГО КРИТЕРИЯ КИРПИЧЕВА ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ ЗЕРНА .....	72
<b>С. Ю. БОГАЧЕВА</b> МЕТОД ОЦЕНКИ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ОТДЕЛЬНОЕ ВОЛОКНО .....	77
<b>И. Л. БОШКОВА, Н. В. ВОЛГУШЕВА, Л. А. ЖАРИКОВА</b> МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ МИКРОВОЛНОВОЙ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН.....	81
<b>Б. Б. ВИЛЕНЧИЦ, В. К. ПОПОВ, Г. В. ШАРОНОВ</b> СВОЙСТВА КОНТРОЛИРУЕМЫХ АТМОСФЕР ИЗ РАЗНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА.....	84
<b>Е. ЗАБОЛОТНАЯ, И. И. МЕНЬШОВА</b> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕМБРАННОЙ СИСТЕМЫ В ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД .....	87
<b>В. А. КОЗЛОВ, Т. Е. НИКИФОРОВА</b> ХЕМОСОРБЦИЯ КАТИОНОВ МЕТАЛЛОВ ( $M^{2+}$ ) БИОПОЛИМЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ .....	90
<b>Т. Л. ПЛАТОНОВА, В. Я. ЭНТИН, В. В. ВАСИЛЬЕВА</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ШВЕЙНЫХ НИТЕЙ ДЛЯ НАМАТЫВАНИЯ НА БОБИНЫ.....	94
<b>П. С. ВАСИЛЬЕВ, Л. С. РЕВА, А. Б. ГОЛОВАНЧИКОВ</b> ТЕМПЕРАТУРА МАКСИМАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА КАПЕЛЬНОГО КИПЕНИЯ ЖИДКОСТИ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ .....	98
<b>Е. В. РОМАНОВА, А. Н. КОЛИУХ</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОРЕБРЕННОГО РЕКУПЕРАТОРА .....	103
<b>В. Я. БОРЩЕВ*, Т. А. СУХОРУКОВА</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСРЕДНИТЕЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ .....	106
<b>А. Н. ПАХОМОВ, Н. Ц. ГАТАПОВА, Ю. В. ПАХОМОВА</b> НЕКОТОРЫЕ КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ПЛАСТИФИКАТОРОВ ВО ВСПЕНЕННОМ СОСТОЯНИИ .....	109
<b>К. В. ТАРАНЦЕВ, С. И. ПОНИКАРОВ, К. Р. ТАРАНЦЕВА</b> КРИТЕРИИ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КАЧЕСТВА РАБОТЫ АППАРАТОВ ЭЛЕКТРООБЕССОЛИВАЮЩИХ УСТАНОВОК .....	112
<b>Д. А. МАКАРЕНКОВ, В. И. НАЗАРОВ, В. А. БУХРЯКОВА, С. Л. ЛОБАСТОВ, А. П. ПОПОВ</b> РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СУСПЕНЗИИ ЧАСТИЦ ГИДРОГЕЛЯ С НЕОРГАНИЧЕСКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ.....	117

<b>СЕКЦИЯ 4. «ИНФОРМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ И ПРОЦЕССАМИ» .....</b>	<b>120</b>
<b>Б. В. ГУСЕВ, А. С. ФАЙВУСОВИЧ</b> О ПОСТРОЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ... 120	120
<b>Д. Б. РЫКЛИН, В. В. ДАВИДЮК</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРЯЖИ С ВЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ВОЛОКОН .....	130
<b>А. С. БЕЛОУСОВ, В. В. ГОЛОВАНОВ, Ю. А. ГЕЛЛЕР</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ 3-D СТРУКТУР ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ВИХРЕВЫХ АППАРАТАХ .....	134
<b>Н. А. САМОЙЛОВ</b> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕАКТОРНОГО БЛОКА УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА.....	139
<b>В. О. КУЗНЕЦОВА</b> ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОЛОГИХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД .....	142
<b>О. И. СЕДЛЯРОВ, Е. С. БОРОДИНА, А. П. ПОЛИЕФТОВА, М. П. ТЮРИН, О. С. МОРГУН</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ АЭРОДИНАМИКИ ИНЕРЦИОННЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ .....	147
<b>А. Г. ВАЛЕЕВА, М. Ю. ВОЖДАЕВА</b> МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ .....	152
<b>С. Н. БУЛИКОВ, Я. Э. ТЕНДЕР</b> БЛОКЧЕЙН КАК РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В ОТРАСЛЕВЫХ ПРОЕКТАХ (СТРОИТЕЛЬСТВО) .....	156
<b>И. Н. ХАМРОЕВА, Х. Р. ХУДОЙКУЛИЕВ</b> ПОВЫШЕНИЕ РОЛИ МАРКЕТИНГА В ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ .....	162
<b>О. Р. ДОРНЯК, В. М. ПОПОВ, Н. А. АНАШКИНА</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВОЛНИСТЫЕ ПОВЕРХНОСТИ .....	167
<b>И. Э. ИВОНИНА, И. Н. ХАМРОЕВА, М. К. КАРИМОВ, Ф. З. ЮСУПХОДЖАЕВА</b> ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ УЗБЕКИСТАНА .....	170
<b>В. П. КРИВОШЕЕВ, А. В. АНУФРИЕВ</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЭТАПНОГО МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДЕКОМПОЗИЦИОННОГО ПОДХОДА ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ИЗОПРЕНА.....	176
<b>Н. А. СМИРНОВА, В. С. БЕЛГОРОДСКИЙ, Е. Г. АНДРЕЕВА, В. В. ЗАМЫШЛЯЕВА, Н. А. БАЛАКИРЕВ, М. А. ГУСЕВА, А. В. РАЗБРОДИН</b> КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОНФЕКЦИОНИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ.....	180

<b>В. Н. ХМЕЛЁВ, Р. Н. ГОЛЫХ, В. В. ПЕДДЕР, И. А. ПАСТУШЕНКО, А. И. ШЕПЕЛЕВА, В. А. НЕСТЕРОВ</b> КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭКСТРАКЦИИ ПАТОЛОГИЧЕСКОГО СОДЕРЖИМОГО ИЗ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	186
<b>С. В. ЧЕРЕМНЫХ, П. О. СКУДАЛОВ</b> ГРАНИЦЫ ЗОН ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДОГРУЗКИ И УПРУГОЙ РАЗГРУЗКИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ СТАЛИ 40Х.....	190
<b>Л. МУСАБЕКОВА</b> РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АГРЕГАЦИИ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ .....	194
<b>С. В. ОСЬКИН, Д. С. ЦОКУР, С. П. ВОЛОШИН</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДИАФРАГМЕННОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ .....	199
<b>П. О. СКУДАЛОВ, С. В. ЧЕРЕМНЫХ</b> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОНОЛИТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ИНЖЕНЕРНЫМИ МЕТОДАМИ .....	204
<b>П. А. СЕВОСТЬЯНОВ, Т. А. САМОЙЛОВА, М. Л. ТИХОМИРОВА</b> КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДЕФОРМАЦИЙ ТКАНЫХ ПОЛОТЕН .....	208
<b>О. Р. ДОРНЯК, В. М. ПОПОВ, А. Н. ВНУКОВ, Н. А. АНАШКИНА</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТА С МАКРО- ОТКЛОНЕНИЕМ.....	212
<b>П. А. СЕВОСТЬЯНОВ, Т. А. САМОЙЛОВА</b> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ УДЛИНЕНИЯ И РАЗРЫВА ТКАНОГО ПОЛОТНА .....	215
<b>Н. Ю. ЕВСИКОВА, Н. С. КАМАЛОВА, Н. А. САВРАСОВА</b> ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ .....	220
<b>А. И. МОХОВ, Е. Р. ОРЛОВА, П. А. ТРЕТЬЯКОВ</b> РЕСУРСООЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ ЦЕПИ ПОСТАВКИ ТОВАРОВ КАК БАЗОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТАМОЖЕННЫХ ОРГАНОВ .....	225
<b>Ф. С. ИСМОИЛОВ, А. М. РАХАТАЛИЕВ, А. А. РАХМОНОВ, М. А. АБДУРАХИМОВ</b> ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА АМИНОВОЙ СЕРООЧИСТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВЫХ КОМБИНАЦИИ РАСТВОРОВ.....	229
<b>О. И. СЕДЛЯРОВ, Е. В. ОТРУБЯННИКОВ, А. П. ПОЛИЕФТОВА</b> ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА МОЮЩИХ СРЕДСТВ .....	233
<b>СЕКЦИЯ 5. «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРЕПОДАВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ДИСЦИПЛИН В ТЕХНИЧЕСКИХ УНИВЕРСИТЕТАХ».....</b>	<b>235</b>
<b>Е. С. БОКОВА, С. Г. ДЕМБИЦКИЙ, Н. В. ЕВСЮКОВА</b> ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В КОНТЕКСТЕ МАГИСТЕРСКОЙ ПОДГОТОВКИ ....	235

---

<b>Е. П. МОРГУНОВА, М. Г. ДАВИДХАНОВА, Т. Н. ГАРТМАН, В. Н. ГРУНСКИЙ, Л. В. РАВИЧЕВ</b> ПРИМЕНЕНИЕ НОВЕЙШИХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ В РХТУ ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА .....	239
<b>В. М. АКУЛИЧ</b> МЕТОДИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРЕПОДАВАНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКИ.....	245
<b>С. П. ДРУКАРЕНКО, М. В. ВОРОБЬЕВА</b> О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СОЮЗА НИО ПО ПОВЫШЕНИЮ КОМПЕТЕНЦИЙ УЧЕНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ .....	248
<b>С. В. ПЕТРОВА-КУМИНСКАЯ, И. А. БУДКУТЕ, Л. А. ЩЕРБИНА</b> ИННОВАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ И ПЕРЕРАБОТКЕ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	252
<b>Т. Ю. ВАСИЛЬЕВА</b> ИННОВАЦИИ В РАЗРАБОТКАХ ПРОГРАММ В ОБЛАСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОЛОГИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ .....	255

### **СЕКЦИЯ 3. «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»**

УДК 66.087.97

#### **КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ РАСТВОРА НИТРАТА АММОНИЯ В ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОМ АППАРАТЕ CONCENTRATION OF AMMONIUM NITRATE SOLUTION IN ELECTROMEMBRANE MACHINE**

**Александр Геннадьевич Липин, Андрей Александрович Липин  
Alexander G. Lipin, Andrey A. Lipin**

*Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново  
Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia, Ivanovo  
(e-mail: piact@isuct.ru)*

**Аннотация:** Приведены результаты экспериментального исследования процесса извлечения нитрата аммония из раствора в лабораторном трехкамерном электромембранном аппарате. Установлен характер влияния режимных параметров на эффективность процесса.

**Abstract:** The results of experimental investigation removal of ammonium nitrate from solutions by electro dialysis technique are presented. Laws of influence of the basic technological parameters on process efficiency are established.

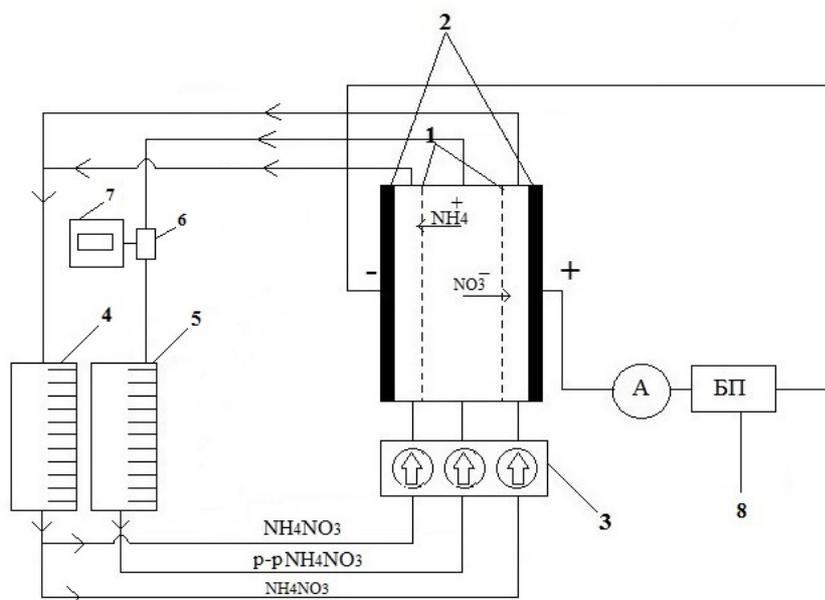
**Ключевые слова:** электродиализ, раствор нитрата аммония, концентрирование, электромембранный аппарат.

**Keywords:** electro dialysis, ammonium nitrate solution, concentrating, electromembrane apparatus.

Эффективное выделение неорганических солей из водных растворов этих веществ может быть осуществлено посредством электродиализа. Электродиализ исторически развивался как метод опреснения воды и позже стал применяться для очистки сточных вод, регенерации технологических растворов, очистки гальваностокков [1]. Еще одним важным применением электродиализа является отделение электролитов из смешанных органоминеральных растворов [2].

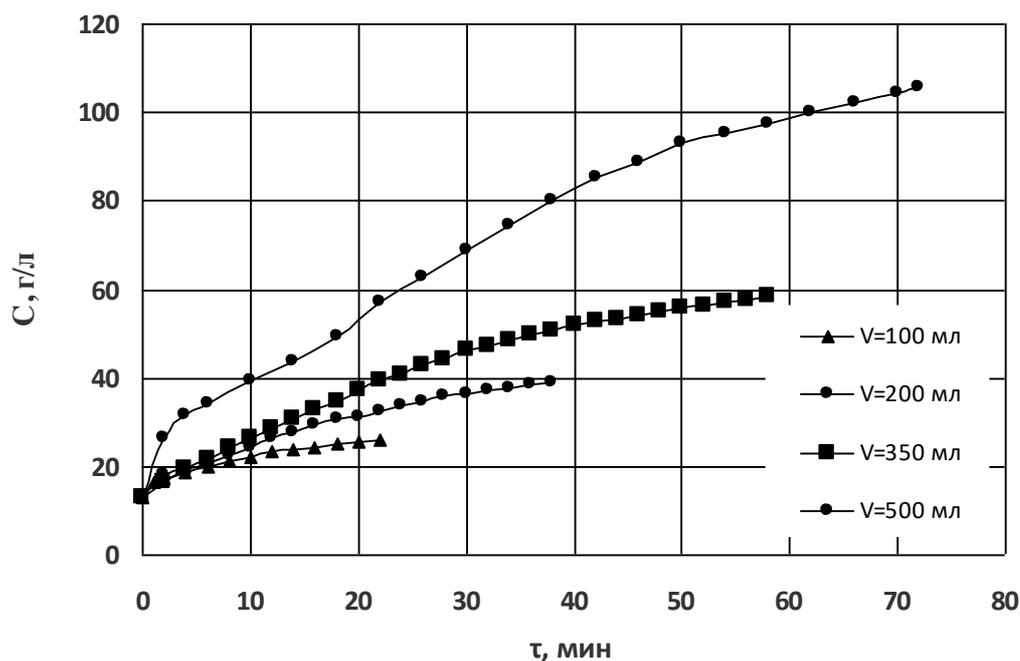
В производстве аммиачной селитры образуются растворы малой концентрации: это конденсат сокового пара выпарных аппаратов, промывные воды и др. Использование электродиализа для обработки сточных азотсодержащих вод позволяет получить более концентрированный солевой раствор и, тем самым, вернуть в технологический процесс значительную долю нитрата аммония, а также обессоленный раствор, который можно вновь использовать в качестве технической воды. Для внедрения данного метода требуются данные о влиянии режимных параметров на процесс электродиализа раствора нитрата аммония.

Исследования проводили на лабораторной установке (рис.1), состоящей из трехкамерного электродиализатора с анионообменной мембраной МА-40 и катионообменной мембраной МК-40, регулируемого источника постоянного тока, перистальтического насоса и контрольных приборов для измерения силы тока и напряжения. В качестве электродов использованы пластины из титана с оксид-рутениевым покрытием (анод) и нержавеющая сталь (катод). Рабочая поверхность каждой мембраны составляла 112 см<sup>2</sup>. Расстояние между электродами и мембранами и расстояние между мембранами составляло 2 мм. Объем каждой камеры равен 22,5 см<sup>3</sup>. Процесс организован по циркуляционной схеме (рис.1).



1 – мембраны, 2 – электроды, 3 – перистальтический насос, 4 – ёмкость концентрата, 5 – ёмкость с исходным раствором, 6 – кондуктометрический датчик, 7 – анализатор жидкости АЖК-3101, 8 – блок питания

**Рисунок 1 – Схема лабораторной установки**



**Рисунок 2 – Графики зависимости концентрации растворов соли нитрата аммония от времени процесса**

Были выполнены эксперименты по исследованию влияния режимных параметров на процесс концентрирования раствора нитрата аммония. Перерабатываемый раствор подавался в среднюю камеру на обессоливание. Через анодную и катодную камеры так же циркулировал раствор нитрата аммония. В средней камере аппарата происходит снижение концентрации соли. Растворы из катодной и анодной камер направляются в одну емкость концентрата 4. Процесс многократно повторяется. Таким образом, в данной емкости концентрация нитрата аммония увеличивается (рис.2), а в емкости исходного раствора 5 уменьшается.

Эксперименты проводились с одинаковыми концентрациями раствора  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , но с различными объемами  $V$  перерабатываемого раствора нитрата аммония в потенциостатическом режиме при разности потенциалов 9 В. Объем обрабатываемого раствора от опыта к опыту увеличивался. Начальный объем раствора в емкости концентрата 4 не изменялся, поэтому степень концентрирования от опыта к опыту возрастала (рис.2). В таблице 1 приведены основные параметры процесса электродиализа:  $\tau$  – продолжительность процесса,  $\eta$  – выход по току,  $i_{\text{ср}}$  – средняя за время опыта плотность тока,  $j_{\text{ср}}$  – среднее значение потока ионов через мембрану,  $C$  – содержание нитрата аммония в концентрате в конце опыта.

**Таблица 1 – Результаты экспериментов**

№	$V$ , мл	$\tau$ , мин	$\eta$ , %	$i_{\text{ср}}$ , А/м <sup>2</sup>	$j_{\text{ср}}$ , 10 <sup>6</sup> моль/с	$C$ , г/л
1	100	22	50	198,5	12,3	26
2	200	38	50	228,8	14,3	39
3	350	58	55,3	239,65	16,34	58,5
4	500	72	62,5	250,7	18,8	105,8

С увеличением объема перерабатываемого раствора усредненные значения концентраций растворов в камерах электродиализатора повышаются, что приводит к увеличению как максимального, так и среднего значения силы тока. Выполненная серия экспериментов показала, что возможно получение концентрированного раствора с содержанием аммиачной селитры 105 г/л. Раствор такой концентрации может подвергаться дальнейшему концентрированию методом упаривания. Таким образом, показана возможность возврата нитрата аммония, содержащегося в сточных водах, в технологический цикл.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пилат Б.В.* Основы электродиализа. М.: Авваллон, 2004. – 456 с.
2. *Липин А.Г.* Кинетика массопереноса при электродиализе растворов органических веществ и электролитов / А.Г. Липин, М.П. Бурчу, А.А. Липин // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2014. – Т. 57. – Вып. 1. – С.112-115.

УДК 66.018.8

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ КОРРОЗИИ  
ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ  
CONTROL OF MASS TRANSFER PROCESSES IN CORROSION OF CEMENT  
CONCRETES**

**Сергей Викторович Федосов, Варвара Евгеньевна Румянцева,  
Виктория Сергеевна Коновалова, Иван Васильевич Караваяев, Артем Сергеевич Евсяков  
Sergey V. Fedosov, Varvara E. Roumyantseva, Viktoriya S. Konovalova,  
Ivan V. Karavaev, Artem S. Evsyakov**

*Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново  
Ivanovo State Polytechnic University, Russia, Ivanovo  
(e-mail: fedosov-academic53@mail.ru, varrym@gmail.com, kotprotiv@yandex.ru,  
ivakaa@gmail.com, smart47@rambler.ru)*

*Аннотация:* Приведены результаты исследований процессов массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов в средах различной степени агрессивности. Проведено исследование влияния гидрофобизирующих добавок на протекающие при жидкостной коррозии цементных бетонов процессы переноса «свободного гидроксида кальция». Рассмотрена возможность управления коррозионной деструкцией цементных бетонов с помощью процесса кольматации.

*Abstract:* The results of studies of mass transfer processes during liquid corrosion of cement concretes in environments of varying degrees of aggressiveness are presented. Investigation of effect of hydrophobic additives on flowing during liquid corrosion of cement concretes processes of transfer of «free calcium hydroxide» was made. The possibility of controlling the corrosion destruction of cement concretes by means of the colmatation process is considered.

*Ключевые слова:* коррозионный массоперенос, математическое моделирование, коррозия бетона, гидрофобизирующие добавки, кольматация, долговечность.

*Keywords:* corrosion mass transfer, mathematical modeling, corrosion of concrete, hydrophobic additives, colmatation, durability.

Поры бетона могут быть наполнены газами (например, азотом, кислородом и  $\text{CO}_2$ , присутствующими в атмосфере) и жидкими веществами (например, водой, в которой растворены различные ионы). Проницаемость бетона важна не только для водоудерживающих конструкций и элементов (труб, каналов или резервуаров), но и является решающим фактором долговечности железобетона. Явления, приводящие к деградации железобетона, зависят от процессов, способствующих переносу воды, углекислого газа, хлорид-ионов, кислорода, сульфат-ионов и других агрессивных частиц внутри бетона.

Движение жидкостей и ионов агрессивных частиц в бетоне может происходить согласно четырем основным механизмам: капиллярное всасывание, проницаемость за счет градиентов давления, диффузии за счет градиентов концентрации и миграции за счет градиентов электрического потенциала [1]. Термин «просачивание» предпочтительнее использовать для обозначения механизма переноса под действием разности давлений с тем, чтобы избежать путаницы со словом «проницаемость», часто используемым для обозначения, в целом, свойств бетона по отношению ко всем механизмам переноса. Кинетика переноса зависит от механизма переноса, от свойств бетона (например, его пористости и наличия трещин), от связывания гидратированной цементной пастой переносимых веществ, а также от условий окружающей среды, воздействующих на поверхность бетона (микроклимата), и их изменений во времени [2].

Так как жидкость, присутствующая в порах, имеет важное влияние как на перенос различных агрессивных веществ, так и на явления деградации, которые могут иметь место в

бетоне, необходимо разрабатывать способы по предотвращению попадания и распространения агрессивной среды в бетоне.

Для того чтобы избежать проникновения воды в структуру бетона необходимо повысить его водостойкость, например, посредством его гидрофобизации. Методы гидрофобной обработки бетона включают в себя снижение водоцементного отношения (В/Ц), использование проницаемой опалубки, введение водонепроницаемого агента и обработку поверхности гидроизоляцией [3, 4]. Все эти методы основаны на увеличении компактности, уменьшении пористости и улучшении шероховатости поверхности бетона.

В течение длительного времени нами изучается жидкостная коррозия I и II видов цементного камня [5-8]. Для исследования процессов, происходящих при этом явлении, определена степень выщелачивания цементного камня.

В таблице 1 представлены результаты испытаний на прочность образцов из портландцемента, подвергавшихся воздействию различных сред в течение 150 суток.

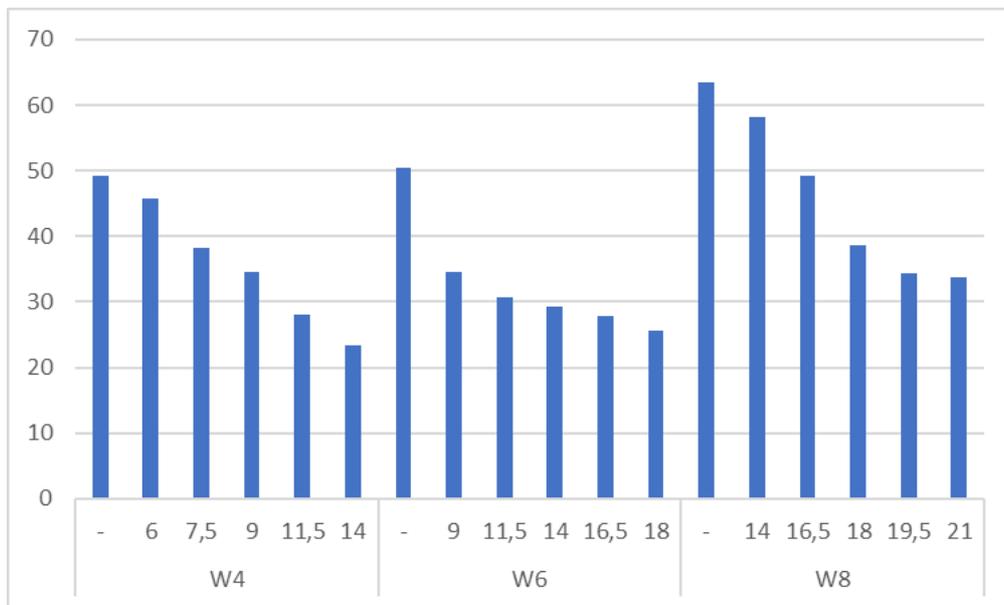
**Таблица 1 – Изменение прочностных характеристик образцов из портландцемента.**

Тип образца	Напряжение разрушения, МПа
До воздействия	55,78
После воздействия воды	42,44
После воздействия 2 %-ого раствора $MgCl_2$	22,54

Очевидно, что для образцов без специальных добавок 2 %-ый раствор  $MgCl_2$  является сильноагрессивной средой, он оказывает более сильное влияние на снижение прочностных характеристик.

Для снижения водопоглощения бетона в цементную смесь на стадии производства испытываемых образцов вводился стеарат кальция для обеспечения объемной гидрофобизации. При исследовании массообменных процессов, протекающих при жидкостной коррозии гидрофобизированных цементных бетонов, было установлено, что для концентраций  $MgCl_2$  менее 9 г/л достаточно концентрации гидрофобизирующей добавки 0,3 % от массы бетона, что соответствует марке по водонепроницаемости W4. Для концентрации  $MgCl_2$  9-16,5 г/л достаточно концентрации гидрофобизирующей добавки 0,5 % от массы бетона, что соответствует марке по водонепроницаемости W6. Для концентрации  $MgCl_2$  выше 16,5 г/л концентрации гидрофобизирующей добавки должна составлять не менее 0,7 % от массы бетона, что соответствует марке по водонепроницаемости W8.

При жидкостной коррозии образцов на портландцементе на начальном этапе происходит увеличение прочности, что может быть объяснено наполнением пор и пустот в бетоне новообразующимися продуктами коррозии, т.е. кольматацией, и изменением структуры цементного камня [9]. Прочность бетона увеличивается лишь на какое-то время и превышает прочность бетона, не подвергающегося воздействию агрессивной среды. Чем медленнее протекает процесс коррозии, тем позднее наступает потеря прочности бетона [10]. Повышение расчетного напряжения разрушения (рисунок 1) может быть связано со структурно-фазовыми превращениями, происходящими в цементном камне при воздействии агрессивной среды.



**Рисунок 1 – Изменение прочности образцов под воздействием агрессивной среды.**

При помощи математического моделирования можно определять параметры массопереноса и устанавливать сроки безопасной эксплуатации конструкций из бетона в различных агрессивных средах. По разработанной нами математической модели (1) [7, 8] произведен расчет характеристик процесса массопереноса «свободного гидроксида кальция» при коррозии бетона второго вида, в результате воздействия выбранной агрессивной среды: 2 %-ого водного раствора  $MgCl_2$  в соответствии с известными методиками расчета (таблица 2) [8].

$$\begin{aligned}
 \theta(\bar{x}, Fo_m) = & -\frac{Ki_m^*}{6}(6Fo_m + 3\bar{x}^2 - 1) \\
 & + \frac{2Ki_m^*}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cos(\pi n \bar{x}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m) + \int_0^1 \theta_0(\xi) d\xi \\
 & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi n \bar{x}) \int_0^1 \theta_0(\xi) \cos(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m) \\
 & + \left( Fo_m + \frac{3\bar{x}^2 + 2}{6} \right) \int_0^1 Po_m^*(\xi) d\xi \\
 & - \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cdot \xi \cdot d\xi + \frac{1}{2} \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cdot \xi^2 \cdot d\xi \\
 & - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos(\pi n \bar{x}) \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cos(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $n$  – число членов ряда;  $\xi$  – координата интегрирования в диапазоне  $0 \leq \xi \leq \bar{x}$ ;  $Ki_m^* = \frac{q_p \cdot \delta}{k \cdot c_0 \cdot \rho_6}$  – модифицированный критерий Кирпичева;  $Fo_m = \frac{k\tau}{\delta^2}$  – массообменный критерий Фурье;  $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$  – безразмерная координата;  $\theta(\bar{x}, Fo_m) = \frac{c(x, \tau) - c_0}{c_0}$  – безразмерная концентрация;  $Po_m^*(\bar{x}) = \frac{q_v(x) \cdot \delta}{k \cdot c_0 \cdot \rho_6}$  – модифицированный критерий Померанцева.

**Таблица 2 – Экспериментально определенные характеристики массопереноса.**

Для системы «2 %-ый водный раствор MgCl <sub>2</sub> – цементный бетон марки по водонепроницаемости W6»						
№ п/п	Наименование показателя	τ, сут				
		14	28	42	56	70
1	Плотность потока «свободного Ca(OH) <sub>2</sub> » в образце, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	5,34·10 <sup>-8</sup>	3,14·10 <sup>-8</sup>	2,2·10 <sup>-8</sup>	1,65·10 <sup>-8</sup>	1,32·10 <sup>-8</sup>
2	Плотность потока Mg <sup>2+</sup> в жидкости, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	1,72·10 <sup>-8</sup>	1,01·10 <sup>-8</sup>	7,05·10 <sup>-9</sup>	5,3·10 <sup>-9</sup>	4,23·10 <sup>-9</sup>
3	Коэффициент массоотдачи, м/с	7,03·10 <sup>-7</sup>	4,13·10 <sup>-7</sup>	2,89·10 <sup>-7</sup>	2,17·10 <sup>-7</sup>	1,74·10 <sup>-7</sup>
4	Коэффициент массопроводности, м <sup>2</sup> /с	5,9·10 <sup>-9</sup>	4,63·10 <sup>-9</sup>	3,89·10 <sup>-9</sup>	3,65·10 <sup>-9</sup>	3,5·10 <sup>-9</sup>
Для системы «2 %-ый водный раствор MgCl <sub>2</sub> – цементный бетон марки по водонепроницаемости W8»						
№ п/п	Наименование показателя	τ, сут				
		14	28	42	56	70
1	Плотность потока «свободного Ca(OH) <sub>2</sub> » в образце, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	5,65·10 <sup>-8</sup>	3,14·10 <sup>-8</sup>	2,3·10 <sup>-8</sup>	1,73·10 <sup>-8</sup>	1,38·10 <sup>-8</sup>
2	Плотность потока Mg <sup>2+</sup> в жидкости, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	1,81·10 <sup>-8</sup>	1,01·10 <sup>-8</sup>	7,44·10 <sup>-9</sup>	5,72·10 <sup>-9</sup>	4,41·10 <sup>-9</sup>
3	Коэффициент массоотдачи, м/с	7,15·10 <sup>-7</sup>	3,98·10 <sup>-7</sup>	2,91·10 <sup>-7</sup>	2,19·10 <sup>-7</sup>	1,75·10 <sup>-7</sup>
4	Коэффициент массопроводности, м <sup>2</sup> /с	6,06·10 <sup>-9</sup>	4,49·10 <sup>-9</sup>	3,95·10 <sup>-9</sup>	3,82·10 <sup>-9</sup>	3,55·10 <sup>-9</sup>

Представленные экспериментальные данные, используемые для подстановки в математические модели процессов коррозии II вида цементных бетонов, позволяют прогнозировать динамику массообменных процессов в теле бетонных и армированных бетонных конструкций. Установлено, что уже через 12 лет при прогнозировании нахождения образца марки по водонепроницаемости W8 в данной агрессивной среде в слоях бетона, близко расположенных к агрессивной среде, начинается разложение высокоосновных соединений цементного бетона: алита, белита, трехкальциевого алюмината и четырехкальциевого алюмоферрита. Затем к 16 годам эксплуатации разложение высокоосновных соединений идет по всей толщине образца, а к 20 годам концентрация «свободного гидроксида кальция» становится такой, что прочность бетона будет крайне низкая и не сможет обеспечить дальнейшую безопасную эксплуатацию изделия. Тогда как в бетоне без гидрофобизирующих добавок разложение высокоосновных составляющих цементного камня начинается через 2,5 года воздействия среды.

#### **Выводы**

Для того, чтобы иметь возможность эффективно использовать процесс кольтации пор в предотвращении распространения фронта коррозии вглубь бетона, необходимо предварительно экспериментально устанавливать необходимое количество гидрофобизирующей добавки для конкретной марки бетона в зависимости от степени агрессивности среды.

Приведенные рекомендации по гидрофобизации цементных бетонов позволяют увеличить срок службы изделий и конструкций из бетона в 3-5 раз.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Bertolini L., Elsener B., Pedeferra P., Redaelli E., Polder R.B. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 434 p.
2. Гусев Б.В., Файвусович А.С., Степанова В.Ф., Розенталь Н.К. Математические модели процессов коррозии бетона. М.: ТИМР, 1996. 104 с.

3. Schiessl P. Corrosion of steel in concrete: report of the Technical Committee 60 CSC, RILEM (the International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). London; New York: Chapman and Hall, 1988. 102 p.

4. Muzenski S.W., Flores-Vivian I., Sobolev K. The Development of Hydrophobic and Superhydrophobic Cementitious Composites // Proceedings of the 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures 24-26 July 2014. Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 2014. 6 p.

5. Румянцева В.Е., Федосова Н.Л., Смельцов В.Л., Хрунов В.А., Костерин А.Я. Экспериментальные исследования процессов массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов // Приволжский научный журнал. 2010. № 1. С. 39-45.

6. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Федосова Н.Л., Смельцов В.Л. Моделирование массопереноса в процессах жидкостной коррозии бетона I вида // Строительные материалы. 2005. № 7. С. 60-62.

7. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Касьяненко Н.С. Математическое моделирование массопереноса в процессах коррозии бетона второго вида // Строительные материалы. 2008. № 7. С. 35-39.

8. Федосов С.В., Федосова Н.Л., Румянцева В.Е., Касьяненко Н.С. Этапы математического моделирования процессов массопереноса при коррозии I и II видов // I Академические чтения «Актуальные проблемы бетона и железобетона. Материалы и конструкции. Расчет и проектирование»: материалы научно-практической конференции. Ростов н/Д: РГСУ, 2010. С. 69-71.

9. Мощанский Н.А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. М.: Госстройиздат, 1962. 89 с.

10. Коновалова В.С., Караваев И.В., Логинова С.А. Рентгенографический анализ цементного камня // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК – 2016): сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов с международным участием. Иваново: Иванов. Гос. Политехн. Ун-т, 2016. С. 98-99.

УДК 66.084.8

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ  
INTENSIFICATION OF THE DRYING PROCESS OF THERMOLABILE MATERIALS  
BY ULTRASONIC VIBRATIONS**

**Андрей Викторович Шалунов, Владимир Николаевич Хмелев,  
Виктор Александрович Нестеров, Роман Николаевич Голых,  
Александр Сергеевич Боченков**

**Andrey V. Shalunov, Vladimir N. Khmelev, Viktor A. Nesterov, Roman N. Golykh,  
Alexander S. Bochenkov**

*Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный  
технический университет им. И.И. Ползунова», Россия, Бийск*

*Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Russia, Biysk  
(e-mail: shalunov@bti.secna.ru; vnh@bti.secna.ru; nva@bti.secna.ru; grn@bti.secna.ru)*

*Аннотация:* Исследован процесс комбинированной акустико-конвективной сушки при различных видах ультразвукового воздействия. Показано, что наиболее эффективно процесс реализуется при бесконтактном ультразвуковом воздействии на взвешенный слой дисперсного материала (снижение остаточной влажности на 22% при неизменном времени сушки, при этом обеспечивается дополнительное удаление до 41% массы жидкости).

*Abstract:* The process of combined acoustic-convective drying with various types of ultrasonic effects was investigated. The process is most efficiently implemented with non-contact ultrasonic action on a suspended layer of a dispersed material. A reduction in residual moisture of 22% was achieved with a constant drying time, while additional removal of up to 41% of the mass of liquid was ensured.

*Ключевые слова:* drying, ultrasonic vibrations, suspended layer.

*Keywords:* nonwoven laminated materials, the drying object, the drying kinetics.

Сушка различных материалов – один из самых энергоемких и продолжительных по времени процессов в пищевых, биофармацевтических, химических, перерабатывающих и других отраслях промышленности. Эффективность реализации процесса сушки во многом определяет качество готового продукта, материалоемкость производства, энергозатраты и уровень загрязнения окружающей среды. В свою очередь, современные тенденции развития перечисленных отраслей промышленности связаны со стремлением минимально разрушать и максимально сохранить полезные свойства исходных продуктов при сушке, что приводит к необходимости снижать температуру, либо вообще отказаться от нагрева высушиваемого продукта. Это обуславливает существование научной проблемы, обусловленной необходимостью разработки и применения новых, комбинированных способов сушки, основанных на применении дополнительных энергетических воздействий, обеспечивающих интенсификацию процесса без повышения температуры. В качестве такого воздействия возможно использовать энергию ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Применение ультразвуковых колебаний обеспечивает:

1) возможность существенного снижения энергозатрат за счет удаления влаги без перевода ее в газообразное состояние, путем механического «выбивания» из высушиваемого материала в виде аэрозоля;

2) исключение нагрева высушиваемого продукта (обеспечением удаления влаги при пониженных температурах, или принципиально без повышения температуры);

3) увеличение производительности сушки за счет интенсификации извлечения жидкости из пор и ее последующего испарения с поверхности твёрдого вещества.

Это обуславливает перспективность применения ультразвуковых колебаний для сушки термолабильных материалов.

Однако, не смотря на указанные достоинства, попытки практического применения ультразвуковых колебаний для интенсификации процесса сушки сталкиваются с физическими ограничениями, связанными со значительным отражением ультразвуковых колебаний на границе воздух–высушиваемый материал. Это приводит к тому, что ультразвуковые колебания не проникают глубоко внутрь материала, что снижет эффект от ультразвукового воздействия. Таким образом, поверхность высушиваемого материала, непосредственно взаимодействующая с ультразвуковыми колебаниями, является лимитирующим фактором, определяющим степень интенсификации процесса сушки ультразвуковыми колебаниями. Это приводит к тому, что в зарубежных исследованиях последних лет приводятся данные о нецелесообразности реализации процесса ультразвуковой сушки при воздействии на высушиваемый материал со стороны воздушной среды [1-2]. В качестве альтернативы предлагается контактное воздействие, реализуемое путем непосредственного размещения тонким слоем высушиваемого материала на колеблющейся поверхности ультразвукового излучателя [3]. Однако контактная ультразвуковая сушка не реализуема в промышленных масштабах ввиду малой площади колеблющейся поверхности существующих излучателей (не более 0,25 м<sup>2</sup>).

Поэтому в настоящей работе предложен и исследован способ интенсификации процесса сушки путем увеличения поверхности взаимодействия высушиваемого материала и ультразвуковых колебаний. Для этого высушиваемый материал переводится в дисперсное состояние, а процесс реализуется во взвешенном слое, обеспечивающем максимальную

поверхность взаимодействия ультразвуковых колебаний и материала. В качестве объекта сушки использовались древесные опилки с начальной влажностью 75%. Температура в процессе сушки поддерживалась в пределах 100°C для сохранения термолабильных и легкоокисляющихся компонентов древесины (в частности лигнина), необходимых при дальнейшем формировании из опилок готового продукта, например, топливных пеллет. Влажность опилок в процессе сушки определялась методом сушки до постоянной массы и рассчитывалась с использованием следующего выражения:

$$W = \frac{M_{TEK} - M_{C.M.}}{M_{НАЧ}} \times 100, \quad (1)$$

где  $M_{C.M.}$  – масса сухих опилок (высушенных до постоянной массы при температуре 90°C);  $M_{TEK}$  – масса опилок, измеренная в процессе эксперимента;  $M_{НАЧ}$  – масса влажной навески в начале эксперимента (во всех опытах была одинаковой и равнялась 1 кг).

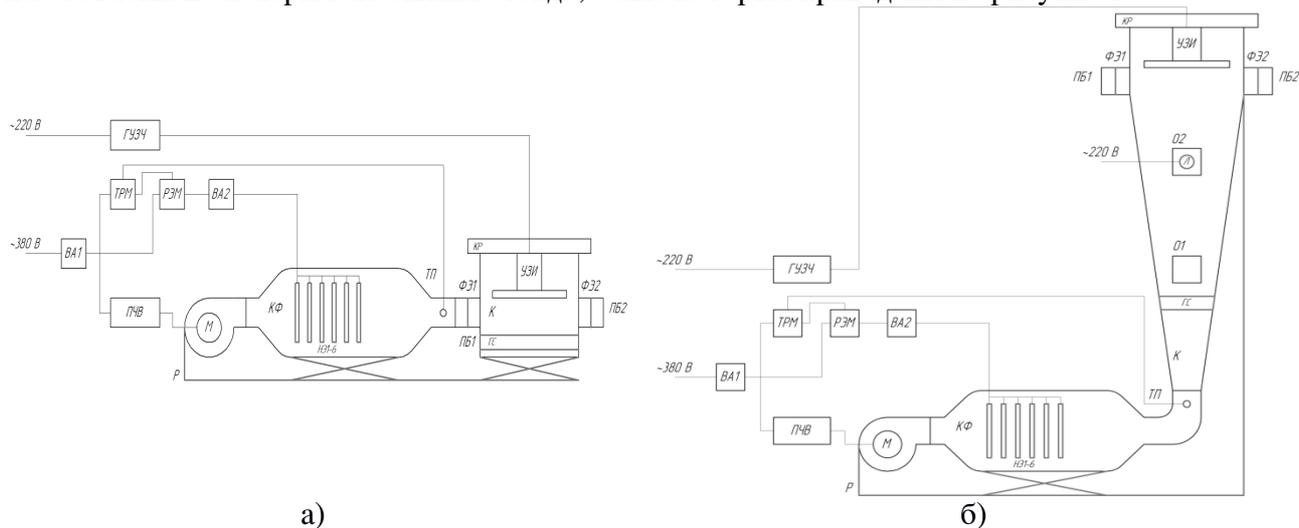
Для определения эффективности применения ультразвукового воздействия было проведено 3 типа экспериментов на основе комбинированной акустико-конвективной сушки:

бесконтактное ультразвуковое воздействие на плотный слой опилок с продольным обдувом сушильным агентом;

контактное ультразвуковое воздействие на плотный слой опилок с продольным обдувом сушильным агентом;

бесконтактное ультразвуковое воздействие взвешенный слой опилок.

Для проведения исследований кинетики ультразвуковой сушки были разработаны и изготовлены 2 экспериментальных стенда, эскиз которых приведены на рисунке 1.



а)

б)

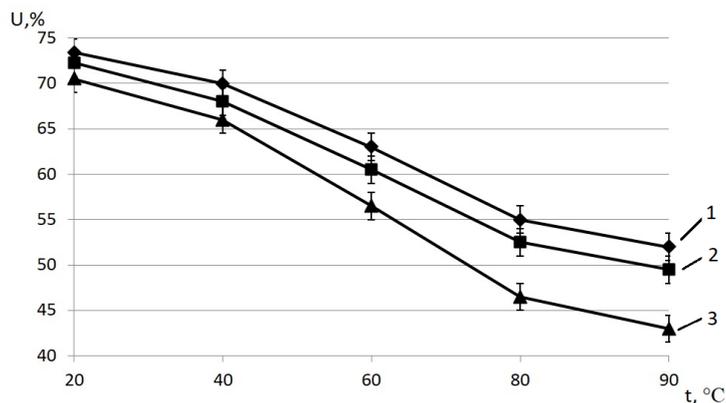
ВА1, ВА2 – выключатели автоматические; ГС – горизонтальная сетка (ограничивает выход опилок за пределы камеры); ГУЗЧ – генератор ультразвуковой частоты; К – камера;

КР – крышка; КФ – калорифер; М – электродвигатель; ПЧВ – преобразователь частоты векторный; РЭМ – реле электромеханическое; ТП – терморпара; ТРМ – измеритель-регулятор одноканальный; УЗИ – ультразвуковой излучатель; ФЭ1, ФЭ2 – фильтровальные элементы

**Рисунок 1 – Эскиз экспериментальных стендов для сушки опилок в плотном слое (а) и во взвешенном слое (б)**

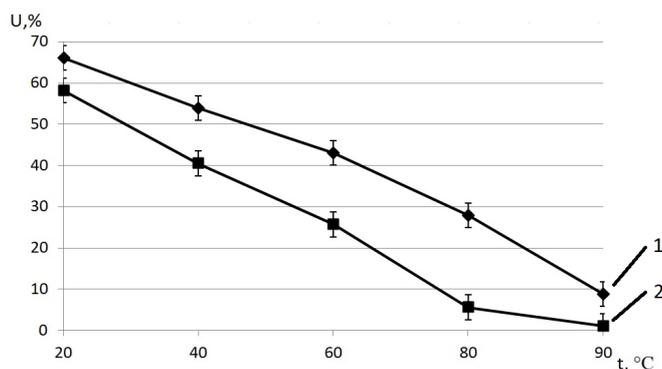
Для обеспечения одинаковой начальной влажности опилок при проведении экспериментов использовались опилки, высушенные до постоянной массы. Непосредственно перед проведением эксперимента в опилки добавлялось необходимое количество воды, после чего они тщательно перемешивались. Для создания ультразвуковых колебаний был разработан и изготовлен ультразвуковой дисковый излучатель. Излучатель позволяет создавать уровень звукового давления в сушильной камере 140...150 дБ (рабочая частота 22 кГц) [4-5]. Излучатель построен на основе пьезоэлектрического преобразователя с концентратором, возбуждающим изгибные колебания диска ступенчато-переменного сечения.

Использование изгибных колебаний диска обеспечивает увеличение выхода энергии (более 65%) в газовую среду, а излучение с поверхности участков различной толщины обеспечивает когерентность излучаемых УЗ волн [6]. Электрическая мощность излучателя 250 Вт. Для определения характеристик ультразвукового поля в объёме сушильной камеры производились измерения уровня звукового давления в разных её точках при помощи шумомера «Ассистент». Согласно результатам проведённых измерений, уровень звукового давления во всей зоне сушки составляет не менее 140 дБ, что является достаточным для интенсификации процесса испарения влаги с поверхности опилок. На рисунке 2 приведены зависимости влажности от температуры сушильного агента при различных видах ультразвукового воздействия на плотный слой опилок (толщина 2 см).



**Рисунок 2 – Зависимости влажности опилок при конвективной сушке (1), с бесконтактным (2) и с контактным (3) ультразвуковым воздействием от температуры сушильного агента**

Температура слоя опилок измерялась в трех равноудаленных точках путем погружения термопары до середины толщины слоя. Скорость сушильного агента составляла 10 м/с, время сушки во всех случаях равнялась 30 мин. Из представленных зависимостей следует, что применение бесконтактного ультразвукового воздействия (кривая 2) обеспечивает незначительное ускорение процесса сушки. Ультразвуковые колебания обеспечивают уменьшение влажности от 1% при 20 °С (в пределах погрешности измерений) до 2,5 % при температуре сушильного агента выше 60 °С. В случае контактного воздействия (кривая 3) эффект от применения ультразвуковых колебаний является более существенным: начиная от 3% (снижение влажности) при 20 °С и до 9% при температуре сушильного агента 90 °С. Это свидетельствует о том, что при контактном ультразвуковом воздействии создаются более благоприятные условия для введения ультразвуковых колебаний в высушиваемый материал. Ультразвуковые колебания способствуют увеличению скорости диффузии влаги на поверхность высушиваемого материала, с одновременным ускорением ее удаления с поверхности материала. Именно этим объясняется значительное (в 3 раза) увеличение эффекта от применения ультразвукового воздействия при увеличении температуры сушильного агента с 20 °С до 90 °С. Значительно большего эффекта от ультразвукового воздействия можно добиться, осуществляя сушку в дисперсном состоянии (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Зависимости влажности опилок при сушке во взвешенном слое (1) и с дополнительным бесконтактным ультразвуковым воздействием (2) от температуры сушильного агента**

Скорость сушильного агента во всех экспериментах по сушке во взвешенном слое была постоянной и равной 10 м/с, время проведения каждого эксперимента 10 мин. Как следует из представленных зависимостей, наложение ультразвуковых колебаний на взвешенный слой обеспечивает уменьшение влажности высушиваемого материала, недостижимое при других видах ультразвукового воздействия. Ультразвуковые колебания обеспечивают уменьшение влажности опилок не менее чем на 8% уже при 20 °С. При 80 °С ультразвуковое воздействие снижает остаточную влажность опилок на 22%, при этом масса влаги, дополнительно испаренной за счет воздействия ультразвуковых колебаний, возрастает на 41%. С учетом того, что электрическая мощность, потребляемая калорифером, при нагреве сушильного агента до 80 °С составляла 5,1 кВт, то ультразвуковое воздействие (250 Вт) при увеличении электрической мощности на 5% обеспечило 41% увеличение массы испаряемой влаги. Это делает применение ультразвукового воздействия весьма перспективным для сушки дисперсных материалов. При температуре сушильного агента 90 °С эффект от ультразвукового воздействия снижается (кривая 2). Это обусловлено тем, что влага из высушиваемых опилок практически полностью испарилась (остаточная влажность не превышает 2%), а, следовательно, снизилась скорость сушки и ее прирост за счет ультразвукового воздействия. При сушке без ультразвукового воздействия при 90 °С остаточная влажность составляет 8%. Таким образом, ультразвуковое воздействие позволяет уменьшить время сушки или при равном времени сушки уменьшить температуру сушильного агента.

### Выводы

Проведено экспериментальное исследование процесса комбинированной акустико-конвективной сушки при различных видах ультразвукового воздействия (контактное и бесконтактное) и состояниях высушиваемого материала (уплотненный и взвешенный слой). Показано, что наиболее эффективно процесс ультразвуковой сушки реализуется при контактном воздействии (снижение остаточной влажности на 9% при неизменном времени сушки), либо при бесконтактном воздействии на взвешенный слой дисперсного материала (снижение остаточной влажности на 22% при неизменном времени сушки, при этом обеспечивается дополнительное удаление до 41% влаги).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gallego-Juárez J. A, Graff K. F. *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*, Woodhead Publishing, 2015. P.1166.
2. Riera E., García-Pérez J. V., Cárcel J. A., Acosta-Aparicio V. M., Gallego-Juárez J. A. Computational study of ultrasound-assisted drying of food materials // in *Innovative Food Processing Technologies: Advances in Multiphysics Simulation*, ed: Blackwell Publishing Ltd., 2011, pp. 265-301.

3. *Acosta-Aparicio V. M., Andrés-Gallego E., Gallego-Juárez J. A., Rodríguez-Corral G.* Application of high-power ultrasound for drying vegetables // *Forum Acusticum*, Sevilla, 2002.

4. *Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Golykh R.N.* Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures. // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2015: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2015. pp. 224- 228

5. *Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A.* The measurements of acoustic power introduced into gas medium by the ultrasonic apparatuses with the disk-Type radiators // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2016: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2016. pp. 251-256

6. *Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V.* Radiators for forming of high-intensive ultrasonic vibrations in gaseous media // 19th International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2018: Conference Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2018. pp. 275-280.

УДК 669.015

**ТЕПЛОВЫЕ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ  
НАСАДКИ ИЗ ТКАННОГО МАТЕРИАЛА  
THERMAL AND HYDRAULIC TESTING OF ENERGY-EFFICIENT PACKING MADE  
OF WOVEN MATERIAL**

**Алексей С. Севрюков, Александр Сергеевич Пушнов, Михаил Георгиевич Беренгартен  
Alexey S. Sevryukov, Aleksandr S. Pushov, Mikhail G. Berengarten**

*Московский политехнический университет, Россия, Москва  
Moscow Polytechnic University, Russia, Moscow  
(e-mail: 1404alex@gmail.com)*

*Аннотация:* Рассмотрены некоторые особенности энергоэффективности насадки, даны краткие характеристики насадки типа PFF, приведены результаты экспериментального исследования зависимостей перепада давления и перепада температуры от скорости потока

*Abstract:* Some features of the energy efficiency of the packing are considered, brief characteristics of the PFF packing bed are given, the results of an experimental study of the dependences of the pressure drop and temperature difference on the flow rate are given

*Ключевые слова:* регулярные насадки, геометрические характеристики насадок;

*Keywords:* regular packing bed, geometric characteristics of packing.

Совершенствование конструкций современных контактных устройств для осуществления процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах и градирнях связано с решением диалектической задачи увеличения эффективности технологического процесса при одновременном снижении энергозатрат на его осуществление. Актуальность проблемы обсуждается в работах [1-5]. Предложенная Лаптевым А.Г. функциональная зависимость для оценки теплогидравлической эффективности насадок имеет следующий вид [2]:

$$E=f(K_r, F, H, \alpha, \psi, \rho_g, 1/\Delta P_{op}, 1/G) \quad (1)$$

где  $K_r$  - коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup> °К);  $F$  – площадь поперечного сечения колонного аппарата, м<sup>2</sup>;  $H$  – высота слоя насадки, м;  $\alpha$  – удельная поверхность насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $\psi$  – коэффициент смачиваемости поверхности насадки;  $\rho_g$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta P_{op}$  – перепад давления в орошаемой насадке, Па;  $G$  – массовый расход, кг/м<sup>3</sup>;

Анализ опытных данных по различным конструкциям промышленных насадок, приведенных в [4-6] позволяет сделать вывод о том, что наибольшее влияние на энергоэффективность насадки оказывают удельная поверхность  $\alpha$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$  и гидравлическое сопротивление слоя насадки  $\Delta P_{\text{ор}}$ , Па. Соответственно, качественное соотношение для предварительной оценки энергоэффективности конструкции насадки имеет вид:

$$E_* = \alpha / (\Delta P / H) \quad (2)$$

Элементы перспективной конструкции регулярной насадки типа PFF были выполнены в виде полос прямоугольной формы из тонкого материала, способных совершать автоколебательные движения под воздействием воздушного потока. Указанные полосы образуют несколько ярусов, последовательно расположенных по ходу движения воздушного потока в аппарате. Общий вид испытанного контактного устройства показан на фото (см. рисунок 1)

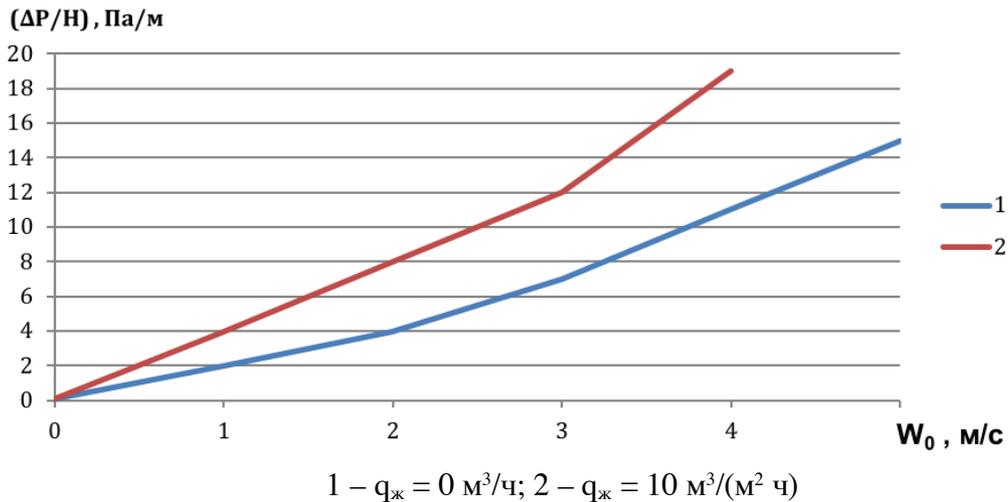
Аэротермические испытания насадки типа PFF проводили на поперечно-точном аппарате. Воздух в аппарат подавался боковым вентилятором. Охлаждаемая вода на испытываемую насадку подавалась сверху через систему форсунок. Во время опытов контролировали расход и температуру взаимодействующих потоков воздуха и воды. Также контролировали влажность воздуха. Погрешность измерения  $\Delta P$  и температуры не превышала  $\pm 12\%$ . Скорость воздушного потока в расчете на полное сечение пустого аппарата составляла  $W_0 = 0 \div 4$  м/с (рисунки 2, 3)



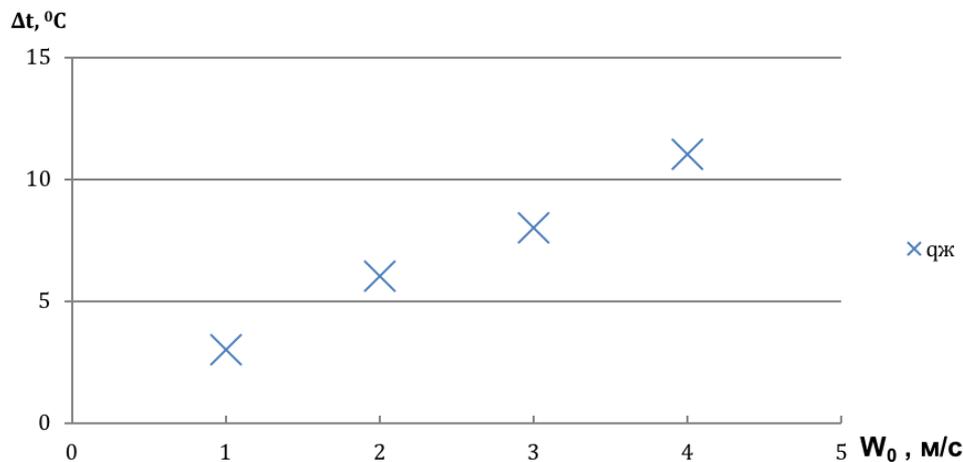
Рисунок 1 – Общий вид насадки типа PFF на опытном стенде.

Таблица 1 – Геометрические характеристики насадок типа PFF

№ п/п	Тип насадки	Расстояние между соседними пластинами $h$ , толщина пластин, мм	Удельная поверхность $\alpha$ , $\text{м}^2/\text{м}^3$	Порозность $\epsilon$ , $\text{м}^3/\text{м}^3$	Эквивалентный диаметр канала $d_e$ , м	Число пластин в $V=1 \text{ м}^3$ $N$ , шт/ $\text{м}^3$
1	PFF-5	5 x 0,1	408	0,995	0,00975	200
2	PFF-10	10 x 0,1	204	0,99	0,01941	100
3	PFF-15	15 x 0,1	135,99	0,985	0,02897	66,7
4	PFF-20	20 x 0,1	108	0,98	0,0384	55



**Рисунок 2 – Зависимость  $(\Delta P/H) = f(W_0)$ ;**



**Рисунок 3 – Зависимость  $\Delta t = f(W_0)$ ,  $q_{ж}=10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$**

Проведенные опыты показали, что по соотношению (2) насадка PFF, например, при скорости газового потока  $W_0=1,4 \text{ м/с}$ , превосходит такие промышленные регулярные насадки как Sulzer BX и Mellapak 250Y, соответственно, в 24,5 и 27,9 раза.

Регулярная насадка типа PFF, элементы которой выполнены из тканного материала способного под воздействием набегающего потока воздуха совершать автоколебательные движения могут быть использованы например, в поперечноточных вентиляторных градирнях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И., Контактные насадки промышленных теплообменников аппаратов. Монография. Под ред. Лаптева А.Г. – Казань: Отечество, 2013, -454с.
2. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Эффективность теплообмена и разделение гетерогенных сред в аппаратах нефтегазохимического комплекса: Монография – Казань: Центр инновационных технологий, 2016, -344 с.
3. Лаптева Е.А., Лаптев А.Г., Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (гидромеханика и теплообмен) – Казань: Издательство «Печать – Сервис XXI век», 2015, -236с.
4. Maćkowiak J. Fluid Dynamic of Packed Columns. Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 360 p.

5. Лаптев А.Г., Ведьгаева И.А. Устройство и расчет промышленных градирен. – Казань: Казанский гос. энергетический университет, 2004, 180 с.

6. Махнин А.А. Совершенствование процессов и аппаратов для очистки паровоздушных смесей органических растворителей сорбционными методами. Автореферат диссертации на соискание уч. Степени д.т.н. Яр. ГТУ. Ярославль, 2010, 34 с.

УДК 677.074

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В АППАРАТЕ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ**  
**EXPERIMENTAL AND CALCULATED STUDY OF PARTICULATE SOLIDS DRYING IN THE APPARATUS WITH CIRCULATING FLUIDIZED BED**

**Андрей Васильевич Митрофанов\***, Елена Александровна Шуина,  
**Ирина Александровна Тихомирова\***, **Katia Tannous\*\***  
**Andrey V. Mitrofanov\***, **Elena A. Shuina\***, **Irina A. Tihomirova\***, **Katia Tannous\*\***

*\*Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,  
Россия, Иваново*

*\*Ivanovo State Power Engineering University, Russia, Ivanovo  
(e-mail: and2mit@mail.ru)*

*\*\*Chemical Engineering School, University of Campinas, Av. Albert Einstein, 500  
(Cidade Universitária), 13083-852 - Campinas-SP, Brazil  
(e-mail: katia@feq.unicamp.br)*

*Аннотация:* Математическая модель на основе теории цепей Маркова использована для описания формирования массопотоков при сушке материала в циркуляционном кипящем слое (ЦКС). Отслеживание перемещений меченой частицы было положено в основу экспериментального определения массопотоков.

*Abstract:* A Markov chains model was used to describe of solid mass flow rate during drying process in circulating fluid bed (CFB). The flow rate was estimated experimentally based on measurements of tag particle movements.

*Ключевые слова:* циркуляционный кипящий слой, вектор состояния, переходная матрица, сушка.

*Keywords:* circulating fluidized bed, state vector, matrix of transition probabilities, drying.

В настоящее время достижение эффективного контактирования между газом и дисперсным материалом в ряде промышленных процессов применяется технология быстрого псевдооживления, заведомо предполагающая вынос частиц твердой фазы из аппарата и принудительный его возврат через опускной канал обратно в объем основного слоя. На подобном принципе основано функционирование достаточно широкого спектра аппаратов с так называемым циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) [1,2].

Целью предлагаемой работы является развитие и экспериментальная проверка ячеечной модели формирования массопотоков в аппарате ЦКС периодического принципа действия при изменении со временем аэродинамической крупности частиц (скорости витания) в результате их сушки.

Расчетная схема модели основана на математическом аппарате теории цепей Маркова. Состояние процесса разбивается на ячейки малого, но конечного размера, а текущее состояние процесса представляется набором характеристик этого состояния, организованного в вектор-столбец. Эволюция состояния фиксируется через малые конечные промежутки времени и описывается матрицей переходных вероятностей. Каждый последующий вектор состояния получается из предыдущего путем умножения матрицы переходных вероятностей на текущий вектор состояния. Для моделирования процессов межфазного обмена

аддитивными свойствами (теплотой и влагой) в модель включаются ряд параллельных цепей, между сходственными ячейками которых возможен обмен указанными свойствами. Переходная матрица, являющаяся основным оператором модели, формируется с учетом предложенных и заимствованных из литературы полуэмпирических моделей процессов, происходящих с одиночной частицей (массообмена, теплообмена и др.). При описании циркуляции частиц действует допущение о полном освобождении последней ячейки цепи (и возвращении объема материала оттуда в первую ячейку). Детальное описание математических построений модели и используемых полуэмпирических соотношений представлено в наших предыдущих работах [2-3].

Экспериментальная проверка модели была выполнена ранее в отношении прогнозирования кинетики сушки различных модельных материалов [2-3]. В настоящей работе модельный материал (чечевицы, эквивалентный диаметр одиночной зерновки которой равен 2,7 мм) высушивался при температуре 40°C от начального влагосодержания 0,15 кг.вл./кг. сух. до равновесного с оживающим агентом (до 0,02 кг. вл./кг. сух.), при этом акцент в исследовании процесса был сделан на изменении характера массопотоков, которые характеризуются кратностью циркуляции материала в аппарате.

Для экспериментального определения кратности циркуляции был использован метод визуального наблюдения за появлением частицы в обратном тракте установки [3], который был модернизирован: часть канала длиной 25 см была заменена на прозрачный двумерный участок (расстояние между его стенками составляло 4 мм, что исключало ситуацию, когда меченая частица оказалась бы закрыта другими). Процесс на двумерном участке снимался на цифровую камеру, а сделанные записи использовались для определения кратности циркуляции меченой частицы на одинаковых интервалах времени (3 мин).

На расчетном уровне определение распределения времени пребывания трассера (выраженного через число временных переходов) и среднее время пребывания частиц в слое определялось также исходя из допущения, что последняя ячейка цепи  $S$ , которой описывается распределение массы материала по высоте основного реактора, на любом рекуррентном расчетном шаге  $k$  полностью освобождается. Тогда, среднее время пребывания на  $j$ -ом отрезке времени может быть рассчитано как:

$$t_j = \Delta t \sum_{i=1}^N k \frac{S_n^k}{M}, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – продолжительность расчетного шага по времени;  $M$  – суммарная загрузка аппарата материалом;  $N=[180/\Delta t]$  – целочисленное количество временных интервалов  $\Delta t$ , которые укладываются в промежутке времени 3 мин;  $n$  – число элементов вектора состояния  $S$ .

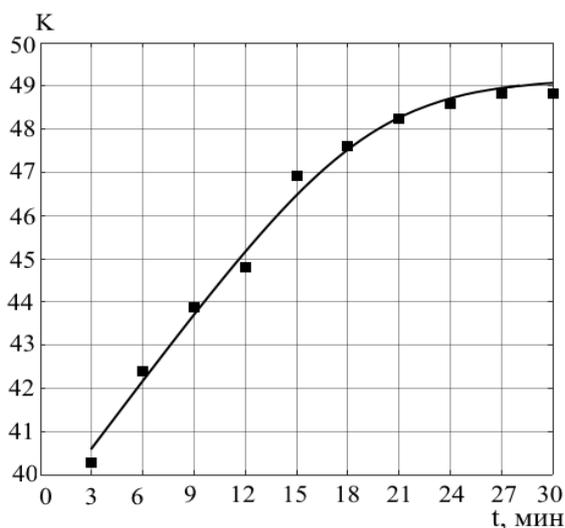
Кратность циркуляции материала за 3 мин. тогда составит:

$$K_j = \frac{180}{t_j}. \quad (2)$$

Сравнение расчетных и экспериментальных значений  $K$  представлено на рисунке 1.

### Выводы

Предложенная ячеечная модель сушки частиц в режиме ЦКС (с эмпирическими соотношениями для коэффициентов межфазного обмена [2-3]), позволяет рассчитывать процесс сушки с учетом изменяющихся в процессе обезвоживания материала характеристик массопотоков в системе ЦКС, которые, как показывает рисунок 1, претерпевают значительные изменения даже при сравнительно незначительных изменениях влагосодержания материала.



**Рисунок 1 – Расчетные (линия) и экспериментальные (точки) значения кратности циркуляции**

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balasubramaniani N., Srinivasakannan C. Drying of granular materials in circulating fluidized beds // Adv. Powder Technol. 2007. Vol. 18(2). P. 135–142.
2. Mitrofanov A., Mizonov V., Tannous K., Ovchinnikov L. A Markov chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties // Particulate Science and Technology. 2018. Vol. 36 (2). P. 244-253.
3. Mizonov V., Mitrofanov A., Camelo A., Ovchinnikov L. Theoretical Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed // Recent Innovations in Chemical Engineering. 2018. Vol. 11. P. 20-28

УДК 621.165

### МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОПОТОЧНЫХ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ СО СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ПОТОКОВ MATRIX MODEL OF MULTIPOINT MULTISTRIBUTED HEAT-EXCHANGE EQUIPMENT WITH COMPLEX FLOW CONFIGURATION

**Владимир Павлович Жуков\*, Алексей Евгеньевич Барочкин\*, Henryk Otwinowski\*\*  
Vladimir P. Zhukov\*, Alexey E. Barochkin\*, Henryk Otwinowski\*\***

*Ивановский государственный энергетический университет–ИГЭУ  
имени В.И. Ленина, Россия, Москва  
Ivanovo State Power Engineering University –ISPU, Russia, Moscow  
(e-mail: zhukov-home@yandex.ru)*

*\*\* Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland  
(e-mail: otwinowski@imc.pcz.czyst.pl)*

**Аннотация:** В рамках матричного подхода разработана модель многопоточных многоступенчатых теплообменных систем, каждая ступень которых может иметь произвольное число входных и выходных потоков. Получены и проанализированы решения уравнений модели, показана достоверность и обоснованность предложенного подхода.

**Abstract:** Within the framework of the matrix approach, a model of multithreaded multistage heat exchange systems has been developed, each stage of which can have an arbitrary number of input and output streams. Solutions of the model equations are obtained and analyzed, and the reliability and validity of the proposed approach are shown.

*Ключевые слова:* матричная формализация, тепломассообменные системы, многополюсники.

*Keywords:* matrix formalization, heat and mass transfer systems, multipoles.

Ранее нами [1-3] получено решение задачи матричного описания систем, каждая подсистема которых состоит из двухпоточных теплообменных аппаратов, представленных в виде четырехполюсников. Однако на практике число потоков на входе или выходе аппарата может быть больше двух. Такие теплообменные аппараты будем называть многопоточными [4]. На тепловых станциях такая структура потоков может быть обусловлена подачей помимо двух основных потоков холодного и горячего теплоносителей некоторых дополнительных потоков: дренажей или продувок других теплообменников, сбросами теплоносителей при аварийных режимах работы оборудования. Подача перечисленных потоков может производиться в разные точки теплообменного аппарата, что обуславливает разную эффективность исследуемых процессов. Следует отметить, что нами ранее была предложена модель для описания отдельной многопоточной ступени в виде системы дифференциальных уравнений [4], которая, однако, не позволяет рассчитать многоступенчатые системы с произвольной структурой потоков. Разработка в рамках единой методологии матричного описания многопоточных многоступенчатых систем теплообменных аппаратов, которое позволяет анализировать энергетическую и технологическую эффективность оборудования, является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой и смежными отраслями промышленности.

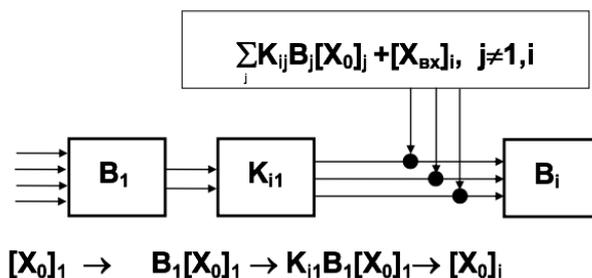
Объектом представленного исследования является система многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов. В качестве предмета исследования рассматривается матричная формализация расчета многопоточных многоступенчатых теплообменных систем со сложной структурой потоков. Целью исследования является повышение эффективности функционирования системы многопоточных теплообменных аппаратов со сложной структурой потоков на основе ее расчетного анализа с использованием матричных моделей. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: разработка матричного описания системы многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов, каждый из которых в общем случае имеет произвольное число входных и выходных потоков; демонстрация возможностей предложенного математического описания.

Для разработки математического описания многопоточных многоступенчатых систем предлагается расчетная схема объекта исследования, представленная на рис. 1. На схеме показана наиболее общая структура соединения  $n$  ступеней системы, при которой возможна коммутация любых выходных и входных потоков при произвольном их числе для каждой ступени. На рис. 1 схематично показано формирование потока на входе в  $i$ -й элемент (ступень) установки. Более подробно на рисунке представлена связь между первой и  $i$ -ой ступенью. Так на вход в первый элемент подаются потоки теплоносителей, которые характеризуются набором аддитивных признаков  $[X_0]_1$ , в качестве которых рассматриваются потоки массы или энергии. Индекс «0» внутри квадратных скобок указывает на входные параметры, индекс «1» за квадратными скобками относится к номеру ступени. Процесс теплообмена, массообмена или их совместное протекание описывается матрицей процесса  $\mathbf{V}$ , которая при линейной постановке задачи позволяет определить выходные параметры ступени в виде:  $[X]_i = \mathbf{V}_i [X_0]_1$ . Для указания направления движения потоков после ступени формируется матрица коммутации  $\mathbf{K}_{i1}$ , элементы которой показывают доли потоков теплоносителей, подаваемых из первой ступени в  $i$ -ю. При этом матричное произведение  $\mathbf{K}_{i1} \mathbf{V}_i [X_0]_1$  определяет параметры потоков, подаваемых из первого элемента в  $i$ -й. Очевидно, что на вход в  $i$ -ю ступень могут подаваться потоки не только из первой ступени, но также из остальных ступеней системы и внешние для системы потоки. Перечисленные потоки условно показаны в верхней части расчетной схемы на рис. 1. Входной вектор признаков для  $i$ -го элемента

определится суммой значений аддитивных параметров смешиваемых на его входе потоков в узлах смешения, отмеченных на рисунке точками:

$$[X_0]_i = K_{i1}B_1[X_0]_1 + K_{i2}B_2[X_0]_2 + \dots + K_{in}B_n[X_0]_n + [X_{вх}]_i, \quad (1)$$

где индекс «вх» указывает на внешний поток, подаваемый на вход ступени.



**Рисунок 1 – Расчетная схема формирования параметров потока на входе в *i*-й элемент многопоточной многоступенчатой теплообменной установки.**

Уравнения, аналогичные (1), записываются для каждой из *n* ступеней установки. Полученная при этом система уравнений после преобразований представляется в матричном виде

$$\begin{pmatrix} -I & K_{12}B_2 & K_{1n}B_n \\ K_{21}B_1 & -I & K_{2n}B_n \\ K_{n1}B_1 & K_{n2}B_2 & -I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [X_0]_1 \\ [X_0]_2 \\ [X_0]_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[X_{вх}]_1 \\ -[X_{вх}]_2 \\ -[X_{вх}]_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где *I* – единичная матрица.

При известных матрицах **B** и **K** решение системы (2) позволяет определить значения параметров теплоносителей в любой точке системы.

### Выводы

Предложенная методология матричной формализации позволяет в рамках единого подхода проводить расчетный анализ многопоточных многоступенчатых теплообменных систем и подсистем с целью определения условий их эффективного функционирования, разработки компьютерных тренажеров и программных средств оптимизации режимов оборудования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново: ИГЭУ, 2009. 176 с.
2. Барочкин А.Е., Жуков В.П., Беляков А.Н. Исследование процесса теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2011. Т. 54, №. 11. С. 116–119.
3. Моделирование теплопередачи в многофазной среде конденсатора турбины / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, А.Н. Беляков, Г.В. Ледуховский // Вестник ИГЭУ. 2012. № 1. С. 52–56.
4. Барочкин А.Е., Жуков В.П. Моделирование и расчет многопоточных теплообменных аппаратов // Вестник ИГЭУ. 2017. № 3. С. 70-75.

УДК 534-8

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СИСТЕМ С  
ЖИДКОЙ ФАЗОЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
MODELING OF FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF SYSTEMS  
WITH LIQUID PHASE FOR ULTRASONIC INFLUENCE OPTIMIZATION**

**Роман Николаевич Голых, Владимир Николаевич Хмелёв, Андрей Викторович Шалунов,  
Роман Алексеевич Лопатин, Вячеслав Дмитриевич Минаков,  
Владислав Анатольевич Шакура, Евгений Владимирович Ильченко  
Roman N. Golykh, Vladimir N. Khmelev, Andrey V. Shalunov, Roman A. Lopatin,  
Vyacheslav D. Minakov, Vladislav A. Shakura, Evgeniy V. Ilchenko**

*Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова»,  
Россия, Бийск  
Biysk Technological Institute (branch) of Altai State Technical University named after I.I. Polzunov,  
Russia, Biysk  
(e-mail: romangl90@gmail.com)*

*Аннотация:* Предложен общий подход к моделированию процессов формирования структуры и свойств систем с жидкой фазой в ультразвуковых полях. С использованием предложенного подхода выявлены оптимальные режимы и условия введения ультразвуковых колебаний, обеспечивающие максимальный КПД такого воздействия.

*Abstract:* A general approach to the modeling of the formation of structures and properties of systems with a liquid phase in ultrasonic fields is proposed. The optimal ultrasonic oscillations modes and conditions providing the maximum efficiency of this influence are revealed by proposed approach.

*Ключевые слова:* ультразвук, жидкая фаза, кавитация, моделирование, КПД.

*Keywords:* ultrasound, liquid phase, cavitation, modeling, efficiency.

Известно и многократно доказано, что воздействие ультразвуковыми (УЗ) колебаниями (УЗ воздействие) на системы с жидкой фазой реализует кавитационные и другие нелинейные эффекты. Эти эффекты способны изменять структуру и свойства систем с жидкой фазой (изменять молекулярную массу и вязкость несущей жидкой фазы, фракционный состав частиц дисперсной фазы), что позволяет получать новые материалы или придавать известным материалам новые, уникальные характеристики (многократно увеличенная пропитывающая способность, поверхность взаимодействия, предел прочности после отверждения, сниженное содержание нежелательной примеси и т. д.).

На сегодняшний день режимы (интенсивность УЗ колебаний) и условия (геометрия технологического объёма) воздействия, позволяющие достичь как можно большей эффективности процессов в системе с жидкой фазой (например, химическая реакция, диспергирование, коагуляция, эмульгирование), в основном, подбираются экспериментальным путём индивидуально на конкретных средах [1, 2]. Однако такой подход обладает рядом принципиальных недостатков, а именно:

– не обеспечивает максимум КПД ультразвукового воздействия с помощью подобранных режимов и условий, поскольку не определяется фактическое отношение затрат энергии на преобразование структуры и свойств системы с жидкой фазой (энергии на разрыв межатомных связей жидкой фазы, разрушение или слипание дисперсных частиц) к введённой акустической энергии;

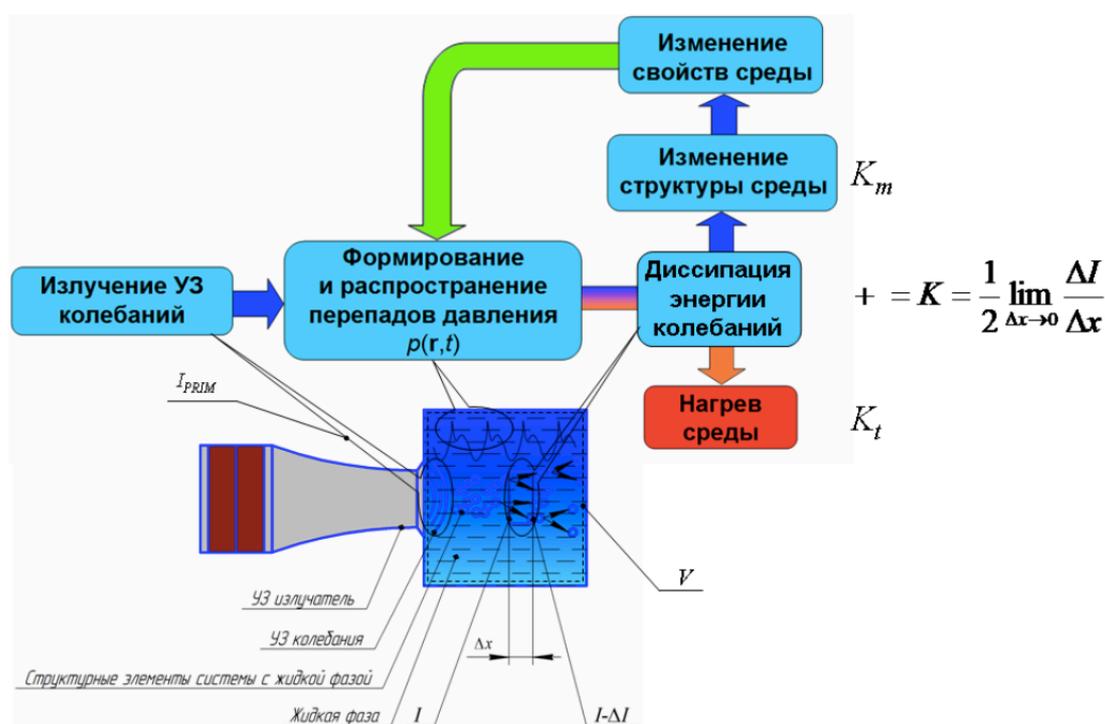
– не гарантирует, что подобранные режимы и условия обеспечат максимальную энергетическую эффективность процесса на протяжении всего времени его протекания. Это

связано с тем, что под действием ультразвука с течением времени меняются свойства и характеристики обрабатываемой среды;

– не позволяет прогнозировать оптимальные режимы и условия воздействия для новых, ранее не известных процессов или озвучиваемых сред. Это обусловлено тем, что такой подход не даёт возможность установить единые закономерности формирования структуры и свойств систем с жидкой фазой в зависимости от режимов и условий воздействия.

В связи с этим для решения проблемы оптимизации ультразвукового воздействия на системы с жидкой фазой необходимо создание комплексной взаимосвязанной модели преобразования энергии ультразвуковых колебаний в целевое изменение структуры и свойств обрабатываемой среды, которая позволит выявить режимы и условия, обеспечивающие повышение КПД воздействия.

Предложенный общий подход к моделированию состоит в последовательном рассмотрении следующих стадий преобразования энергии ультразвуковых колебаний в целевое изменение структуры и свойств среды (рисунок 1) [3].



$V$  – объём озвучиваемой системы с жидкой фазой;

$I_{PRIM}$  – интенсивность первичной ультразвуковой волны, генерируемой ультразвуковым излучателем, Вт/м<sup>2</sup>

$I$  – интенсивность ультразвуковых колебаний в отдельной локальной области технологического объёма, Вт/м<sup>2</sup>;

$\Delta I$  – изменение интенсивности ультразвуковых колебаний в результате диссипации (поглощения) при прохождении ультразвуковой волны расстояние  $\Delta x$  (м), Вт/м<sup>2</sup>;

$K$  – **полный коэффициент поглощения** колебаний, м<sup>-1</sup>;

$K_m$  – **структурная составляющая** коэффициента поглощения, м<sup>-1</sup>;

$K_t$  – **тепловая составляющая** коэффициента поглощения, м<sup>-1</sup>

**Рисунок 1 – Стадии преобразования энергии ультразвуковых колебаний в системах с жидкой фазой.**

Энергия колебаний поверхности излучателя формирует перепады давления в жидкости. Возникающие перепады давления диссипируются в среде с полным коэффициентом поглощения  $K$  (интенсивность ультразвуковой волны при прохождении некоторого малого расстояния  $\Delta x$  уменьшается на  $K\Delta x$ ).

Удельная мощность, диссипируемая в единице объёма среды  $2KI$  в единицу времени, включает в себя 2 составляющие ( $2KI = 2K_m I + 2K_t I$ ):

1) удельную мощность, затрачиваемую на нежелательный, а в ряде случаев и недопустимый нагрев среды (повышение кинетической энергии хаотичного движения молекул) –  $2K_t I$ .

2) удельную мощность, затрачиваемую на изменение структуры (разрушение водородных или углеродных связей молекул, диспергирование или коагуляция твёрдых частиц) и макроскопических свойств среды –  $2K_m I$ .

Макроскопические свойства среды, претерпевшие изменения в течение некоторого малого промежутка времени, в течение следующего временного интервала начинают уже по другому влиять на поле возмущений давления в жидкости по сравнению с предыдущим интервалом. Например, из-за снижения вязкости кавитация начинает протекать более интенсивно. Указанный фактор необходимо учитывать при оптимизации режимов и условий воздействия.

Согласно предлагаемому представлению задача оптимизации режимов и условий для повышения энергетической эффективности ультразвукового воздействия на системы с жидкой фазой сводится к максимизации суммарной мощности, затрачиваемой на преобразование структуры среды, отнесённой к мощности колебаний, вводимой УЗ излучателем (**КПД УЗ воздействия**). Установлено, что КПД УЗ воздействия, зависящий от интенсивности первичной УЗ волны, исходящей с поверхности излучателя  $I$ , и геометрии технологического объёма  $V$ , достигает максимума (при  $I=I_{OPT}$ ,  $V=V_{OPT}$ ) при одновременном выполнении двух необходимых и достаточных условий (1, 2):

$$D(V_{OPT}) = \min_{V \in R^3} D(V); \quad (1)$$

$$K_m(I_{OPT}) = \max_{I \geq 0} K_m(I); \quad (2)$$

$$D(V) = \frac{1}{mes V} \int_V \left( 1 - \frac{I(\mathbf{r})}{I_{OPT}} \right)^2 dV(\mathbf{r}); \quad (3)$$

где  $I_{OPT}$  – оптимальная *интенсивность первичной волны*, генерируемой УЗ излучателем, Вт/м<sup>2</sup>;  $V_{OPT}$  – оптимальный *озвучиваемый объём* системы с жидкой фазой;  $D(V)$  – относительная дисперсия интенсивности УЗ колебаний в объёме  $V$ , обусловленная явлениями затухания и отражения.

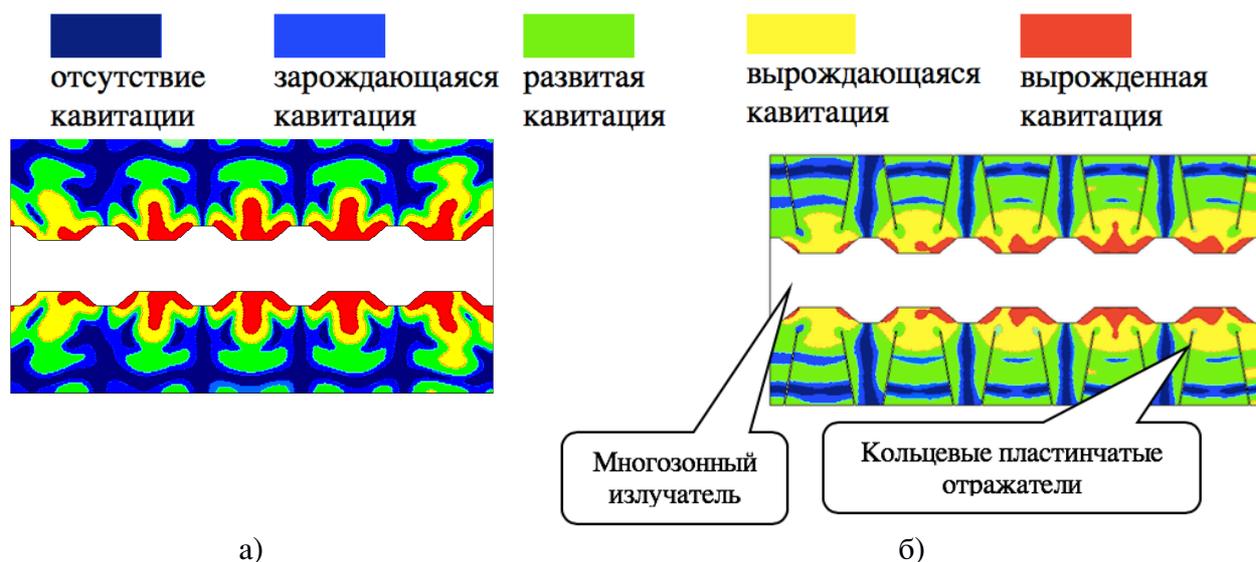
На основе предложенного подхода к моделированию и предложенного критерия максимума КПД ультразвукового воздействия созданы:

– модель формирования и распространения кавитационной области под действием ультразвуковых колебаний [3];

– кинетические модели процессов в системах с жидкой фазой [3–5].

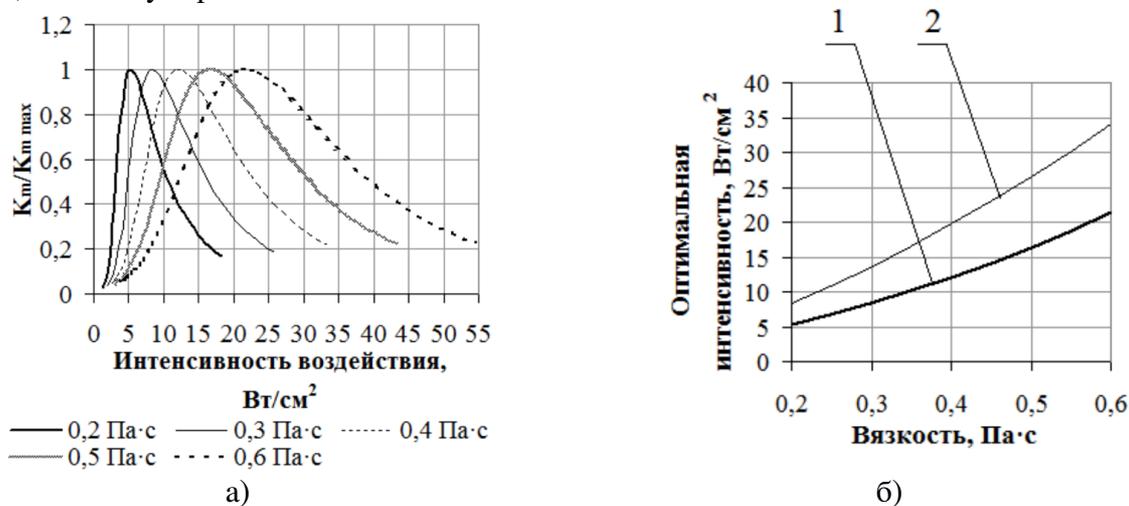
Модель формирования кавитационной области [3] позволила установить, что минимальная дисперсия интенсивности ультразвуковых колебаний (1) – первое условие максимума КПД, обеспечивается в цилиндрическом технологическом объёме с многозонным излучателем и кольцевыми пластинчатыми отражателями с перфорациями (отверстиями) (рисунок 2) [5].

Кинетические модели процессов в системах с жидкой фазой позволили установить оптимальные интенсивности, обеспечивающие выполнение второго условия максимума КПД – максимум структурной составляющей коэффициента поглощения при интенсивности первичных колебаний, генерируемых с поверхности ультразвукового излучателя.



**Рисунок 2 – Распределения кавитационных зон в продольном сечении технологической камеры без отражателей (а) и с кольцевыми пластинчатыми отражателями (б).**

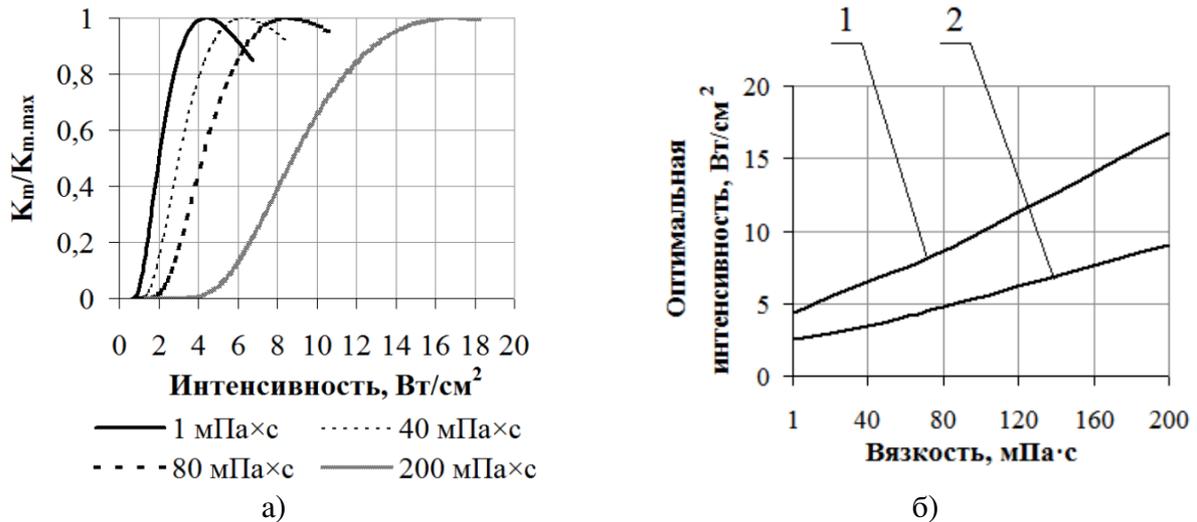
На рисунке 3а представлены зависимости структурной составляющей коэффициента поглощения от интенсивности ультразвукового воздействия при различных вязкостях жидкой фазы на примере процесса деполимеризации [4] гомогенной высокомолекулярной жидкости. На рисунке 3б приведены зависимости оптимальной интенсивности, обеспечивающей максимум структурной составляющей коэффициента поглощения, и интенсивности, обеспечивающей максимальную долю энергии УЗ колебаний, переходящей в схлопывание кавитационных пузырьков.



- 1 – оптимальная интенсивность, обеспечивающая максимальную долю энергии УЗ колебаний, переходящей в изменение структуры среды (деполимеризацию);  
 2 – оптимальная интенсивность, обеспечивающая максимальную долю энергии УЗ колебаний, переходящую в схлопывание кавитационных пузырьков

**Рисунок 3 – Зависимости относительной структурной составляющей коэффициента поглощения за счёт деполимеризации молекул от интенсивности ультразвукового воздействия при различных начальных вязкостях (а) и оптимальной интенсивности от вязкости (б)**

На рисунках 4а, б приведены аналогичные зависимости для процесса ультразвукового диспергирования суспензий [5].



**Рисунок 4 – Зависимости относительной составляющей коэффициента поглощения за счёт диспергирования от интенсивности ультразвукового воздействия при различных начальных вязкостях жидкой фазы (а) и оптимальной интенсивности, обеспечивающей максимальную энергоэффективность диспергирования, от вязкости (б)**

Зависимости, приведённые на рисунках 3а, 4а, имеет экстремальный характер, и положение максимума определяет оптимальную интенсивность воздействия (рисунки 3б, 4б), при которой наибольшая доля энергии ультразвуковых колебаний непосредственно переходит в изменение структуры озвучиваемой среды (структурная составляющая коэффициента поглощения максимальна).

Аппроксимация полученных зависимостей позволила установить, что оптимальная интенсивность  $I_{OPT}$ , при которой достигается максимум структурной составляющей коэффициента поглощения колебаний для процессов, реализуемых в кавитационном режиме (деполимеризация и диспергирования), линейно пропорциональна интенсивности, обеспечивающей максимальную долю энергии УЗ колебаний, переходящую в схлопывание кавитационных пузырьков:

$$I_{OPT} = kI_{opt.cav}; \quad (4)$$

где  $k$  – поправочный коэффициент, зависящий от наличия/отсутствия межфазной поверхности в озвучиваемой системе с жидкой фазой ( $k=0,63$  для деполимеризации и  $k=1,75$  для диспергирования).

### Выводы

Предложен общий подход к моделированию процессов формирования структуры и свойств систем с жидкой фазой в ультразвуковых полях. Созданные модели на основе предложенного подхода позволили выявить оптимальные режимы (интенсивность колебаний) и условия (геометрия технологического объёма), обеспечивающие максимальный КПД ультразвукового воздействия.

Исследования формирования кавитационной области и деполимеризации молекул проводились за счёт средств Гранта Президента РФ №МК-2813.2018.8. Общий подход к оптимизации ультразвукового воздействия был разработан и исследования ультразвукового диспергирования были проведены при финансовой поддержке РНФ (Проект № 18-79-00094).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feng L., Liu S., Zheng H., Liang J., Sun Y., Zhang S., Chen X. Using ultrasonic (US)-initiated template copolymerization for preparation of an enhanced cationic polyacrylamide (CPAM) and its application in sludge dewatering // Ultrason. Sonochem. 2018. Vol. 44. P. 53-63.

2. Zhang Y., Ma L., Cai L., Liu Y., Li J. Effect of combined ultrasonic and alkali pretreatment on enzymatic preparation of angiotensin converting enzyme (ACE) inhibitory peptides from native collagenous materials // *Ultrason. Sonochem.* 2017. Vol. 36. P. 88-94.

3. Голых Р.Н. Моделирование формирования структуры и свойств материальных сред в высокоинтенсивных ультразвуковых полях // *Моделирование неравновесных систем – 2017: Материалы XX Всероссийского семинара.* Красноярск: ИВМ СО РАН. 2017. С. 37-42.

4. Golykh R.N. Model of ultrasonic cavitation depolymerization of oil for evaluation of optimum modes and conditions providing reducing viscosity at low temperatures // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2018. Vol. 193. Conf. 1. 7 p.

5. Голых Р.Н., Хмельёв В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н. Ультразвук. Воздействие на системы с несущей жидкой фазой: монография. Барнаул: Изд-во АлтГТУ. 2018. 276 с.

УДК 621.926.8

**ГИДРОДИНАМИКА СВОБОДНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ В АППАРАТЕ  
КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ  
HYDRODYNAMICS OF A FREE TURBULENT JET IN IN THE APARATUS OF THE  
COMBINED GRINDING PROCESS**

**Сергей Владимирович Воробьев, Ирина Викторовна Постникова,  
Валериан Николаевич Блиничев  
Sergey V. Vorobev, Irina V. Postnikova, Valerian N. Blinichev**

*Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново  
Ivanovo State University of Chemical Technology, Ivanovo, Russia  
(e-mail: ch4rlythec4t@gmail.com, poirvic@mail.ru, blinich@isuct.ru)*

*Аннотация:* В работе рассматривается гидродинамика свободной затопленной струи, описываются её основные геометрические параметры. Проводится анализ полученных ранее зависимостей скоростей движения потоков воздуха при свободном истечении высоконапорной струи как нашими, так и зарубежными исследователями. Описывается эжекционное струйное течение с определения зоны подсоса твердой фазы в струю.

*Abstract:* The paper discusses the hydrodynamics of a free submerged jet, describes its main parameters. The analysis of previously obtained dependences of the speeds of air flow during the outflow of a high-pressure jet by both our and foreign researches is carried out. The ejection jet stream is described from the definition of the zone of suction of the solid phase into the jet.

*Ключевые слова:* свободная затопленная струя, угол раскрытия струи, коэффициент эжекции, когерентные структуры, зона подсоса.

*Keywords:* free submerged jet, stream angle, the coefficient of ejection, coherent structures, zone of suction.

**Введение**

В настоящее время, несмотря на появление конструкций струйных мельниц с истечением струй в свободный объём твердых частиц (например, фирмы Frisch), не имеется методик, позволяющих рассчитать как конструкцию, так и скорости движения частиц в струе, знание которых необходимы далее для расчета вероятностей столкновения, разрушения, а также гранулометрического состава материала при однократном столкновении частиц в противоточных струях.

В качестве основы струйного течения рассмотрим свободную затопленную струю (вытекающую в среду с одинаковой плотностью).

Выходной канал струи имеет в своем поперечном сечении в основном круглый или прямоугольный профиль. В первом имеются круглые или осесимметричные струи [1], а во втором – инверсионные струи [2].

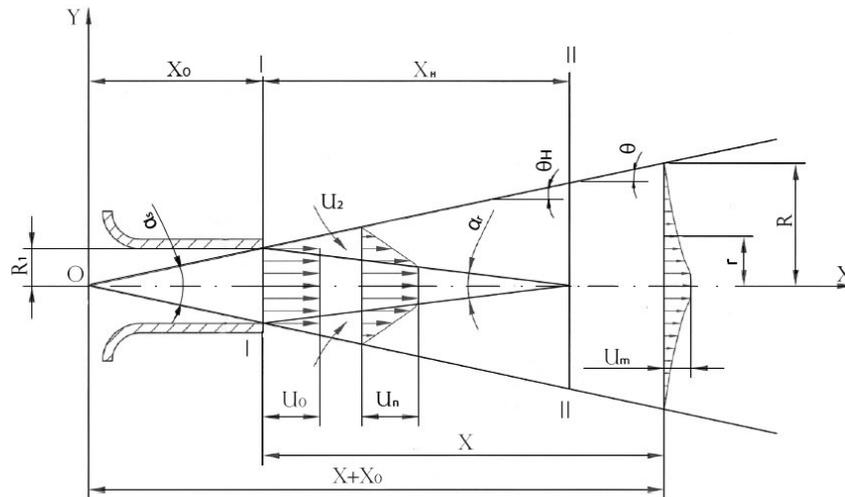
На сегодняшний день струи осесимметричного типа подробно исследованы при широком диапазоне чисел Рейнольдса и различной плотности рабочего газа. В недавнем обзоре о круглых турбулентных струях [3] были представлены экспериментальные и численные достижения за период 86 лет. Результаты экспериментальных исследований механизма развития и турбулизации круглой струи при дозвуковых скоростях с классическим (ударным) профилем скорости представлены в работах [4; 5].

Развитие мощностей вычислительных ресурсов позволили посредством моделирования больших вихрей (LES) оказаться полезным для определения полных полей скоростей потока круглых струй [6–11].

### Расчёт геометрических параметров струи

В качестве основы струйного течения рассмотрим свободную затопленную струю (вытекающую в среду с одинаковой плотностью).

Согласно схеме, представленной на рисунок 1, начальный участок струи состоит из ядра струи с постоянным значением продольной скорости  $\frac{U_n}{U_0} = 1$  и пограничным слоем, в котором продольная составляющая скорости меняется от значения  $U_0$  в ядре струи до значения на внешней границе струи.



обозначения: O - полюс,  $R_1$  - радиус сопла (м),  $X_0$  - расстояние между полюсом и выходом из сопла (м),  $X_n$  - начальный участок струи (м), R - ширина (радиус) потока в любом поперечном сечении (м), r - расстояние от оси струи до заданной точки сечения потока (м), X - расстояние от сопла до рассматриваемого сечения струи (м),  $\theta$  - половина угла раскрытия струи ( $^\circ$ ),  $\theta_n$  - половина угла раскрытия струи на начальном участке  $X_n$  ( $^\circ$ ),  $\alpha_s$  - угол сужения ядра потока ( $^\circ$ ),  $\alpha_s$  - угол ядра потока ( $^\circ$ ),  $U_0$  - скорость воздуха на выходе из сопла (м/с),  $U_n$  - скорость на начальном участке  $X_n$  вдоль оси X (м/с),  $U_m$  - максимальная скорость воздуха (вдоль оси струи X) в рассматриваемом сечении потока (м/с),  $U_2$  - скорость эжектируемого воздуха (м/с).

**Рисунок 1 - Схематичное изображение круглой осесимметричной струи;**

Абрамович Г.Н. [12], исходя из предположения, что углы раскрытия на основном и начальном участках одинаковые  $\theta_n = \theta$ , приводит расчет длины начального участка струи  $X_n$  и расстояние между полюсом и соплом  $X_0$ :

$$X_n = 0,67 \frac{R_1}{a} \quad (1)$$

$$X_0 = 0,29 \frac{R_1}{a} \quad (2)$$

где  $a = 0,07-0,09$  – коэффициент структуры, зависящий от основных параметров струи.

Радиус струи  $R$  на основном участке определяется выражением (3):

$$R = \left( 3,4 \frac{aX}{R_1} + 1 \right) R_1 \quad (3)$$

Радиус струи  $R'_{гр}$  на переходном участке, а определяется выражением (4):

$$R'_{гр} = 2,74R_1 \quad (4)$$

Половину угла раскрытия струи на основном участке предлагается рассчитывать, из выражения (5):

$$tg\theta = \frac{y_{h_0/2} - y'_{h_0/2}}{0,283(X - X_H)}, \text{ откуда } \theta \approx 10^\circ \quad (5)$$

здесь  $y_{h_0/2}$  - величина, характеризующая границу струи в масштабе 0,293, т. е.  $R = \frac{y_{h_0/2}}{0,293}$ ,  $y'_{h_0/2} = 0,8R_1$  - ордината в переходном сечении, м;  $y_{h_0/2}$  - текущие координаты, м.

Половину угла раскрытия струи на начальном участке предлагается рассчитывать следующим образом:

$$tg\theta_H = \frac{R'_{гр} - R_1}{X_H}. \quad (6)$$

На длине  $X_H$  начального участка половина угла раскрытия струи меняется от  $0^\circ$  до  $10^\circ$  при среднем значении  $\theta_H = 8^\circ 15'$ .

Определение угла сужения ядра потока  $\alpha_r$  и угла ядра потока  $\alpha_s$ , осуществляется с помощью зависимостей (7) и (8), соответственно:

$$\alpha_r = 2 \arctg \frac{a}{0,67} \quad (7)$$

$$\alpha_s = 2 \arctg \frac{a}{0,29} \quad (8)$$

На основании экспериментальных данных, представленных Leszek Zawadzki [13]:  $\alpha_r = 14^\circ$  и  $\alpha_s = 30^\circ$ .

### Расчёт скорости движения потоков воздуха в струе

Анализ многочисленных работ, проведенный В.П. Корпачевым [14], показал, что результаты исследований потока, возбужденного гидравлической струей, истекающей из сопла, можно разделить на три группы: первая - зависимости для определения скорости на оси струи начального и основного участков потока, представленные в таблице 1, вторая группа - зависимости для определения средней скорости по поперечному сечению потока, представленные в таблице 2, третья группа - универсальные формулы для определения скорости в любой точке поперечного сечения струи, представленные в таблице 3.

Для наглядности проведём расчёт  $U_m, U$  для каждого из этих случаев, при исходных данных:  $U_0 = 100 \frac{м}{с}$ ;  $d_0 = 0,01$  м;  $X = 0,1$  м;  $r = 0,01$  м, где  $d_0$  - диаметр сопла, м;  $r$  - расстояние от оси струи до заданной точки сечения потока, м.

На основании расчётных данных [14] наиболее универсальной формулой, отражающей характер распределения скоростей в потоке, возбужденном свободной затопленной гидравлической струей, является формула (21), т. к. позволяет определить скорость в любой точке сечения потока и осевую скорость.

**Таблица 1 – Расчетные зависимости для определения скорости на начальном и основном участке.**

Формула	$U_m, \text{м/с}$	Примечание
$U_x = \varphi \frac{U_0 d_0}{x}$ (9)	60	А.Я. Милович [15], $\varphi = 6$
$\frac{U_0}{U_x} = \frac{a + 0,148 \frac{d_0}{x} x}{0,48 d_0}$ (10)	56,6	Г.М. Абрамович [12], $a = 0,07 - 0,08$
$U_x = 3,78 U_0 \sqrt[1,15]{\frac{d_0}{x}}$ (11)	51	Ю.Я. Дмитриев [16]
$\frac{U_m}{U_x} = \frac{1}{6,4} \frac{x}{d_0}$ (12)	64	М. Albertson [17],
$\frac{U_0}{U_x} = \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{1}{4c^2} \left( \frac{d_0}{x} \right)^2 \right] \right\}^{-0,5}$ (13)	55,7	И.А.Шепелев [18], $c_2 = 0,082$
$U_x = U_0 \frac{0,96}{\frac{ax}{R_0} + 0,29}$ (14)	65,1	Лебедев В.В. [19]

**Таблица 2 – Расчетные зависимости для определения средней скорости на начальном и основном участке**

Формула	$U_m, \text{м/с}$	Примечание
$U_c = \frac{m}{1 + m} \frac{U_0 d_0}{x}$ (15)	22,5	В.М. Коновалов [20], $m = 2,9$
$U_c = U_0 \frac{1,64}{\frac{x}{d_0} + 2,56}$ (16)	13,1	В.Н. Худоногов [21],
$U_c = U_0 \frac{0,095 U_0}{\frac{ax}{d_0} + 0,145}$ (17)	11,2	В.И. Калицун [22], $a = 0,07$

**Таблица 3 – Универсальные расчетные зависимости для определения скорости в заданной точке сечения потока**

Формула	$U, \text{м/с}$	Примечание
$U^2 = \frac{b^2 u^2}{\pi x^2} \int_F \exp \left[ -\left( \frac{br}{x} \right)^2 \right] df$ (18)	27,9	П.В. Меленьев [23] $k = 6,5$
$U = k \frac{U_0 d_0}{x} \exp \left[ -2k^2 \left( \frac{r}{x} \right)^2 \right];$ (19)		
$F = \frac{\pi d_0^2}{4}$ (20)		
$U = k \frac{U_0 d_0}{x} \exp \left[ -2k^2 \left( \frac{r}{x} \right)^2 \right];$ (21)	28,2	Norbert L. [24], $k = 6,4$
$U_x = k \frac{U_0 d_0}{x}$ (22)		
$U = U_x e^{-0,5 \left( \frac{r}{ax_H} \right)^2}$ (23)	23,7	В.В. Лебедев [19]

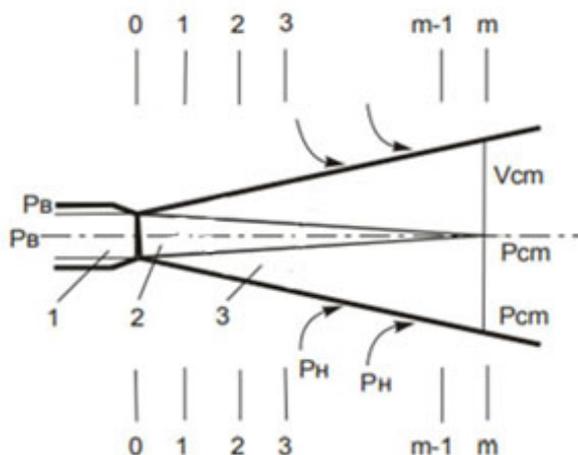
### Расчёт коэффициента эжекции воздуха

Известно, что при дозвуковых скоростях по периферии струи возникает зона разрежения или зона подсоса (эжекции). Именно в этой области скорость струи будет постепенно приближаться к скорости окружающего воздуха, и осуществляются начальные фазы процесса смешивания (по этой причине эту область часто называют слоем смешения).

Режим работы аппарата в значительной степени зависит от количества подсосываемой среды, т.е. от коэффициента эжекции  $\beta$ . Он показывает, сколько килограммов низконапорной среды компримируется с 1 килограммом высоконапорной среды и определяется по соотношению (24):

$$\beta = \frac{G_2}{G_1} \quad (24)$$

Поляков А. В. совместно с группой авторов [25] предложили принципиальную схему эжекционного струйного течения, представленную на рисунке 2. На схеме показано, что захват высоконапорной средой, отделившейся из ядра струи, низконапорной струи (ингибитора) происходит на участке сечения 0-0. Перемешивание между низконапорной и высоконапорной среды дает пограничный слой (сечение 1-1). На участке между сечениями 1-1 и 2-2 происходит дополнительное проникновение низконапорной среды в высоконапорную.



$\rho_v, \rho_n, \rho_{cm}$  – плотности высоконапорной, низконапорной сред и их смеси, кг/м<sup>3</sup>;  
 $V_{cm}$  – скорость смеси высоконапорной и низконапорной сред в переходном сечении струи m-m, м/с.

**Рисунок 2 – Схема эжекционного струйного течения 1 – сопло; 2 – потенциальное ядро; 3 – пограничный слой;  $P_v, P_n, P_{cm}$  – давления высоконапорной, низконапорной сред и полный напор струи, Па;**

**Выводы:** представленные результаты исследования истечения турбулентной высоконапорной струи в однородную среду позволяют определить габариты зоны разрежения в зависимости от диаметра сопла и скорости истечения воздуха, необходимые для надежного расчета коэффициента эжекции гетерогенной среды (воздух + твердые частицы). Знание концентрации и скорости движения частиц твердой фазы в струе позволит рассчитать как производится турбулизация струи по твердой фазе, так и вероятности разрушения частиц в противоточных сталкивающихся струях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-03-00787.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kopias K., Kossowski Z.: Fibres & Textiles in Eastern Europe Vol, 14, No. 1 (55), 2006, pp 76-78.
2. Komisarczyk A.: Włókniny opatrunkowe wytwarzane metodą rozpuszczalnikową spod filiiery, Praca doktorska, Politechnika Łódzka 2008.

3. *C. Ball, H. Fellouah, A. Pollard*, The flow field in turbulent round free jets, *Progress in Aerospace Sciences* 50 (2012) 1 – 26. doi:10.1016/j.paerosci.2011.10.002.
4. *Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А.* Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи // *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т. 15, № 1. С. 59–73.
5. *Litvinenko M. V.* On the Formation and Role of the Longitudinal Structures during the Laminar Breakdown Process in Jets // *Gote-borg: Publ. of the Chalmers Univ. of Technol.*, 2003. Pag. var. p.: Thesis for the Degree of Li-centiate in Engineering.
6. *J. R. DeBonis, J. N. Scott*, Large eddy simulation of a turbulent compressible round jet, *AIAA Journal* 40 (7) (2002) 1346–1354. doi:10.2514/2.1794.
7. *H. Suto, K. Matusara, M. Kobayashi, Y. Kaneko*, Large eddy simulation of flow and scalar transport in a round jet, *Heat Transfer—Asian Research* 33 (3) (2004) 175–188. doi:10.1002/htj.20001.
8. *C. Boguey, C. Bailly*, *Direct and Large-Eddy Simulation VII*, Springer, 2010, Ch. A Study of the Influence of the Reynolds Number on Jet Self-Similarity Using Large-Eddy Simulation, pp. 13–18. doi:10.1007/978-90-481-3652-0\_2.
9. *B. Chernyavsky, T. C. Wu, F. P`eneau, P. B`enard, P. Oshkai, N. Djilali*, Numerical and experimental investigation of buoyant gas release: Application to hydrogen jets, *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (3) (2011) 2645–2655. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.04.130.
10. *N. Tajallipour, V. Kumar, M. Paraschivoiu*, Large-eddy simulation of a compressible free jet flow on unstructured elements, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 23 (2) (2013) 336–354. doi: 10.1108/09615531311293506.
11. *Абрамович Г. Н.* Теория турбулентных струй [Текст]. М.:1984. 716 с.
12. *Leszek Zawadzki* Determination of the Air Velocity in the Free Stream Flowing out of a Cylindrical and Two-Gap Skewed Jet (Dual Slot Die).
13. *Корначев В. П.* Теоретические основы водного транспорта леса. Издательство: Академия Естествознания. 2009. ISBN: 978-5-91327-042-9.
14. *Милович А. Н.* Гидродинамические основы газовой борьбы [Текст] В кн.: *Гидравлика*. М., Л.: Энергоиздат, 1950.
15. *Дмитриев Ю. Я.* Гидравлические ускорители на лесосплаве [Текст]. М.: Лесная промышленность, 1971.–200 с.
16. *Albertson M. L.* Diffusion of submerged Jets/ M.L. Albertson., Dai Y., Jensen R.A. *Transactions, ASCE, Vol. 115, 1955. – 639 p.*
17. *Шепелев, И. А.* Аэродинамика воздушных потоков в помещениях [Текст] М.: 1978. 145 с.
18. *Лебедев В. П., Леманов В.В.* Взаимодействие пристенной струи со встречным потоком. // *Гидродинамика больших скоростей*. Чебоксары. ЧГУ. 1985. с.83-87.
19. *Коновалов И. М.* Свободные турбулентные струи жидкости [Текст]. Труды ЛИИВГ, N 14, 1947.
20. *Худоногов В. Н.* Гидродинамическое взаимодействие плотов и внешней среды [Текст]. Красноярск, 1966.225 с.
21. *Калищун В. Н., Дроздов Н. В.* Основы гидравлики и аэродинамики [Текст] , М.: Стройиздат, 1980. 247с.
22. *Мелентьев П. В.* Новая теория свободной струи [Текст] // Труды ВМИ, т.1, 1952.
23. *Norbert L.* ASCE and Rodolfo Undan. Forses from submerged jets/ Norbert, L., Ackermann. M. // *Journal of the HYDRAULIGS DIVISION*. Nov., n 11, 1970. 2231p.
24. *Поляков А. В., Терещенко И. А., Бойко С. И., Кунина П. С.* Применение односоплового эжекционного струйного аппарата для ввода ингибитора в промышленный газопровод. Сетевое издание «Нефтегазовое дело», 2012, Т. 1, с. 151-157.

УДК 546.791+547.415.1

**СОРБЦИЯ УРАНА НА ВОЛОКОНИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ EUDRAGIT  
ИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ**  
**ADSORPTION OF URANIUM ON EUDRAGIT FIBERS FROM TECHNOLOGICAL  
SOLUTIONS**

**Александр Николаевич Велешко\***, **Наталья Рустемовна Кильдеева\*\***,  
**Вера Константиновна Ожогина\***, **Екатерина Вячеславна Румянцева\***,  
**Николай Викторович Паль\***  
**Alexander N. Veleshko\***, **Natalia R. Kil'deeva\*\***, **Vera K. Ozhogina\***,  
**Ekaterina V. Rumyantseva\***, **Nikolay V. Pal\***

*\*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, Москва*

*\*National Research Centre «Kurchatov institute», Russia, Moscow*

*(e-mail: Veleshko\_AN@nrcki)*

*\*\*Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина*

*(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва*

*The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow*

*(e-mail: kildeeva@mail.ru)*

*Аннотация:* Представлены результаты изучения взаимодействия уранил-иона с сополимерами Eudragit. Показано влияние состава растворов на эффективность извлечения урана рассматриваемыми полимерными материалами. Спектральными данными подтверждено образование устойчивых соединений между уранил ионом и Eudragit E, Eudragit RS.

*Abstract:* The results of studying the interaction of the uranyl ion with Eudragit copolymers are presented. The influence of the composition of the solutions on the efficiency of uranium extraction by the considered polymer materials is shown. Spectral data confirmed the formation of stable compounds between the uranyl ion and Eudragit E, Eudragit RS.

*Ключевые слова:* Eudragit E, Eudragit RS, уранил-ион, сорбция радионуклидов, очистка растворов.

*Keywords:* Eudragit E, Eudragit RS, uranyl ion, radionuclides adsorption, solution decontamination.

Современная аналитическая практика и концепция обращения с жидкими радиоактивными отходами низкого уровня активности требуют применения высокоэффективных материалов, прочно связывающих радионуклиды и позволяющих проводить их выделение, разделение и концентрирование. В технологических операциях и при лабораторном анализе для извлечения радионуклидов могут применяться полимерные ионообменники, неорганические материалы и композитные сорбенты на их основе, а также комплексобразующие сорбенты [1-3].

В последние десятилетия широкое распространение в медицинской практике получили вещества зарегистрированной торговой марки Eudragit® представляющие собой сополимеры производных акриловой и метакриловой кислот (Evonik, Rohm&Haas GmbH). Соплимеры выпускаются под общей торговой маркой, но имеют разный состав и разные типы функциональных групп и поэтому могут использоваться не только в фармакологии, но и в других областях, в частности для создания сорбционно-активных материалов. Биодegradуемые материалы на основе смеси Eudragit E [4] или Eudragit RS [5] с хитозаном могут стать альтернативой синтетическим смолам для получения сорбционных материалов. В работе [6] показана возможность получения хелатного соединения Ni с Eudragit C для последующего применения в хроматографии при выделении компонентов клеточной стенки из растворов. Кроме того образование подобного прочного комплекса иона двухвалентного металла с сополимером метакрилата, содержащего атом азота, позволяет рассматривать

Eudragit E в качестве исходной матрицы для синтеза сложных комплексных соединений металл-лиганд [7].

Описание волокнистых материалов на основе сополимеров Eudragit®, методов их получения и изучения их взаимодействия с рядом радионуклидов описаны ранее в работе [8]. Представляло интерес детальным образом рассмотреть взаимодействие сополимеров Eudragit® с уранил-ионом. Данный радионуклид распространен как в природных средах так и в техногенных отходах, попадающих в объекты окружающей среды.

На основании данных о растворимости материалов EdRS проведены предварительные эксперименты по сорбции урана в интервале pH от 2 до 10. Показано, что наибольшая эффективность сорбции достигалась при реализации процесса при pH 5-6, при этом значения коэффициентов распределения ( $K_d$ ) составляли  $\sim 2 \cdot 10^2$  мл/г. Полученные результаты предполагают возможность использования EdRS в качестве сорбционного материала для извлечения радионуклидов в растворах с различным содержанием солей в интервале pH = 5-6. Смещение pH в кислую или щелочную область приводило к снижению эффективности сорбции. Применение EdE ограничивалось растворимостью этого полимера в средах с pH менее 5.

Известно, что прочность комплексов An и Ln изменяется в следующей последовательности для ряда лигандов  $[NO_3^-] < [SO_4^{2-}] < [CO_3^{2-}]$  [9,10]. Для подтверждения этой закономерности определено влияние присутствия  $Na_2CO_3$  и  $Na_2SO_4$  в растворе, содержащем уранил-ион. Показано, что увеличение концентрации  $Na_2CO_3$  и  $Na_2SO_4$  в растворе до значений 0.5 и 5 моль/л соответственно при сорбции  $UO_2^{2+}$  на EdE приводило к уменьшению  $K_d$  этого элемента. Обнаруженные значения  $K_d$  в условиях одинаковых концентраций солей оказались выше для сульфатных сред по сравнению с растворами  $Na_2CO_3$ .

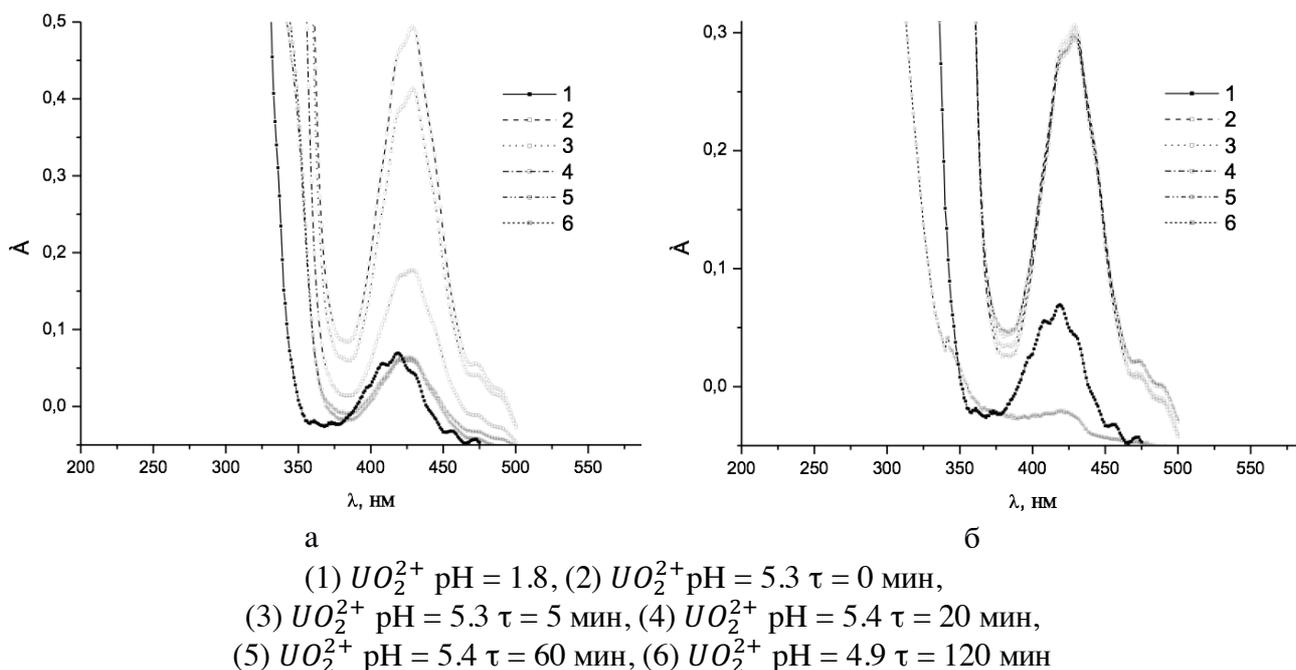
Кроме того, были получены результаты определения степеней извлечения иона  $UO_2^{2+}$  в растворах  $NaNO_3$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $Na_2CO_3$  с концентрацией 5 г/л. Показано, что EdE извлекает ион  $UO_2^{2+}$  ( $[UO_2^{2+}] = 10^{-6}$  моль/л) из нитратных растворов на 67%, из сульфатных на 63%, из карбонатных на 39%. Аналогичные данные получены для EdRS и составляют 66%, 52%, 28% для растворов  $NaNO_3$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $Na_2CO_3$  соответственно. Таким образом, наиболее перспективными средами для исследования сорбционных свойств EdE и EdRS и их последующего применения являются растворы нитрата и сульфата натрия.

С целью определения времени и скорости протекания процесса взаимодействия уранил-иона с сополимерами EdE и EdRS были получены кинетические зависимости (изменение концентрации  $C/C_0$ ) в водных растворах  $UO_2(NO_3)_2$  различных концентраций. Показано, что кинетическое равновесие при сорбции из растворов с концентрацией  $[^{233}UO_2^{2+}] = 10^{-6}$  и  $10^{-2}$  моль/л устанавливалось за 10 и 40 мин и 20 и 240 мин на EdE и EdRS соответственно. Следует отметить, что при концентрации  $[UO_2^{2+}] = 10^{-2}$  моль/л фаза сорбента приобретала характерное для солей уранил-ионов желто-зеленое окрашивание. Для обоих типов сорбентов в условиях равновесия при различных концентрациях раствора были определены равновесная статическая обменная емкость (PCOE) и коэффициенты распределения.

Так для EdE для концентрации  $UO_2(NO_3)_2$   $10^{-6}$  моль/л значение PCOE составило  $9.3 \cdot 10^{-4}$  ммоль/г, а  $K_d$   $4.7 \cdot 10^3$  мл/г, для  $10^{-2}$  моль/л значения PCOE и  $K_d$  составили 3.6 ммоль/г и  $2.2 \cdot 10^3$  мл/г соответственно. Подобные характеристики сорбции получены и для EdRS. Значения PCOE и  $K_d$  для концентраций  $UO_2(NO_3)_2$   $10^{-6}$  моль/л и  $10^{-2}$  моль/л составили  $2.5 \cdot 10^{-4}$ , 2.7 ммоль/г и 6.0,  $5.6 \cdot 10^3$  мл/г соответственно. При повышении концентрации  $UO_2(NO_3)_2$  в растворе при использовании EdE происходило увеличение равновесной сорбции и снижение  $K_d$ . Для EdRS наблюдалась обратная картина: с ростом концентрации  $UO_2(NO_3)_2$  происходило возрастание как значений PCOE, так и  $K_d$ . Для объяснения этого факта были получены спектры поглощения  $^{233}UO_2^{2+}$  в нитратных растворах в зависимости от времени

сорбции на сорбентах обоих типов при концентрации радионуклида в растворе  $10^{-2}$  моль/л (рисунок 1 а, б).

Как видно из рисунка 1 а в случае сорбции  $^{233}\text{UO}_2^{2+}$  на EdE происходило плавное уменьшение величины максимума полосы поглощения во времени. В отличие от EdE, для EdRS (рисунок 1 б) изменение высоты максимума полосы поглощения отсутствовало в течение  $\sim 60$  мин, что указывало на низкую эффективность сорбции  $^{233}\text{UO}_2^{2+}$  на EdRS. Резкое уменьшение высоты максимума при контактировании раствора с сорбентом более 60 мин, по-видимому, можно объяснить образованием гидролизных форм уранил-иона и их осаждением на поверхности волокон сорбента, выступающих как центры кристаллизации [11]. В связи с этим расчет скоростей химической реакции проводили только для EdE. Для раствора  $[\text{UO}_2^{2+}]$  с концентрацией  $10^{-6}$ , моль/л скорость химической реакции составила  $6 \cdot 10^{-7}$  моль/(л·с), а при  $10^{-2}$ , моль/л –  $6 \cdot 10^{-3}$  моль/(л·с).



**Рисунок 1 – Спектры поглощения  $^{233}\text{UO}_2^{2+}$  (A) в нитратных растворах в зависимости от времени сорбции на EdE (а) и EdRS (б).  $[\text{UO}_2^{2+}] = 10^{-2}$  моль/л, pH = 5.3, V/m = 1000.**

Таким образом, сополимеры EdE и EdRS продемонстрировали удовлетворительные характеристики при взаимодействии с уранил-ионом и могут служить основой для получения новых сорбентов применимых как аналитической практике так и при извлечении урана из природных и техногенных растворов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guerra D.L. et al. Application of Brazilian kaolinite clay as adsorbent to removal of U(VI) from aqueous solution: Kinetic and thermodynamic of cation–basic interactions // J. Solid State Chem. 2010. Vol. 183, № 5. P. 1141–1149.
2. Guerra D.L., Viana R.R., Airolidi C. Use of raw and chemically modified hectorites as adsorbents for Th(IV), U(VI) and Eu(III) uptake from aqueous solutions // Desalination. 2010. Vol. 260, № 1–3. P. 161–171.
3. Sun Y. et al. Comparison of U(VI) removal from contaminated groundwater by nanoporous alumina and non-nanoporous alumina // Sep. Purif. Technol. 2011. Vol. 83. P. 196–203.
4. Simanenkova L.M., Perminov P.A., Kil'deeva N.R. Polymeric Compositions from Mixtures of Amine-Containing Polymers // Fibre Chem. 2012. Vol. 43, № 6. P. 421–425.
5. Haque S.E., Sheela A. Miscibility of eudragit/chitosan polymer blend in water determined by physical property measurements. // Int. J. Pharm. 2013. Vol. 441, № 1–2. P. 648–653.

6. Li L. et al. Immobilization of the recombinant xylanase B (XynB) from the hyperthermophilic *Thermotoga maritima* on metal-chelate Eupergit C 250L // *Enzyme Microb. Technol.* 2007. Vol. 41, № 3. P. 278–285.

7. Romyantseva E.V. et al. Preparation and properties of modified spherically granulated chitosan for sorption of  $^{137}\text{Cs}$  from solutions // *Radiochemistry.* 2009. Vol. 51, № 5. P. 496–501.

8. Veleshko A.N. et al. Fiber materials based on amine-containing copolymer Eudragit® for radioanalytical applications // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* Springer International Publishing, 2018. Vol. 318, № 3. P. 2227–2233.

9. Назаренко В.Н., Антонович В.П., Невская Е.М. Гидролиз ионов металлов в разбавленных растворах. Москва: Атомиздат, 1979. 192 p.

10. Chopin G.R. Actinide speciation in aquatic systems // *Mar. Chem.* 2006. Vol. 99, № 1–4. P. 83–92.

11. Tsezos M., Volesky B. The mechanism of uranium biosorption by *Rhizopus arrhizus*. // *Biotechnol. Bioeng.* 1982. Vol. 24. P. 955–969.

УДК 666.3-127.2, 66.097

## КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕЙСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ CATALYSTS BASED ON HIGH POROUS CELLULAR MATERIALS FOR SOLVING ECOLOGICAL PROBLEMS

**Владимир Николаевич Грунский, Мария Григорьевна Давидханова,**

**Микаэл Давидович Гаспарян, Сергей Егорович Золотухин**

**Vladimir N. Grunsky, Mariya G. Davidkhanova, Mikael D. Gasparyan, Sergey E. Zolotukhin**

*Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Россия, Москва*

*D.Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russia, Moscow*

*(e-mail: oxt@muctr.ru, maria@muctr.ru, oxt2011@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрены блочные каталитические контактные элементы на основе керамических высокопористых ячейстых материалов (ВПЯМ), импрегнированные каталитически активными композициями из оксидов *d*- и *f*-элементов. Показаны реализованные процессы экологического катализа с их применением.

*Abstract:* Block catalytic contact elements based on highly porous ceramic cellular materials (CPMS) impregnated with catalytic-active compositions of *d* and *f* oxides are considered. The implemented processes of ecological catalysis with their use are shown.

*Ключевые слова:* керамические высокопористые ячейстые материалы (ВПЯМ), блочные носители, гетерогенный жидкофазный и газофазный катализ

*Keywords:* ceramic highly porous cellular materials (HPCM), block carriers, heterogeneous liquid-phase and gas-phase catalysis

Проблема комплексной очистки отходящих газов от токсичных компонентов стоит особенно остро и актуально в градопромышленных агломерациях. Среди существующих методов очистки газовых выбросов: адсорбционного, мембранного, биологического, термического и каталитического, различные варианты последнего становятся доминирующими в современном мире и требуют разработки новых, композиционных материалов с характеристиками, превосходящими известные, сочетающие заданные структуру и свойства от нано- до макроструктуры. Не меньший урон экологии наносят промышленные сточные воды, содержащие нефтепродукты, фенолы и другие органические соединения. По оценкам экспертов ВОЗ, 80% болезней человека обусловлено экологическими проблемами. На производство катализаторов, предназначенных для решения экологических

проблем, сейчас в мире затрачивается больше средств, чем на получение катализаторов для химической промышленности или нефтепереработки. Многочисленные исследования, проводимые в Российской Федерации и за рубежом, сосредоточены на поиске новых материалов для носителей катализаторов – жаростойких, прочных, с высокоразвитой поверхностью и низким гидравлическим сопротивлением, выдерживающих высокие удельные нагрузки и обладающих длительным ресурсом работы, доступных по стоимости для применения в химической промышленности, энергетике, транспорте, экологии.

Одним из наиболее перспективных по совокупности характеристик носителей катализаторов являются высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ). Активные исследования по применению высокопористых материалов в качестве носителей катализаторов начались лишь в последние годы, хотя сам класс материалов известен с середины XX века. Актуальной проблемой остается разработка способов получения композиционных ВПЯМ с заданными характеристиками для их применения в промышленном катализе, методов анализа структуры и свойств поверхности в объеме высокопористых композиционных материалов. Актуально и востребовано применение ВПЯМ в технологиях очистки газовых выбросов промышленности и транспорта. Наиболее востребованы современной промышленностью каталитические блоки, обеспечивающие при минимальных размерах высокую степень конверсии, термостабильность и длительный ресурс работы.

Наибольшее распространение получили каталитические контактные элементы нанесенного типа. Материал носителя предотвращает агломерацию и спекание активного компонента, что обеспечивает высокую площадь контакта активного компонента.

Керамические высокопористые ячеистые катализаторы и сорбенты на основе высокопористых проницаемых ячеистых материалов (ВПЯМ) с нанесенными активными композициями различной химической природы успешно применяются во многих гетерогенных процессах как в газообразной, так и в жидкой фазах.

В газовой фазе – это очистка отходящих газов от вредных, в том числе радиоактивных примесей [1]. В ряде каталитических жидкофазных процессов органического синтеза хорошо зарекомендовал себя блочный высокопористый ячеистый катализатор с активным компонентом – палладием [2].

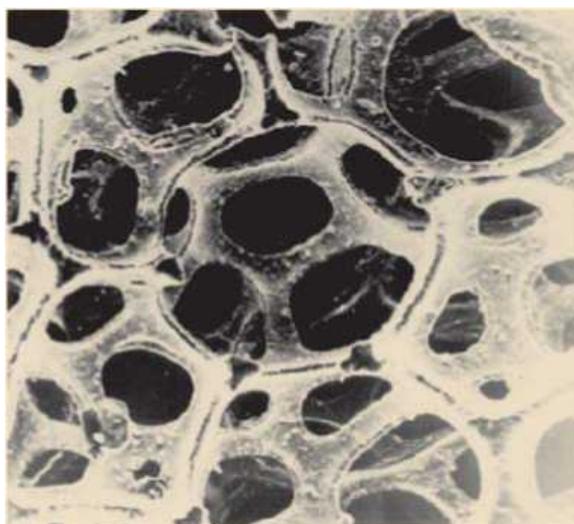
Использование носителей катализаторов ячеистой структуры создает турбулентный режим течения реагентов, в результате чего улучшаются условия тепло- и массопереноса, большую внешнюю площадь поверхности, приводящую к высоким внешним скоростям массо- и теплопереноса, и увеличенный конвективный теплоперенос [3]. Эти преимущества ячеистых катализаторов важны для экзотермических и эндотермических процессов, идущих с большим перепадом давления и с внешнедиффузионным сопротивлением. Высокий коэффициент внешней диффузии позволяет фактически, не снижая каталитическую активность катализатора, уменьшить его объем, открывая тем самым путь к созданию малообъемных каталитических систем [4].

Учитывая эти преимущества, были приготовлены керамические ВПЯМ корундового состава как носители каталитической системы.

Отметим, что процесс приготовления малообъемных блочных ячеистых каталитических контактных элементов для газо- и жидкофазных процессов, в отличие от традиционных нанесенных катализаторов, получаемых в две стадии, состоит из трех стадий [5-8]:

**Первая стадия** – получение керамического каркаса – высокопроницаемого ячеистого материала (ВПЯМ) методом дублирования сетчато-ячеистой полимерной матрицы, (структурообразующую матрицу из ретикулированного пенополиуретана – ППУ). Для получения прочных малоусадочных ВПЯМ с основным связующим глиноземом марки ГН-1 необходима высокая температура спекания порядка 1700°C. Для снижения температуры процесса в состав шихты вводят диоксид титана, гидроксокарбонат магния и карбид кремния. В процессе термолиза образуется твердый расплав алюмомагнезиальной шпинели и

клиноренитата ( $t = 450 - 620 \text{ }^\circ\text{C}$ ), которая, кристаллизуясь при температуре  $1450^\circ\text{C}$ , способствует образованию прочного корундового каркаса (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Макроструктура ВПЯМ (пятикратное увеличение)**

На этом этапе происходит формирование первичных структурных характеристик (порозность, свободный объем, диаметр ячейки, их распределение по размеру, объемная усадка), определяющих такие важные эксплуатационные свойства, как механическая прочность, гидравлическое сопротивление, коррозионная стойкость

**Вторая стадия** – получение высокопроницаемого пористого ячеистого носителя (ВПЯН). Для улучшения адгезии и подготовки поверхности ВПЯМ к импрегнированию активного компонента наносят вторичный носитель – пористый слой  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  из алюмозоля в количестве 5–8 % по массе. Текстульные характеристики ВПЯМ и ВПЯН рассчитывают на основании изотерм адсорбции и десорбции азота при температуре 77 К, полученных на волнометрической установке Nova 1200e Quanta-chrome (США). Удельную поверхность ( $S_{уд}$ ) образцов определяют методом БЭТ, а средний диаметр мезопор ( $D_n$ ) – методом Баррета–Джойнера–Халенды по десорбционной ветви изотермы. Общий сорбционный объем пор ( $V$ ) рассчитывают по изотерме адсорбции азота при относительном давлении, равном 0,995. Перед измерением изотерм адсорбции азота проводят дегазацию образцов при  $300^\circ\text{C}$  и остаточном давлении  $10^{-3}$  мм рт. ст. в течение четырех часов (таблица 1).

**Таблица 1 – Характеристики носителя катализаторов на основе ВПЯМ**

Образец	$S, \text{ м}^2/\text{г}$	$V, \text{ см}^3/\text{г}$	$D, \text{ нм}$
ВПЯМ	0,12	0	8,8
ВПЯМ+(ВПЯН)	15,3	0,023	5,9

Из таблицы видно, что адсорбция азота на образце ВПЯМ практически отсутствует, т.е. образец является непористым. Нанесение пористого слоя в виде  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  позволяет увеличить удельную поверхность ВПЯН в 100 раз. При этом, принимая в расчет содержание пористого слоя в образце, его удельная поверхность равна  $200 \text{ м}^2/\text{г}$ , средний размер – 5,9 нм.

**Третья стадия** — получение высокопористого ячеистого катализатора. Суть процесса заключается в нанесении на подготовленную внешнюю поверхность ВПЯН каталитически активной композиции: оксидов  $d$ - и  $f$ -элементов и т.д. Согласно адсорбционным измерениям текстурных характеристик катализаторов в результате импрегнирования оксидов переходных металлов пористая структура носителя практически полностью сохраняется.

Для процесса очистки токсичных промышленных выбросов возможно использование ВПЯН, обладающего низким гидравлическим сопротивлением, высокой прочностью и износостойкостью, высокой термостойкостью, высокими коэффициентами внешней диффузии и внутренней диффузии за счёт самоорганизации турбулентных потоков внутри ячеек.

Для исследования возможности применения ВПЯК для процесса детоксикации смеси оксидов азота и углерода по реакции  $2\text{NO} + 2\text{CO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_2$  использовали образцы ВПЯН цилиндрической формы: высота – 25 мм, диаметр – 25 мм, размер ячейки – 2 мм. Для импрегнирования использовали 0,5-молярные растворы нитратов *d*- и *f*-элементов – меди, марганца, кобальта, железа и церия, проявляющих наиболее высокую активность в области окислительного катализа. Носитель выдерживали в пропиточном растворе, содержащем в зависимости от условий опыта один или несколько компонентов, смешанных в заданном соотношении, при температуре 60 °С в течение одного часа. Далее образец сушили при температуре 100 °С в течение 12 ч и прокаливали при 550 °С в течение двух часов. Таким образом, на поверхности ВПЯН происходило образование каталитически активного слоя. Также были приготовлены катализаторы, содержащие слой вторичного носителя – диоксида церия. Нанесение диоксида церия проводили согласно вышеприведенной методике.

Элементный состав полученных катализаторов определяли методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS) на базе сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM 6510 LV (JEOL, Япония) с системой рентгеновского микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments, Великобритания). Вторичное рентгеновское излучение фиксировали в интервале 0–20 эВ. Каталитическую активность полученных образцов определяли проточным методом. Модельная газовая смесь имела следующий состав, % об.: 0,190 оксид углерода(II); 0,206 оксид азота(II); азот остальное. Измерение концентраций оксида углерода (II) и оксида азота (II) проводили с помощью газоанализатора КАСКАД-Н (Россия). Испытания проводили при объемной скорости газовой смеси 13500 ч<sup>-1</sup> в интервале температур 100–700 °С.

Степень конверсии компонентов рассчитывали по формулам:

$$\alpha_{\text{CO}} = \{([\text{CO}]_{\text{исх.}} - [\text{CO}]_{\text{тек}})/[\text{CO}]_{\text{исх.}}\}100\%,$$

$$\alpha_{\text{NO}} = \{([\text{NO}]_{\text{исх.}} - [\text{NO}]_{\text{тек}})/[\text{NO}]_{\text{исх.}}\}100\%,$$

где:  $[\text{CO}]_{\text{исх.}}$  – начальная концентрация CO в исходной смеси, об.%;  $[\text{CO}]_{\text{тек}}$  – текущая концентрация CO, об.%;  $[\text{NO}]_{\text{исх.}}$  – начальная концентрация оксидов азота в исходной смеси, об.%;  $[\text{NO}]_{\text{тек}}$  – текущая концентрация оксида азота, об.%.

Выбор многокомпонентного состава для катализаторов обусловлен явлением синергизма, характерным для оксидов *d*- и *f*-элементов, что связано с процессами кислородной активации и переноса кислорода на поверхности катализатора через циклы окисления-восстановления  $\text{M}^{n+}/\text{Mn}^{(n-1)+}$  и  $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ , где *n* – степень окисления металла. Каталитические свойства в значительной степени зависят от химического состава катализатора (таблица 2).

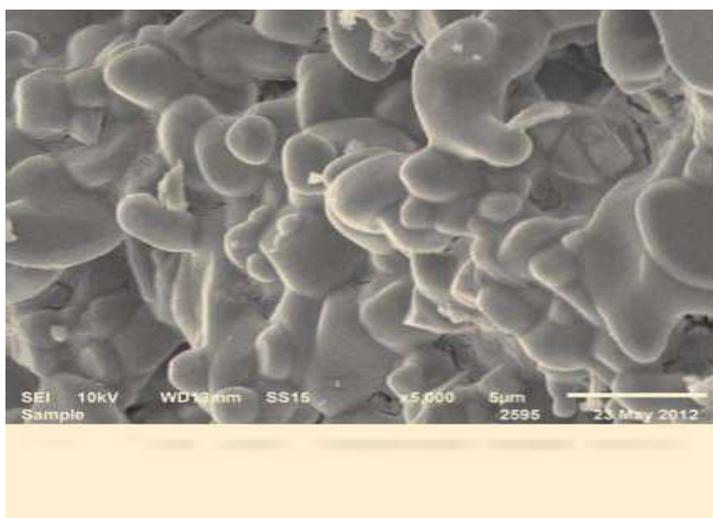
**Таблица 2 – Свойства синтезированных образцов катализаторов**

Состав катализатора, %	Т <sub>конв</sub> *, °С		X <sup>TM</sup> **, об. %	
	CO	NO	CO	NO
CeO <sub>2</sub> – 53, Co <sub>3</sub> C> 4 –47	320	390	93	93
CeO <sub>2</sub> – 19, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 81	356	388	99	97
CeO <sub>2</sub> – 52, MnO <sub>2</sub> – 48	187	350	100	96
CeO <sub>2</sub> – 45, MnO <sub>2</sub> – 46, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 9	422	580	95	53
CeO <sub>2</sub> – 78, CuO – 22	187	325	100	99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 53, Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> – 47	368	550	99	58

\*T<sub>конв</sub> – температура 50 %-ной конверсии; \*\*X<sup>TM</sup> – степень конверсии.

На основании результатов исследования каталитической активности подтверждена целесообразность использования многокомпонентных церийсодержащих каталитических систем на основе флюоритовой кубической решетки.

Проведенные электронно-микроскопические исследования поверхности катализаторов показали, что в процессе импрегнирования образуется достаточно равномерное покрытие. Частицы  $\text{CeO}_2\text{-MnO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  имеют сферическую форму, характерную для соединений, полученных термолизом нитратов соответствующих солей (рисунок 2). Средний размер частиц составляет около 2 мкм. Схожая морфология наблюдается для остальных катализаторов.



**Рисунок 2 – Макроструктура высокопористого ячеистого катализатора с подложкой из  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$**

Исследования каталитических свойств показали, что полученные катализаторы проявляют достаточно высокую активность. Следует отметить, что детоксикация CO протекает при более низких температурах, чем обезвреживание NO. Это обусловлено частичным восстановлением оксидных фаз катализаторов монооксидом углерода. Также это может быть связано с тем, что молекулы NO при температурах менее 300°C образуют прочные комплексы, которые разлагаются при более высоких температурах.

Поиск катализаторов для окисления органических веществ в водных растворах до безопасных диоксида углерода и воды является актуальной задачей. По сравнению с озонированием окисление пероксидом водорода – более дешевый процесс. Окисление органических веществ пероксидом водорода проводят с использованием катализаторов типа Фентона. Процесс Фентона основан на каталитическом эффекте разложения пероксида водорода в присутствии ионов переходных металлов с образованием радикалов, способных окислять органические вещества. По своей окислительной силе эти радикалы значительно превосходят озон и уступают только фторид-радикалу. В наиболее часто применяемом гетерогенном процессе Фентона катализаторами служат оксиды переходных и редкоземельных металлов ( $\text{CuO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CeO}_2$  и др.), как в виде порошков, так и нанесенные на цеолиты, активированный уголь, оксид кремния, оксид алюминия, гранулированную глину. ВПЯМ является одним из перспективных носителей для гетерогенного процесса Фентона.

В представленной работе исследованы катализаторы на основе ВПЯМ, содержащие в качестве активного компонента оксиды железа и кобальта в количестве 1 % по массе в процессе Фентона. Каталитическую активность образцов изучали в реакции окисления пероксидом водорода в водных растворах азорубина (синтетического красителя из группы азокрасителей) при pH, равном 6, и муравьиной кислоты при pH, равном 3,8. Об активности катализаторов в реакции окислительной деструкции красителя судили по разрушению

азогруппы и снижению цветности раствора, содержание красителя в растворе определяли с помощью спектрофотометра ЮНИКО 1201 (США). При окислении муравьиной кислоты уменьшение ее концентрации определяли по изменению электропроводности с помощью кондуктометра Эконикс-эксперт 2. Реакции проводили при стехиометрическом содержании пероксида водорода. Концентрация ионов кобальта в растворе после окислительной деструкции азорубина составила 1,3 мг/л при рН 6. При понижении рН до 3,8 в процессе окисления муравьиной кислоты содержание ионов кобальта в растворе возросло в несколько раз (до 6,28 мг/л), что превышает нормы ПДК Железосодержащий катализатор стабилен и в кислой и в нейтральной среде. Например, в течение 6 последовательных циклов работы катализатора степень превращения азорубина не уменьшалась ниже 95 %. Следует заметить, что содержание железа в растворе после катализа во всех случаях не превышала 10 мкг/л, что значительно ниже ПДК. Анализ содержания ионов кобальта и железа в растворе после каталитического окисления проводили атомно-абсорбционным методом с использованием спектрометров Квант АФА производства Кортэк (Россия). В таблице 3 представлены результаты каталитических испытаний и устойчивости катализаторов.

**Таблица 3 – Каталитическая активность и стабильность катализаторов на основе ВПЯМ**

Образец	$X_1, \%$	$C_{Co}, \text{мг/л}$	$X_2, \%$	$C_{Fe}, \text{мг/л}$
Со-ВПЯК	99,4	1,3	62,5	6,28
Fe-ВПЯК	97,0	< 0,01	87,22	< 0,01

**Примечание.**  $X_1$  и  $X_2$  – степень окисления азорубина и муравьиной кислоты через два часа контакта реагентов, соответственно.

### Выводы

Синтезированные катализаторы на основе ВПЯМ проявили высокую активность в процессе каталитической деструкции органических веществ. Однако Со/ВПЯМ не может применяться для очистки сточных вод от органических субстратов, поскольку оказался неустойчивым к вымыванию активного компонента в раствор, и при понижении рН содержание ионов кобальта в растворе превышает нормы ПДК. Катализатор Fe/ВПЯМ можно рекомендовать для очистки сточных вод от органических веществ путем их окислительной деструкции с помощью пероксида водорода

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаспарян М.Д. Керамические высокопористые блочно-ячеистые фильтры-сорбенты // Промышленная химия и катализ. Сборник научных трудов.– М: РХТУ им. Д.И. Менделеева,– 2012. Выпуск 185 – С. 166-172.
2. Жилин В.Ф., Збарский В.Л., Козлов А.И. Восстановление ароматических нитросоединений.// Учебное пособие. М.:РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. 92 с.
3. Леонов А.И., Сморгыо О. Л., Ромашко А.Н., Дечко М.М., Кетов А.А., Новиков Л.А., Танкович В.С. Сравнительная оценка свойств блочных носителей сотового и ячеистого строения с точки зрения использования в процессах каталитической очистки газов // Кинетика и катализ. – 1998. Т.39, № 5. – С.691-700.
4. Грунский В.Н. Малообъёмные каталитические системы ячеистой структуры с развитой регулируемой внешней поверхностью. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д. т. н. М.: РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2009. – 32 с.
5. Анциферов В.Н., Макаров А.М., Остроушко А.А. Проблемы порошкового материаловедения. Ч. VII. Высокопористые проницаемые ячеистые материалы перспективные носители катализаторов. Екатеринбург: Уро РАН, 2006. – 228 с.

6. Патент РФ № 2233700. Состав шихты для высокопористого материала с сетчатой структурой для носителей катализаторов. / А. И. Козлов, Е.С. Лукин. Оpubл. в БИ 10.08.2004. Бюл. № 22.

7. Анциферов В.Н., Порозова С.Е. Высокопористые проницаемые материалы на основе алюмосиликатов.– Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 1996. – 207 с.

8. Грунский В.Н., Козлов И.А., Беспалов А.В., Гаспарян М.Д., Лукин Е.С., Стародубцева О.В. Термообработка блочных высокопористых ячеистых керамических материалов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2011. № 6. – С.18-21.

УДК 677.017.623:533.15

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ УСЛОВИЙ  
НА ПАРПРОНИЦАЕМОСТЬ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
RESEARCH OF INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HUMIDITY CONDITIONS ON  
WATER VAPOR PERMEABILITY OF TEXTILE MATERIALS**

**Леонид Иванович Жмакин, Николай Михайлович Шарпар, Заур Нурбиевич Османов,  
Александр Николаевич Сорокин  
Leonid I. Zhmakin, Nikolai M. Sharpar, Zaur N. Osmanov, Alexander N. Sorokin**

*Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва  
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow  
(e-mail: sharpar753@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассматривается методика исследования температурно-влажностных условий паропроницаемости текстильных материалов, построены зависимости опытных результатов от относительной влажности воздуха, выполнено сопоставление полученных значений коэффициентов диффузии при сорбции и паропроницаемости и проведен анализ физических закономерностей влагопереноса в исследуемом теле.

*Abstract:* The method of research of temperature and humidity conditions of vapor permeability of textile materials is considered, dependences of the results determined in the course of work on relative humidity of air are constructed, comparison of the received values of diffusion coefficients at sorption and vapor permeability is carried out and the analysis of physical laws of moisture transfer in the investigated body is carried out.

*Ключевые слова:* диффузия, текстильный материал, паропроницаемость, сорбция, методика, влагоперенос.

*Keywords:* diffusion, textile material, vapor permeability, sorption, technique, moisture transfer.

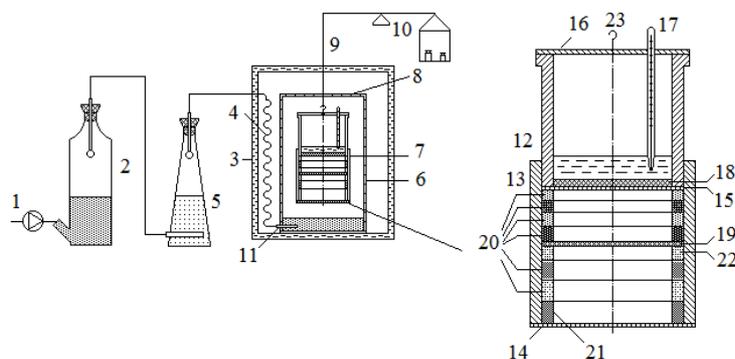
Знание коэффициента диффузии влаги (КДВ) в виде водяного пара требуется при расчетах некоторых технологических процессов в отделочном производстве, а также при оценке гигроскопических характеристик текстильных материалов, здесь диффузию рассматривают, как паропроницаемость [1-4].

В [5] принята гипотеза о независимости коэффициента диффузии паров через ткань от ее влагосодержания. Мы рассмотрели эту гипотезу, проверили ее экспериментально и полагаем, что приведенные в [5] значения диффузионного сопротивления текстильного материала следует принять как ориентировочные. В работе [5] было обнаружено возникновение свободной конвекции под исследуемым материалом при значительно большой толщине воздушного слоя. Ее наличие объясняется тем, что в опыте практически невесомые, насыщенные водяными парами, слои воздуха находились в нижней зоне (подобная ситуация появляется в результате чистого теплообмена, когда горячий слой находится под холодным

[6]). Вследствие чего мы можем предположить, что влияние конвекции в воздушной прослойке под исследуемым материалом не позволяет достаточно точно учесть его сопротивление. При разработке устройства для исследования температурно-влажностных условий паропроницаемости текстильных материалов нами были приняты меры по исключению конвективного режима во время проведения эксперимента.

Схема этого устройства представлена на рисунке 1, где показан общий вид и вид рабочей зоны. Рабочая зона представляет из себя ячейку 7, которая размещается в кожухе 6 суховоздушного термостата 3, снабженного водяной рубашкой и обеспечивающего поддержание требуемой внутри него температуры с точностью  $\sim 0,5$  °С. В нижнюю зону кожуха по патрубку 11 подается воздух, прошедший предварительное осушение. Осушение осуществляется следующим образом: из помещения воздух при помощи микрокомпрессора 1 поступает в первую ступень осушителя 2, в которой содержится силикагель с индикацией поглощенной влаги (хлористый кобальт  $\text{CoCl}_2$ ). Затем выполняется второй этап: воздух проходит через колбу 5, заполненную окислом алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . В ней осуществляется дальнейшее осушение, что приводит к содержанию влаги в воздухе менее 0,001 мг/л [7]. Дно кожуха 6, находящегося в термостате, покрыто слоем силикагеля.

Воздух, подаваемый в термостат, предварительно проходит подогрев в теплообменнике 4 до требуемой температуры. В верх ней части кожуха 6 находится крышка 8, в которой

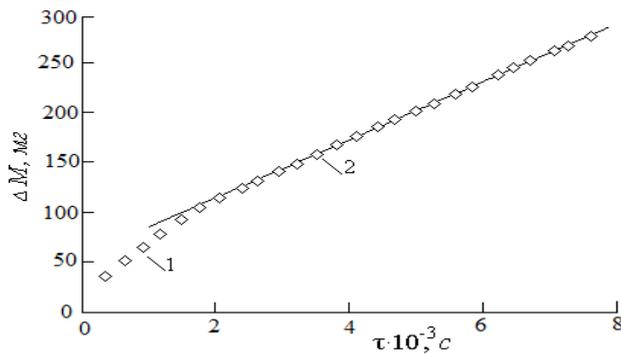


**Рисунок 1 – Схема устройства для исследования температурно-влажностных условий паропроницаемости**

имеется отверстие для прохода струны 9, соединяющей рабочую зону с весами 10. Также на рисунке 1 изображен укрупненный вид рабочей зоны с детальным изображением рабочей ячейки. Ячейка содержит цилиндр 12 и обечайку 13, изготовленные из полимерного материала непроницаемого для воды. Верх цилиндра закрыт крышкой 16 с крюком 23, предназначенным для подвески ячейки к измерительным весам. Нижняя часть цилиндра содержит

пластину 18, выполненную из пористой керамики, на ее нижней поверхности закреплена пленка 15 из гидратцеллюлозы. Через отверстие, находящееся в верхней крышке, внутренняя полость цилиндра заполняется водой. В ней устанавливается термометр 17 для замеров температуры воды. Уровень воды, находящийся над пленкой на высоте  $\sim 5$  мм способствует полному насыщению гидратцеллюлозной пленки без образования на ней капель, что приводит к поддержанию относительная влажности воздуха, равной  $\varphi = 1$ .

Участок, расположенный между пленкой 15 и тканевой сеткой 14, находящейся в нижней части обечайки 13, создают рабочую зону, ее высота контролируется при помощи набора колец 20, плотно размещенных в обечайке 13 и имеющих внутренний диаметр такой же, как и цилиндр 12. Тканевая сетка 14 жестко крепится на кольце 21 в нижней части обечайки 13. Исследуемый образец текстильного материала 19 приклеен к кольцу 22, которое может располагаться на различной высоте обечайки 13. Это позволяет выполнить исследования диффузии через образец в зонах с различными значениями относительной влажности воздуха  $\varphi$ . Благодаря подобной конструкции ячейки водяные пары могут диффундировать сверху вниз, что позволяет свести к минимуму возникновение в рабочей зоне конвективных токов, обусловленных свободной конвекцией. При повышенных температурах появляется возможность появления стефановского конвективного потока [8], однако его величина поддается достаточно простой оценке и учету.



**Рисунок 2 – Зависимость изменения массы ячейки во времени**

Во время эксперимента регистрировалась температура в рабочей зоне и зависимость изменения массы ячейки 7 во времени, которая обусловлена испарением влаги. Эти данные показаны на рисунке 2. Особо отметить на кривой можно два характерных участка: 1- нелинейный, типичный при нестационарном режиме; 2 - линейный, описывающий стационарный режим диффузии. В работе определяли коэффициент диффузии (КД) в стационарном режиме. По наклону прямолинейного участка находилась величина плотности потока массы  $J$  диффундирующего пара

$$j = \frac{\Delta M}{\Delta \tau}$$

где  $\Delta M$  - изменение массы ячейки с течением времени  $\Delta \tau$ ,  $f$ - площадь поперечного сечения ее рабочей зоны.

С учетом того, что влажный воздух можно рассматривать как двухкомпонентную смесь, то величину плотности диффузионного и степенного потока пара можно представить как [8]

$$j = \mu \xi D \frac{\Delta \chi}{x} \frac{1}{1 - \chi_s} \quad (1)$$

здесь  $\mu$ ,  $\chi_s$ ,  $D$  - соответственно молярная масса воды, молярная доля на поверхности гидратцеллюлозной пленки и коэффициент диффузии пара в среде;  $\xi = z/V$  - молярная концентрация смеси влажного воздуха;  $\chi = z_v/z$  - молярная доля пара в смеси. Сомножитель  $(1 - \chi_s)^{-1}$  в формуле (1) является поправкой на степенский поток,  $z_v$ ,  $z$  - числа молей пара и смеси в окружающей их влажной среде;  $V$  - объем смеси содержащийся в среде. Для двухкомпонентной смеси значения  $\xi$  и  $\chi$  можно представить в следующем виде

$$\xi = \frac{p}{R_m T} \quad \chi = \frac{p_v}{p} \quad (2)$$

где  $p_v$ ,  $p$ - парциальное давление пара в смеси и давление самой смеси;  $T$  - абсолютная температура в ячейке;  $R_m$ - универсальная газовая постоянная. На поверхности гидратцеллюлозной пленки парциальное давление пара находится по температуре в ячейке как давление насыщенного пара, а под сеткой из ткани оно принято нулевым. Формулу (1) также можно записать в виде

$$j = \mu \xi \frac{\Delta \chi}{R} \frac{1}{1 - \chi_s} \quad R = \frac{x}{D} \quad (3)$$

здесь  $R$  - величина диффузионного сопротивления.

Нетрудно показать, что с учетом диффузионных сопротивлений тканевой сетки (ТС) и слоя воздуха плотность диффузионного потока будет определяться формулой

$$j = \mu \xi \frac{\Delta \chi}{R_\Sigma} \frac{1}{1 - \chi_s} \quad R_\Sigma = \frac{x}{D} + R_n \quad (4)$$

где  $R_n$  - диффузионное сопротивление ТС;  $R_\Sigma$  - суммарное диффузионное сопротивление, состоящее из сопротивления ТС и сопротивления слоя воздушной среды.

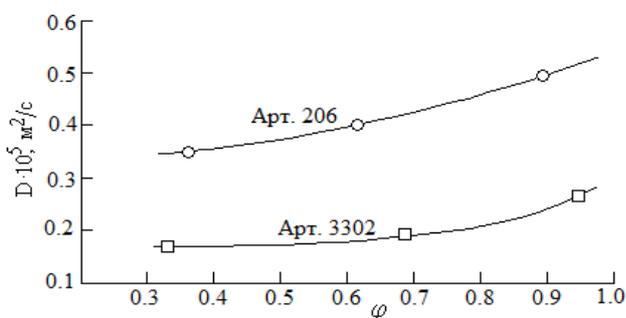
В градуировочных исследованиях (без ткани) строился график зависимости  $R_\Sigma = f(x)$ , который обладал линейным характером, что является свидетельством адекватности нашей

модели. Согласно выполненному эксперименту, при определении коэффициента диффузии пара в воздухе отклонения от данных [9] составляло  $\sim 6\%$ , что обосновывает принятый подход.

При выполнении исследования КДВ через материал он размещался на определенной фиксированной высоте от испаряющей пленки до ТС. По найденной в опытах плотности потока массы на основании уравнения (4) величину суммарного диффузионного сопротивления для данного случая можно вычислить по формуле

$$R_{\Sigma} = \frac{x'}{D} + R_n + R_f \quad x' = x - \delta \quad (5)$$

где  $x'$ ,  $R_f$  – высота пленки до ТС без учета толщины исследуемого материала  $\delta$  и ее диффузионное сопротивление. Затем, используя уравнение (5), определяли величину  $R_f$ , используя ранее найденные значений диффузионного сопротивления ТС и КД водяных паров в окружающей среде. КДВ через материал определяли согласно формуле диффузионного сопротивления как  $D_v = \delta/R_f$ .



**Рисунки 3 – Зависимость КДВ в материалах от относительной влажности воздуха**

Графики зависимости КДВ через материал приведены на рисунке 3 для двух артикулов: арт. 3302 (полушерстяная ткань) и арт. 206 (бязь). Нелинейные зависимости отображают небольшое изменение КД в зоне средних значений относительной влажности, сменяя ее более заметным его повышением при приближении  $\varphi \rightarrow 1$ . Согласно законам физики влага переносится через материал не только, как пар в порах, но и в форме конденсата. Также она сорбируется со стороны более высоких значений относительной влажности воздуха на

поверхности исследуемого материала, а затем диффундирует и десорбируется на противоположной стороне. Найденная зависимость КДВ через материал от  $\varphi$ , а, значит, и от влагосодержания позволяет рассмотреть приведенные в работе [5] результаты как ориентировочные, о чем ранее уже упоминалось.

Найденные в работе значения КДВ через материал требуется сравнить со значениями КДВ полученными при сорбции [7], здесь описание процесса сорбции выполнялось по закону диффузии Фика в следующей форме

$$j = -\rho_d D_w \frac{\partial W}{\partial x} \quad (10)$$

где  $\rho_d$ ,  $W$  – плотность сухого материала и его влагосодержание;  $D_w$  – отнесенный к градиенту влагосодержания КД. Для выполнения сравнения рассмотренный закон требуется привести к виду, базирующемуся на градиенте молярной доли пара:

$$j = -\mu \xi D_s \frac{\partial \chi}{\partial x} \quad (11)$$

где  $D_s$  – КД, отнесенный к градиенту молярной доли пара. При сопоставлении уравнений (10) и (11) возникает связь КД при сорбции, выраженных через градиенты молярной доли пара и влагосодержания

$$D_s = D_w \left( \frac{\partial W}{\partial \chi} \right)_T \frac{\rho_d}{\mu \xi} \quad (12)$$

Вычисление производной по формуле (12) производилось при постоянной температуре согласно уравнению изотермы сорбции, приведенному в [7]. Сопоставление значений КД при

сорбции  $D_s$  и паропроницаемости  $D_v$  показало, что второй из них в несколько раз (до десяти) больше. Для материалов со значительной сквозной пористостью при умеренных значениях  $\varphi$  воздуха основной вклад в процесс диффузии дает перенос пара сквозь поры, перенос влаги в волокнах оказывает относительно небольшое воздействие. Но во время процесса сорбции пар быстро диффундирует в порах, а лимитирующей стадией служит диффузия пара в волокнах образца, которая протекает значительно медленнее.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриева И. А. Паропроницаемость и гигроскопические свойства тканей из капрона и других волокон: дис.канд. техн. наук.: М., 1962. – С. 183.
2. Кокошиская В.И., Яковлева Л.А. // Технология текстильной промышленности, 1970, № 2 – С. 25-28.
3. Мигляченко А.Ф., Орлов В. И., Онищенко В.Ф. // Технология легкой промышленности, 1974, № 2, С.78-81.
4. Мигляченко А.Ф., Орлов И.В., Онищенко В.Ф. // Технология легкой промышленности, 1974, №6, С.27-31.
5. Whelan, M.E., MacHattie, L.E., Goodings, A.C., Turl, L.H. «The diffusion of water vapor through laminae with particular reference to textile fabrics», Textile Research Journal. 1955, v.25, № 3, P. 197-223.
6. Теория тепломассообмена: Под ред. Леонтьева А.И. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 343 с.
7. Корнюхин И.П., Жмакин Л.И. Тепломассообмен в пористых телах. М.: Информэлектро, 2000. 235 с.
8. Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. М.: Химия, 1974. 688 с.
9. Таблицы физических величин: Справочник. Под ред. Кикоина И.К. М.: Атомиздат, 1976. 1009 с.

УДК 664.844, 664.8.047

#### ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПЛОДОВ ТОМАТА STUDY OF RADIATION-CONVECTIVE DRYING OF TOMATO FRUITS

Эдуард Павлович Дяченко\*, Григорьев Павел Иванович\*\*,

Александр Михайлович Меньших \*

Eduard P. Dyachenko \*, Pavel I. Grigoryev\*\*, Aleksandr M. Men'shikh\*

\* *Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства –  
Филиал Федерального научного центра овощеводства,  
Россия, д. Верея, Московская область*

\* *All-Russian Research Institute of Vegetable Growing - branch of the  
Federal Scientific Center of Vegetable Growing, Russia, Moscow Region,  
Ramensky District, Vereya Village  
(e-mail: amed-nauka@yandex.ru)*

\*\* *Астраханский государственный технический университет, Россия, Астрахань*

\*\* *Astrakhan State Technical University, Russia, Astrakhan  
(e-mail: amed-nauka@yandex.ru)*

*Аннотация:* Исследована интенсивность радиационной и конвективно-радиационной сушки долек плодов томата. Получены аппроксимирующие зависимости съема сухого томата с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени от влияющих на процесс сушки основных факторов. Определены рациональные режимы процесса конвективно-радиационной сушки плодов томата.

*Abstract:* The intensity of radiation and convective-radiation drying of tomato fruit slices was studied. The approximating dependences of the removal of dry tomato per unit area of the working surface per unit of time on the main factors affecting the drying process are obtained. The rational regimes of the process of convective-radiation drying of tomato fruits are determined.

*Ключевые слова:* томат, дольки, радиационный энергоподвод, конвективный энергоподвод, конвективно-радиационная сушка.

*Keywords:* tomato, slices, radiation energy supply, convective energy supply, convective-radiation drying.

Томат является одной из наиболее распространенных на отечественном рынке овощных культур. Стабильное снабжение потребителей плодами томата в течение всего года сдерживаются сезонностью, высокой интенсивностью порчи, необходимостью соблюдения специальных условий хранения. Применение сушки в качестве метода консервации позволяет получить высококачественный продукт, широко востребованный в различных технологиях пищевых производств, обладающий высокой биологической ценностью и функциональными свойствами [1-6]. Радиационная сушка обладает рядом преимуществ, в сравнении с традиционными методами обезвоживания ягод (конвективной и естественной сушкой), однако её внедрение в технологию производства сушеного томата сдерживается отсутствием рациональных режимов процесса, отсутствием универсальных и простых аппаратов, пригодных для переработки растительного сырья с широким диапазоном структурно-механических и физико-химических свойств, а также высокой энергоемкостью и сложностью существующего оборудования.

Целью настоящего исследования являлось изучение влияния конвективного энергоподвода на интенсивность конвективно-радиационной сушки томатных долек (дисков, слайсов) для последующего совершенствования, определение рациональных режимов процесса, а также разработки рекомендаций по его аппаратурному оформлению. В качестве исследуемых объектов использовались пригодные для равномерного нарезания и обеспечения равномерной сушки плоды томата сортов «Рио-Гранде», «Торпеда», «Каспар F1» цилиндрической или овальной (сливовидной) формы, характеризующиеся плотной мякотью, мясистой, малым количеством семян и жидкости в семенных камерах, плотной кожицей, стойкой к растрескиванию.

Исследования проводились по полному многофакторному многоуровневому плану с использованием вероятностно-статистических методов планирования и обработки экспериментальных данных. В качестве целевой функции, характеризующей эффективность (интенсивность) процесса, выбран съем сухого продукта с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени  $G$ , кг/(м<sup>2</sup>·ч):

$$G = M_{cn} / (F \cdot \tau), \quad (1)$$

где  $M_{cn}$  – масса высушенного продукта до конечной влажности не более  $w_k = 0,6$  кг/кг, выбор которой осуществлен на основе результатов анализа гигроскопических характеристик продукта [2];  $F$  – площадь рабочей поверхности, занимаемой продуктом, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – экспериментальное время сушки, ч.

Для уточнения влияния отдельных основных параметров (факторов) на интенсивность процесса обезвоживания все второстепенные параметры фиксировались. Перечень основных факторов и диапазоны их варьирования представлены в таблице 1, установлены на основе анализа научно-технической и патентной литературы [1-6], а также поисковых экспериментальных исследований, к указанным факторам относятся: начальная влажность продукта  $w_n$ , кг/кг; начальная толщина дольки (диска, слайса)  $h_n$ , м; плотность падающего с одной стороны дольки теплового потока  $E$ , кВт/м<sup>2</sup> (при симметричном двухстороннем облучении дольки  $E_n = 2 E$ ); температура  $T_s$ , К и скорость сушильного агента  $v$ , м/с при конвективном энергоподводе.

**Таблица 1 – Уровни варьирования факторов при радиационной и радиационно-конвективной сушке долек плодов томата**

Уровни	Факторы				
	$h_n$ , мм	$E_n$ , кВт/м <sup>2</sup>	$\nu$ , м/с	$T_e$ , К	$w_n$ , кг/кг
1	1	1,84	3,2-3,4	330-333	0,92-0,94
2	2	2,70	-	-	-
3	3	2,90	-	-	-
4	4	-	-	-	-

Исследования проводились с использованием лабораторного оборудования ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» и ВНИИО – Филиал ФНЦО. Для приготовления экспериментального образца продукта свежий плод томата предварительно мыли, нарезают на дольки (диски) равномерной толщины  $h_n$ , м, и далее наносят на рабочую поверхность (плоский игольчатый носитель) лабораторной установки.

Дольки томатов обезвоживались при радиационном и конвективно-радиационном энергоподводе до конечной влажности  $w_k = 0,06$  кг/кг и выводились из сушильной камеры. При конвективно-радиационном энергоподводе для измерения убыли массы подачу сушильного агента периодически прекращали до полного уравнивания аналитических весов. Расшифровка данных регистрации убыли массы весов позволила получить значения текущей влажности продукта  $w$ , кг/кг в процессе обезвоживания от времени  $\tau$ , с. Оценку качественных характеристик полученного продукта проводили в соответствии с ОСТ 10 326-2003 [7].

В результате экспериментальных исследований по формуле (1) получены значения съема сухого продукта с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени ( $G$ ) для выбранных вариантов реализации процесса, при различных значениях начальной толщины дольки ( $h_n$ ) и плотности теплового потока ( $E_n$ ). Относительная ошибка при определении  $G$  не превышала 12 %. Компьютерная обработка экспериментальных данных позволила получить адекватные аппроксимирующие зависимости целевой функции от варьируемых факторов, при этом погрешность аппроксимации  $R^2$  зависимостей  $G = f(w_n, h_n)$  составила не менее 0,995:

- радиационная сушка

$$G(E_p, h_n) = \left[ \begin{aligned} &(-0,012 \cdot E_p^2 + 0,057 \cdot E_p - 0,061) \cdot h_n^3 + (0,083 \cdot E_p^2 - 0,403 \cdot E_p + 0,428) \cdot h_n^2 + \\ &+ (-0,146 \cdot E_p^2 + 0,738 \cdot E_p - 0,749) \cdot h_n + (0,164 \cdot E_p^2 - 0,642 \cdot E_p + 0,673) \end{aligned} \right];$$

- конвективно-радиационная сушка

$$G(E_p, h_n) = \left[ \begin{aligned} &(-0,0047 \cdot E_p^2 + 0,0039 \cdot E_p - 0,057) \cdot h_n^3 + (0,00073 \cdot E_p^2 - 0,143 \cdot E_p + 0,256) \cdot h_n^2 + \\ &+ (0,079 \cdot E_p^2 - 0,00224 \cdot E_p - 0,1154) \cdot h_n + (0,03344 \cdot E_p^2 - 0,3007 \cdot E_p + 0,587) \end{aligned} \right].$$

По результатам исследований для плодов томата с влажностью  $w_n = 0,92-0,94$  кг/кг максимальная интенсивность процесса конвективно-радиационной сушки, соответствующая значению целевой функции  $G_{max} = 0,714$  кг/(м<sup>2</sup>·ч) достигается при следующих рациональных режимах:  $h_n = 4$  мм;  $E_n = 2,98$  кВт/м<sup>2</sup>;  $\lambda = 1,4-1,7$  мкм;  $\nu = 3,2-3,4$  м/с;  $T_e = 330-333$  К. Введение в процесс радиационной сушки долек томата конвективного энергоподвода при рациональных режимах способствует увеличению производительности процесса на 30 % при улучшении качества сухого продукта.

### Выводы

Исследована интенсивность радиационной и конвективно-радиационной сушки долек плодов томата. Получены зависимости съема сухого томата с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени от влияющих на процесс сушки основных факторов. Определены рациональные режимы процесса конвективно-радиационной сушки плодов томата. Согласно данным по кинетике сушки введение в процесс радиационной сушки

конвективного энергоподвода существенно интенсифицирует процесс в течение всего периода обезвоживания продукта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексанян И. Ю., Буйнов А. А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование: Монография. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004. 380 с.

2. Максименко Ю. А. Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.18.12. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2016. 40 с.

3. Дяченко Н. П., Као Тхи Хуе, Дяченко Э. П., Максименко Ю. А. Исследование интенсивности конвективной пеносушки желатинового бульона из отходов переработки рыб частиковых пород // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2019. № 1. С. 136–144. DOI: 10.24143/2073-5529-2019-1-136-144.

4. Чернышев С.В. Исследование эндоизотермической сушки томатов // Вестник ТГТУ. 2008. Том 14. № 3. С 636 - 637.

5. Thin layer drying of tomato slices / Purkayastha M. Das, Mahanta C. L., Nath A., Deka B. C. // Journal of Food Science and Technology (c). 2011. Vol. 50, iss. 4. P. 642–653. doi: 10.1007/s13197-011-0397-x.

6. Дяченко М. М., Боева Н. П., Дяченко Э. П. Технология кормовой муки из мясокостных тканей тюленей // Труды ВНИРО. 2017. Т. 166. С. 159–178.

7. ОСТ 10 326- 2003 «Томаты сушеные. Промышленное сырье. Технические условия». Введен 2003- 08- 01 / В. В. Коринец, Е. И. Иванова, В. А. Санникова, В. А. Мачулкина, В. Ф. Пивоваров, Л. В. Павлов и др. // Сб. Стандарты отрасли па типовые технологические процессы производства семян, овощную и бахчевую продукцию. М.: ГУПМО «Мытищинская типография». 2003. С. 271- 279.

УДК 621.311.182

### К РАСЧЕТУ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ПОДОГРЕВЕ БИОМАССЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ БИОГАЗОВОМ РЕАКТОРЕ TO CALCULATE THE POWER OF HEAT SOURCES WITH ADDITIONAL HEATING OF BIOMASS IN CYLINDRICAL BIOGAS REACTOR

Сергей Владимирович Вендин, Артем Юрьевич Мамонтов  
Sergey V. Vendin, Artem Y. Mamontov

Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я.Горина, Россия, Белгород  
Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, Russia, Belgorod  
(e-mail: elapk@mail.ru, ligaman999@mail.ru)

*Аннотация:* Рассмотрены некоторые особенности расчета мощности дополнительных источников теплоты для подогрева биомассы в биогазовом реакторе. Представлено решение для осесимметричной цилиндрической задачи при граничных условиях первого рода на основе уравнения теплопроводности Фурье. Проведен расчет мощности дополнительных источников теплоты в цилиндрическом биогазовом реакторе.

*Abstract:* Some features of the calculation of the power of additional sources of heat for heating biomass in a biogas reactor are considered. A solution is presented for an axisymmetric cylindrical problem with boundary conditions of the first kind based on the Fourier heat conduction equation. The calculation of the power of additional sources of heat in a cylindrical biogas reactor.

*Ключевые слова:* биогаз, биомасса, реактор, источники теплоты, уравнение теплопроводности Фурье, граничные условия первого рода, температурное поле.

*Keywords:* biogas, biomass, reactor, heat sources, Fourier heat equation, boundary conditions of the first kind, temperature field.

Учитывая большие объемы органических отходов пищевого, перерабатывающего и сельскохозяйственного производств, эффективная их переработка в биогаз является актуальной научно-технической задачей. Большинство конструкций биогазовых реакторов представляют собой цельную емкость, в которой процесс сбраживания происходит в едином перемешивающем режиме при соблюдении определенных температурно-влажностных режимов, в зависимости от типа брожения. В процессах переработки органических отходов для получения биогаза выделяют три температурных режима: [1-4]: 1) психрофильный – до 20–25 °С; 2) мезофильный – 25–40 °С; 3) термофильный – свыше 40 °С. Требования к допустимым пределам колебания температуры для оптимального газообразования тем жестче, чем выше температура процесса сбраживания: при психрофильном температурном режиме –  $\pm 2$  °С в час; мезофильном –  $\pm 1$  °С в час; термофильном –  $\pm 0,5$  °С в час.

Мезофильный и термофильный процессы требуют наличия внешнего источника тепла и строгого контроля за температурой. При этом, чем выше температура, тем быстрее и с большей производительностью идет образование биогаза. Поэтому для обеспечения температурного режима и управляемости процессом сбраживания биомассы весьма важно правильно выбрать мощность дополнительных источников теплоты.

В первом приближении физическая расчетная модель биогазового реактора может быть представлена цилиндром радиуса  $R$  и высотой  $H$ , а для расчета температуры можно предположить осесимметричное распределение температурного поля, когда температура внутри реактора зависит только от координаты  $R$ , т.е. рассматривать одномерную задачу.

В общем случае стационарное распределение температурного поля в реакторе на основе решения уравнения теплопроводности Фурье для независимых от пространственной координаты  $r$  источников теплоты (равномерно распределенных по объему)  $q(r) = q$  определяется выражением [5]:

$$T(r) = \frac{q}{4\lambda}(R^2 - r^2) + T_0, \quad (1)$$

где  $T(r)$ ,  $q$ ,  $\lambda$ ,  $T_0$ ,  $R$ ,  $r$  – соответственно: температурное поле; мощность внутренних источников теплоты; теплопроводность биоматериала, начальная температура в реакторе; внутренний радиус реактора; удаление рассматриваемой точки от оси реактора.

В рекомендациях по температурным режимам сбраживания биомассы обычно указывают рекомендуемую температуру или диапазон температур. Тогда диапазон температур можно рассматривать, как разницу температур между центром и у стенок реактора. Следовательно для поддержания диапазона температур  $\Delta T = T(0) - T(R)$  из выражения (1) получим:

$$\Delta T = T(0) - T(R) = T(0) - T_0 = \frac{q}{4\lambda}R^2 \quad (2)$$

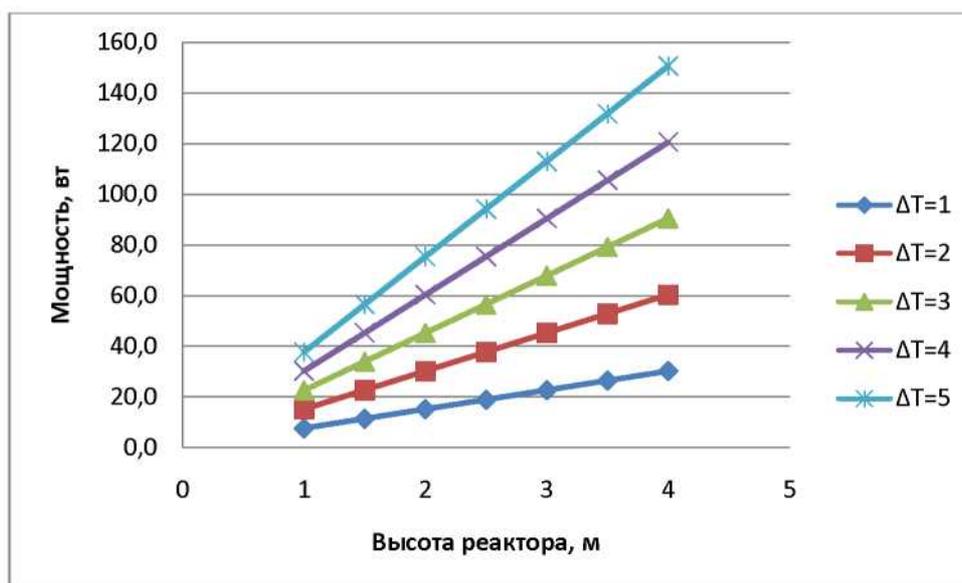
С учетом внутреннего объема реактора и выражений (1)-(2), получаем соотношение для расчета общей тепловой мощности источников  $P$ :

$$P = 4\pi\lambda H \Delta T, \quad (3)$$

где  $H$  – высота реактора.

Из выражения (3) следует, что общая мощность равномерно распределенных дополнительных источников теплоты, необходимая для поддержания разницы температур  $\Delta T$  между стенкой и центром реактора зависит от высоты реактора  $H$  и теплопроводности биомассы  $\lambda$  и не зависит от его радиуса  $R$ .

На рисунке 1 представлены расчетные значения мощности источника теплоты в зависимости от высоты реактора  $H$  при различных значениях  $\Delta T$  для биомассы с теплопроводностью  $\lambda = 0,6$  Вт/(мК).



**Рисунок 1 - Расчетные значения мощности источника теплоты в зависимости от высоты реактора**

### **Выводы**

Получены выражения для оценки тепловой мощности равномерно распределенных по объему дополнительных источников теплоты для подогрева биомассы в биогазовом реакторе цилиндрической формы. Установлено, что мощность равномерно распределенных дополнительных источников теплоты, необходимая для поддержания разницы температур между стенкой и центром реактора зависит от высоты реактора и теплопроводности биомассы и не зависит от его радиуса.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Трахунова И.А., Халитова Г.Р., Караева Ю.В. Эффективность процесса анаэробного сбраживания при различных режимах гидравлического перемешивания // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 10. С. 90-94.
2. Вендин С.В., Мамонтов А.Ю. Обоснование параметров терморегуляции и перемешивания при анаэробном сбраживании // Сельский механизатор. 2016. №7. С. 20-22.
3. Вендин С.В., Мамонтов А.Ю. Электрооборудование биогазового реактора // Сельский механизатор. 2017. №5. – С. 26-27.
4. Вендин С.В., Мамонтов А.Ю., Каплин А.В. Программа расчета геометрических и конструкционных параметров биогазового реактора // Промышленная энергетика. 2017. №3. С. 51-55.
5. Вендин С.В., Мамонтов А.Ю. Расчет мощности дополнительных источников теплоты для подогрева биомассы в биогазовом реакторе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. №7. С.97-99.

УДК 664.97, 664.959.5

**ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННОЙ  
ПЕНОСУШКИ ЖЕЛАТИНОВОГО БУЛЬОНА ИЗ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ РЫБЫ  
STUDY OF THE INTENSITY OF CONVECTIVE-RADIATIVE DRYING OF THE  
GELATIN BROTH FOAM FROM FISH PROCESSING WASTE**

**Александр Викторович Макаров\*, Юрий Александрович Максименко\*,  
Эдуард Павлович Дяченко\*\*, Као Тхи Хуе\*\*\*  
Aleksandr V. Makarov\*, Yury A. Maksimenko\*, Eduard P. Dyachenko \*\*, Cao Thi Hue\*\*\***

*\*Астраханский государственный технический университет, Россия, Астрахань*

*\* Astrakhan State Technical University, Russia, Astrakhan*

*(e-mail: amxs1@yandex.ru )*

*\*\*Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства –*

*филиал Федерального научного центра овощеводства,*

*Россия, д. Верея, Московская область*

*\*\*All-Russian Research Institute of Vegetable Growing - branch of the*

*Federal Scientific Center of Vegetable Growing, Russia, Moscow Region, Ramensky District,*

*Vereya Village*

*(e-mail: amed-nauka@yandex.ru )*

*\*\*\*Тхюйлой университет, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам*

*Thuyloi University, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam*

*(katrine-vietnam@yandex.com)*

*Аннотация:* Изучена интенсивность конвективно-радиационной пеносушки желатинового бульона из отходов переработки рыб частиковых пород Астраханской области. Получены зависимости съема сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени от влияющих на процесс сушки основных факторов. Определены рациональные режимы процесса конвективно-радиационной пеносушки желатинового бульона.

*Abstract:* The intensity of convective-radiation foam drying of gelatin broth from fish waste of ordinary fish of the Astrakhan region was studied. The dependences of the removal of dry gelatin from a unit area of the working surface per unit of time on the main factors affecting the drying process are obtained. The rational regimes of the process of convective-radiation foam-drying of gelatin broth are determined.

*Ключевые слова:* желатин, желатиновый бульон, отходы переработки рыбы, конвективный энергоподвод, конвективно-радиационная сушка.

*Keywords:* gelatin, gelatin broth, the convective-radiative drying, fish processing wastes, convective energy supply, convective-radiation drying.

Отходы переработки рыб являются перспективным источником сырья для производства желатина - одного из наиболее востребованных продуктов в различных отраслях пищевой и химической промышленности. Учитывая, что на отечественном рынке желатина преимущественно представлена импортная продукция, совершенствование технологических процессов производства желатина на основе отходов рыбопереработки является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит развить существующие и создать новые промышленные производства желатина из нетрадиционного коллагенсодержащего сырья.

Сушка является заключительной стадией производства сухого желатина, которая характеризуется сравнительно высокой энергоемкостью и определяет качество сухого продукта. Традиционно желатиновый бульон сушат в желатинизированном состоянии в

форме слоя (пластин или прядей) на рабочей поверхности сушилки при конвективном энергоподводе [1–3].

На основе результатов предварительных исследований с учетом литературных данных [1–6] изучения интенсивности и кинетики конвективно-радиационной сушки вспененного желатинового бульона в желатинизированном состоянии из отходов переработки рыб были выбраны следующие варианты реализации процесса: в форме штранг круглого сечения при объемном конвективном энергоподводе; в форме штранг круглого сечения при объемном конвективно-радиационном энергоподводе.

Исследования проводились по полному многофакторному многоуровневому плану; для уточнения влияния отдельных факторов на интенсивность процесса обезвоживания все второстепенные параметры были зафиксированы, а в качестве целевой функции был выбран сьем (выход) сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени,  $G$ , кг/(м<sup>2</sup>·ч) [5, 6]:

$$G = M_{\text{сн}} / (F \cdot \tau), \quad (1)$$

где  $M_{\text{сн}}$  – масса высушенного продукта до конечной влажности не более  $w_k = 0,1$  кг/кг, выбор которой осуществлен на основе результатов анализа гигроскопических характеристик продукта;  $F$  – площадь рабочей поверхности, занимаемой продуктом, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – экспериментальное время сушки, ч.

В таблице 1 представлены основные факторы, влияющие на интенсивность процесса конвективной пеносушки желатинового бульона, а также уровни их варьирования, установленные в результате предварительных исследований; к указанным факторам относятся: начальная концентрация сухих веществ в продукте  $C$ , кг/кг; начальный диаметр штранга пены  $d_n$ , м; температура  $T_e$ , К, влажность  $W$ , кг/кг и скорость сушильного агента (воздуха)  $v$ , м/с; плотность теплового потока, падающего с одной стороны штранга (с одной стороны слоя продукта, образованного штрангами пены)  $E$ , кВт/м<sup>2</sup>.

**Таблица 1 – Уровни варьирования факторов при конвективно-радиационной пеносушке желатинового бульона**

Уровень	Факторы					
	$d_n$ , м	$C$ , кг/кг	$E$ , кВт/м <sup>2</sup>	$W$ , %	$v$ , м/с	$T_e$ , К
1	0,002	0,24	0,95	50–60	4–5	292–295
2	0,003	0,80	2,45	–	–	–
3	0,004	0,86	–	–	–	–
4	0,005	–	–	–	–	–

Исследования проводились с использованием лабораторного оборудования ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Для проведения исследований желатиновый бульон готовился по методике [6] из отходов переработки рыб частиковых пород Астраханского региона (кожа, чешуя, кости, плавники, хрящи), полученных при разделке. Бульон, предварительно вспененный до максимальной кратности пены, экструдировали в форме штранг круглого сечения диаметром  $d_n$ , мм; поступающие из фильер экструдера штранги желатинизировали, затем закрепляли в специальном держателе в сушильной камере лабораторной конвективно-радиационной сушилки параллельно потоку воздуха и перпендикулярно излучению радиационных излучателей. Полученные таким образом экспериментальные образцы сушили до конечной влажности, не превышающей  $w_k = 0,1$  кг/кг. Для получения кривых сушки держатель с образцом периодически взвешивали.

По формуле (1) получены значения целевой функции  $G$ , кг/(м<sup>2</sup>·ч), при различных начальных диаметре штранга пены  $d_n$ , мм, и влажности вспениваемого бульона  $w_n$ , кг/кг. Относительная ошибка при определении целевой функции не превышала 12%. В результате компьютерной обработки экспериментальных данных получены адекватные аппроксимирующие зависимости сьема сухого желатина с единицы площади рабочей

поверхности в единицу времени от варьируемых факторов, при этом погрешность аппроксимации  $R^2$  полученной зависимости  $G = f(w_n, d_n)$  составила не менее 0,997:

- конвективная пеносушка

$$G(w_n, d_n) = \left[ \begin{array}{l} (0,7 \cdot d_n^2 - 7,7 \cdot d_n + 22) \cdot w_n^2 + (-0,945 \cdot d_n^2 + 10,995 \cdot d_n - 33,82) \cdot w_n + \\ + (0,267 \cdot d_n^2 - 3,547 \cdot d_n + 12,615) \end{array} \right];$$

- конвективно-радиационная пеносушка при  $E = 2,45$  кВт/м<sup>2</sup>

$$G(w_n, d_n) = \left[ \begin{array}{l} (31,3 \cdot d_n^2 - 250,5 \cdot d_n + 460,2) \cdot w_n^2 + (-48,05 \cdot d_n^2 + 384,47 \cdot d_n - 709,81) \cdot w_n + \\ + (18,18 \cdot d_n^2 - 145,42 \cdot d_n + 270,41) \end{array} \right].$$

Максимумы значений съема сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени для исследуемых вариантов реализации процесса сушки достигаются при начальной концентрации сухих веществ в продукте  $C = 0,24$  кг/кг, а также температуре  $T = 292-295$  К, влажности  $W = 50-60$  % и скорости сушильного агента  $v = 4-5$  м/с и составляют:

-  $G_{max} = 0,331$  кг/(м<sup>2</sup>·ч) - для варианта реализации процесса сушки вспененного желатинового бульона в желатинизированном состоянии в форме штранг круглого сечения с начальным диаметром  $d_n = 3$  мм при объемном конвективном энергоподводе;

-  $G_{max} = 0,998$  кг/(м<sup>2</sup>·ч) - для варианта реализации процесса сушки вспененного желатинового бульона в желатинизированном состоянии в форме штранг круглого сечения с начальным диаметром  $d_n = 4$  мм при объемном конвективно-радиационном энергоподводе с плотностью теплового потока, падающего с одной стороны штранга,  $E = 2,45$  кВт/м<sup>2</sup>.

### Выводы

Изучена интенсивность конвективно-радиационной пеносушки желатинового бульона из отходов переработки рыб частиковых пород Астраханской области в желатинизированном состоянии. Для последующего использования в расчетах производительности сушильных установок получены зависимости съема сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени от влияющих на процесс сушки основных факторов. Определены рациональные режимы проведения процесса, при которых достигается максимальный удельный съем сухого продукта, установлено, что введение радиационного энергоподвода в процесс конвективной пеносушки желатинизированного бульона при рациональных режимах трехкратно увеличивает удельную производительность процесса.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогов И. А., Забашта А. Г., Казюлин Г. П. Технология мяса и мясных продуктов: учебн.: в 2-х кн. М.: Колос С, 2009. Кн. 2: Технология мясных продуктов. 711 с.
2. Koen Egberts. Gelatin Drying Technology (Gelatin Dryer). URL: <http://gelatin.nl/home> (дата обращения: 10.05.2019).
3. Кецелашвили Д. В. Технология мяса и мясных продуктов: учеб. пособие. Кемерово: Кемер. технол. ин-т пищ. пром-сти, 2004. Ч. 3. 115 с.
4. Алексанян И. Ю., Буйнов А. А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование: моногр. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004. 380 с.
5. Aleksanyan I. Y., Dyachenko E. P., Ermolaev V. V. Analysis of the Kinetics of Sulfonol Dehydration // Russ J Appl Chem (2009) 82: 1729. URL: <https://doi.org/10.1134/S1070427209090377>.
6. Пат. 2487152 Рос. Федерация, МПК С09Н 1/04, С09Н 3/00, А23J 1/10. Способ производства желатина / Као Тхи Хуе, Дяченко Э. П.; заявл. 12.07.2011; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 2.

УДК 677.074

**ПОЛУЧЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ  
С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ  
RECEIVING THERMALLY MODIFIED WOOD WITH DESIRED PROPERTIES**

**Михаил Геннадьевич Ермоченков, Юрий Павлович Семенов  
Mikhail G. Ermochenkov, Yuri P. Semenov**

*Мытищинский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, Москва*

*Mytishchi branch of the Federal state budgetary educational institution of higher education «Moscow state technical University named after N. Eh. Bauman», Russia, Moscow  
(e-mail: ermochenkov@mgul.ac.ru, semenov@mgul.ac.ru)*

*Аннотация:* В статье рассмотрены вопросы, связанные определением свойств термически модифицированной древесины и получением материала с заданными свойствами. Приведен пример расчета режимов термомодифицирования древесины березы для получения заданного цвета.

*Abstract:* the article deals with the issues related to the determination of the properties of thermally modified wood and obtaining a material with the specified properties. An example of calculating the modes of thermal modification of birch wood to obtain a given color is given.

*Ключевые слова:* Термическое модифицирование, термодеструкция, свойства материала, технологические режимы.

*Key words:* thermal modification, thermal destruction, material properties, technological regimes.

Для улучшения потребительских и эксплуатационных свойств древесины широко применяется термическая обработка. К таким технологическим процессам относятся сушка и различные виды модифицирования, в том числе термическое модифицирование древесины.

Термическое модифицирование представляет собой процесс термодеструкции в бескислородной среде. При нагреве происходит разрушение компонентов древесины – гемицеллюлозы, целлюлозы, лигнина. Эти компоненты имеют разные химические связи, интенсивное разрушение которых происходит в разных диапазонах температур, причем эти диапазоны могут частично перекрываться [1]. Это обуславливает многостадийность процесса термической деструкции. Сложные физико-химические процессы протекающие в древесине при термической деструкции могут быть описаны с использованием уравнения Аррениуса:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \omega \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

где  $A$  – частотный фактор, [с<sup>-1</sup>];  $E$  – энергия активации, [Дж/моль];  $R$  – универсальная газовая постоянная, [Дж/(моль·К)];  $T$  – температура, [К];  $\omega$  – безразмерная масса.

Термическая деструкция являются сложным многостадийным процессом. Стадии можно рассматривать как параллельные, независимые химические реакции. Скорость многостадийного процесса может быть описана уравнением:

$$\frac{d\omega_j}{d\tau} = \sum_{j=1}^n \omega_j A_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right) \quad (2)$$

где  $j$  – номер стадии;  $n$  – число стадий.

Метод и алгоритм выделения отдельных стадий с расчета соответствующих кинетических параметров изложены в [2, 3].

Получение кинетических параметров отдельных стадий многостадийного процесса позволяет решать задачи, связанные с термической деструкцией материалов в не зависимости от функции изменения их температуры.

Текущая относительная масса стадии может быть определена из уравнения:

$$\omega_j(T, \tau) = \omega_{0,j} \cdot \exp \left[ A_j \int_{\tau_k}^0 \exp \left( -\frac{E_j}{R \cdot T(\tau)} \right) d\tau \right] \quad (3)$$

Суммарная текущая относительная масса:

$$\omega(T, \tau) = \sum_{j=1}^n \left( \omega_{0,j} \cdot \exp \left[ -A_j \int_{\tau}^0 \exp \left( -\frac{E_j}{RT} \right) d\tau \right] \right) \quad (4)$$

В [4] изложены результаты термогравиметрических исследований кинетики термической деструкции древесины в инертном газе гелии. В таблице 1 приведены кинетические параметры стадий термодеструкции древесины березы.

**Таблица 1 - Кинетические параметры термической деструкции древесины березы в гелии [4]**

Порода древесины	Номер стадии	Температура максимума скорости стадии, T <sub>max</sub> , К	Температура начала стадии, T <sub>нач</sub> , К	Температура конца стадии, T <sub>кон</sub> , К	Начальная масса стадии, ω <sub>0</sub>	Энергия активации, E/R, К	Частотный фактор, A, с <sup>-1</sup>
Береза	1	603	552	584	0,026	2,569 · 10 <sup>8</sup>	12530
	2	547	598	622	0,119	6,637 · 10 <sup>17</sup>	25006
	3	535	606	639	0,571	1,227 · 10 <sup>11</sup>	18310
	4	459	661	791	0,134	314,0	8069
	5	611	800	-	0,151	1,383 · 10 <sup>4</sup>	12850

Термическое модифицирование приводит к изменению состава и структуры древесины, что вызывает изменение свойств. Свойства получаемого материала зависят от степени термической деструкции, то есть определяются степенью завершенности отдельных стадий процесса. Таким образом, если известны текущие относительные массы стадий и свойства исходного материала, могут быть определены теплофизические свойства материала.

Плотность термомодифицированной древесины можно рассчитать из соотношения:

$$\rho = \rho_0 \cdot \left( (1-k) \sum_i^n \omega_i + k \right) \cdot \left( 1 + \frac{W}{100} \right) \quad (5)$$

где ρ<sub>0</sub> – начальная плотность древесины в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>; k – массовая доля коксового остатка при термической деструкции в бескислородной среде; ω<sub>i</sub> – текущие относительные массы стадий термодеструкции; W – текущая влажность древесины, %.

Для получения материала заданной плотности ρ при известной начальной плотности древесины ρ<sub>0</sub> и влажности W необходимо определить степень термической деструкции древесины:

$$\omega_s = \frac{\rho - k \cdot \rho_0 \cdot \left( \frac{W}{100} + 1 \right)}{\rho_0 \cdot (k - 1) \cdot \left( \frac{W}{100} + 1 \right)} \quad (6)$$

где ω<sub>s</sub> – сумма текущих относительных масс стадий.

Теплоемкость термически модифицированной древесины можно рассчитать из уравнения:

$$c = \frac{1}{\rho} c_{\partial} \rho_0 \cdot \left( (1-k) \sum_i^n \omega_i + k \right) + c_e \frac{W}{100}, \quad (7)$$

где  $c_{\partial}$ ,  $c_e$  – удельные массовые теплоемкости древесины и влаги соответственно, Дж/(кг·К).

Для получения материала заданной теплоемкостью степень термической деструкции древесины может быть найдена из соотношения:

$$\omega_s = \frac{\rho \cdot \left( \frac{W \cdot c_e}{100} - c + \frac{c_{\partial} \cdot k \cdot \rho_0}{\rho} \right)}{c_{\partial} \cdot \rho_0 \cdot (k-1)} \quad (8)$$

В этом случае задача может быть сведена к задачи оптимизации:

$$S = \sqrt{\frac{\left( \omega_s - \sum_{i=1}^n \omega_i \right)^2}{n-1}}, \quad S(\omega_1, \omega_2, \omega_3) \rightarrow \min \quad (9)$$

где  $\omega_i$  определяются из соотношения (3).

Коэффициент теплопроводности может быть определен из теории обобщенной проводимости как для композиционного материала со взаимопроникающими компонентами:

$$\lambda = \lambda_1 \left[ C^2 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (1-C)^2 + 2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{C \cdot (1-C)}{\left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} C + 1 - C \right)} \right], \quad (10)$$

где  $C = 0,5 + A \cdot \cos \frac{\varphi}{3}$

$A = -1$ ,  $\varphi = 2\pi - \arccos(1 - 2 \cdot r_2)$  при  $0 \leq r_2 \leq 0,5$ ,

$A = 1$ ;  $\varphi = 2\pi - \arccos(2 \cdot r_2 - 1)$  при  $0,5 \leq r_2 \leq 1$ .

$r_i$  – объемная доля  $i$ -го компонента;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го компонента при нулевой пористости, Вт/(м·К).

Расчет ведется последовательным добавлением компонентов, начиная с первого.

Для определения цветовых параметров термомодифицированной древесины можно воспользоваться уравнениями приведенными в [5]:

$$R(\omega) = 226 - 3692(\omega_{0,1} - \omega_1) - 1018(\omega_{0,2} - \omega_2) + 1018(\omega_{0,2} - \omega_2)^2 - 24(\omega_{0,3} - \omega_3), \quad (11)$$

$$G(\omega) = 217 - 4366(\omega_{0,1} - \omega_1) - 1572(\omega_{0,2} - \omega_2) + 9137(\omega_{0,2} - \omega_2)^2 - 24(\omega_{0,3} - \omega_3), \quad (12)$$

$$B(\omega) = 205 - 5597(\omega_{0,1} - \omega_1) - 394(\omega_{0,2} - \omega_2) + 2240(\omega_{0,2} - \omega_2)^2 - 33,8(\omega_{0,3} - \omega_3). \quad (13)$$

Уравнения (11)-(13) позволяют рассчитать текущие значения относительных масс стадий  $\omega_i$  соответствующих заданному цвету ( $R_s$ ,  $G_s$ ,  $B_s$ ). уравнения могут быть решены методами многомерной оптимизации. Задача сводится к определению минимума целевой функции:

$$S = \sqrt{\frac{(R_s - R(\omega_1, \omega_2, \omega_3))^2 + (G_s - G(\omega_1, \omega_2, \omega_3))^2 + (B_s - B(\omega_1, \omega_2, \omega_3))^2}{6}}, \quad (14)$$

$$S(\omega_1, \omega_2, \omega_3) \rightarrow \min \quad (15)$$

Имея информацию о текущих значениях относительных масс стадий термодеструкции можно рассчитать режимы технологических процессов для получения материала с заданными свойствами, в том числе заданного цвета.

Многостадийность процесса термической деструкции предполагает, что возможен случай, когда при неравенстве относительных масс стадий при разных технологических режимах их суммы равны:

$$\omega_{1,i}(\tau, T) \neq \omega_{2,i}(\tau, T), \quad \sum_{i=1}^n \omega_{1,i}(\tau, T) = \sum_{i=1}^n \omega_{2,i}(\tau, T) \quad (16)$$

Это означает, что в данном случае не существует единственного решения. Для решения задачи необходимо задание функции изменения температуры  $T = T(\tau)$ .

Реальные режимы технологических воздействий включают в себя этап нагрева с постоянным темпом до заданной температуры  $T_{max}$  и выдержку при этой температуре. Для двухэтапного режима уравнение (3) можно аппроксимировать выражением:

$$\omega_i(T, \tau) = \omega_{0,i} \cdot \exp \left[ -A_i \cdot \left( \frac{\exp\left(-\frac{E_i}{R \cdot T_0}\right) + \exp\left(-\frac{E_i}{R \cdot T_{max}}\right)}{2} \cdot \tau_1 + \exp\left(-\frac{E_i}{R \cdot T_{max}}\right) \cdot (\tau_p - \tau_1) \right) \right] \quad (17)$$

где время этапа прогрева, с;  $\tau_p$  – суммарное время этапов прогрева и выдержки, с.

В уравнение (17) входит два независимых параметра температура  $T_{max}$  и время воздействия  $\tau_p$ . Для решения задачи необходимо наложить дополнительное ограничение. В качестве ограничения может быть задано время воздействия  $\tau_p = \tau_{зад} = const$ . Тогда из уравнения (17) можно рассчитать  $T_{max}$ .

В качестве ограничения может задаваться температура  $T_{max} = T_{зад} = const$ . Из уравнения (17) определяем  $\tau_p$ . Расчеты целесообразно проводить для стадии, которая началась, но не полностью завершилась.

В качестве примера были проведены исследования образца термомодифицированной древесины березы. Начальная плотность сухой древесины  $\rho=645$  кг/м<sup>3</sup>. Термическое модифицирование проводилось в промышленных условиях в среде топочных газов по следующему режиму – нагрев с постоянным темпом  $\Delta T=7$  К/час до температуры  $T_{max} = 175$  °С, выдержка при данной температуре. Суммарное время этапов нагрева и выдержки  $\tau_p = 70$  часов. Для исходного образца были определены цветовые параметры  $R_s=125$ ,  $G_s=89$ ,  $B_s=57$ . Исходя из этих значений в качестве решения задачи (14)-(15) получаем значения текущих относительных масс стадий и их суммы:

$$\omega = (0.000182, 0.11, 0.571), \quad \omega_s = 0.9662$$

Исходя из этих данных, были термомодифицированной древесины березы. Результаты расчетных и экспериментальных исследований приведены в таблице 2. Наличие данных о текущих относительных массах стадий позволяет рассчитать режим термомодифицирования древесины для получения материала с заданными свойствами. Результаты расчетов приведены в таблице 3

**Таблица 2 – Результаты определения свойств термомодифицированной древесины березы.**

Определяемый параметр	Экспериментальные значения	Расчетные (прогнозируемые) значения	Относительная погрешность, %
Плотность сухой древесины, кг/м <sup>3</sup>	631	626	1
Влажность, %	2,7	-	-
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,175	0,167	7
Теплоемкость, Дж/кг	2770	2500	10
Цветовые характеристики R/G/B	125/89/57	121/91/47	2/10/17

**Таблица 3 – Результаты расчетов режимов термомодифицирования.**

Задаваемый параметр	Время прогрева, ч	Время выдержки, ч	Расчетный параметр
Время воздействия $\tau=30$ ч	23,5	6,0	Температура $T=184,6$ С
Время воздействия $\tau=50$ ч	22,6	27,0	Температура $T=178$ С
Температура $T=175$ С	22,1	46,3	Время воздействия $\tau=68,4$ ч
Температура $T=180$ С	22,9	19,5	Время воздействия $\tau=42,4$ ч

**Выводы**

Предложен метод определения степени термической деструкции древесины по ее цвету. Приведены соотношения позволяющие рассчитывать свойства термомодифицированной древесины. Предложен метод расчета режимов термомодифицирования для получения материала с заданными свойствами. Рассмотрен пример расчета для получения термомодифицированной березы заданного цвета. Получено удовлетворительное совпадение расчетных и реальных режимов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Исследование процесса термического разложения и горения углей, древесного топлива и гидролизного лигнина термическими методами анализа. *Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Попова Е.И., Любов В.К.* Химия твердого топлива. 2016. № 3. С. 30-39.
2. Шведов, Б. А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем: дисс. ... докт. техн. наук / Б.А. Шведов. - М.: МЛТИ, 1990. - 542 с.
3. Жигунов, С.В. Тепломассообмен и кинетика термодеструкции при высокотемпературном нагреве композиционных материалов: дис... канд. техн. наук 05.14.05. /С.В. Жигунов. – М.: МГУЛ, 1990. – 184 с.
4. Ермоченков М.Г. Кинетика термической деструкции древесины в среде инертных газов // Лесотехнический журнал. Научный журнал. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 2016. Т. 6, N 4 (24). С. 168-173. (0,4 п.л.)
5. Ермоченков М.Г., Хроменко А.В. Изменение цвета древесины березы при тепловом воздействии // Лесотехнический журнал. Научный журнал. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 2017. Т. 7, N 3 (27). С. 15-21. (0,7 п.л./0,6 п.л.).

УДК 669.015

**ИСПЫТАНИЕ РЕГУЛЯРНОЙ СОТОВОЙ НАСАДКИ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА В КОЛОННЫХ АППАРАТАХ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**  
**TEST REGULAR CELL NOZZLES FOR IMPLEMENTATION OF THE PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER IN THE COLUMN APPARATUSES IN CHEMICAL TECHNOLOGY**

**Артем Сергеевич Карпенко, Александр Сергеевич Пушнов,  
 Михаил Георгиевич Беренгартен  
 Artem S. Karpenko, Aleksandr S. Pushov, Mikhail G. Berengarten**

*Московский политехнический университет, Россия, Москва  
 Moscow Polytechnic University, Russia, Moscow  
 (e-mail: artem-karpenko@list.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрена концепция послойного расположения различных типов насадок в колонных аппаратах с целью увеличения эффективности процессов тепло- и массообмена. Приведены результаты гидравлических испытаний сухой и орошаемой сотовой насадки, а так же отдельные гидравлические испытания сетчатой насадки.

*Abstract:* The concept of layer-by-layer arrangement of various types of nozzles in column apparatus with the aim of increasing the efficiency of heat and mass transfer processes is considered. The results of hydraulic testing of dry and irrigated cellular packing, as well as individual hydraulic tests of the mesh packing are given.

*Ключевые слова:* сотовая насадка, сетчатая насадки, колонный аппарат.

*Keywords:* cellular nozzle, mesh nozzle, column apparatus.

Различают конструктивные и технологические приёмы интенсификации процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах. Конструктивные методы связаны с разработкой более эффективных насадок и обсуждаются в работах [1-3]. Для интенсификации процессов тепло- и массообмена практический интерес также представляют технологические приемы, такие как реализация пульсирующего режима течения газового потока в колонном аппарате с насадкой. Исследование этих аппаратов рассматривается в работе [3]. Пульсация расхода жидкой фазы во времени и её влияние на эффективность процессов тепло- и массообмена исследовалось в работе [4 и 5].

Анализ опубликованных к настоящему времени результатов исследований, в частности [4 и 5] показывает, что работа колонных аппаратов с насадкой в режиме инверсии фаз позволяет обеспечить максимально возможную интенсификацию процесса.

Проведенный нами анализ и выполненные нами исследования гидродинамики ряда регулярных насадок показали, что для осуществления режима инверсии фаз перспективными являются сотовая и сетчатая насадки.

Предлагаемая нами концепция интенсификации процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах базируется на использовании последовательно расположенных в аппарате слоев различных насадок, тип 1 – сотовая, тип 2 – сетчатая. При этом их основные геометрические характеристики существенно отличаются друг от друга. Близкие подходы предлагались ранее в работе [6], где слои выполнены из насыпной насадки. Однако структура насыпной насадки является неоднородной, что затрудняет реализацию устойчивого режима локальной инверсии фаз в этих условиях. Это объясняется структурой колонных аппаратов с насыпной насадкой в которых имеет место вблизи стенок аппарата повышенная доля пустот (порозность). Всплески порозности очень значительны, могут достигать до 40% и в результате локальная скорость вблизи стенок превосходит скорость в центре аппарата до 70%. Напротив, использование структур регулярной насадки делает этот потенциально высокоэффективный режим [4] технически возможным.

Поскольку при работе колонны в режиме инверсии фаз производительность такой колонны определяется величиной порозности насадки  $\varepsilon$  [7], то очевидно, что при соответствующих расходах взаимодействующих потоков газа и жидкости в условиях противотока между слоями насадки типа 1 и типа 2, где порозность –  $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$  возможно возникновение локального режима инверсии фаз. В этих условиях можно полагать, что в целом по высоте колонного аппарата течение взаимодействующих потоков будет носить пульсирующий характер, что также будет оказывать положительное влияние на эффективность процессов тепло- и массообмена [5, 7].

Проведены гидродинамические испытания, где в качестве слоя регулярной насадки типа 1 была использована разработанная новая конструкция сотовой насадки имеющая высокоразвитую удельную поверхность и изготовленная из металлической фольги. В основу конструкции предлагаемой сотовой насадки положен равносторонний 6-ти угольник, стороны которого составляют 6 мм.

Насадка выполнена из алюминиевой фольги толщиной 0,1 мм. Испытанная насадка располагалась в колонне 196x196 мм, изготовленной из оргстекла. Общая высота насадки в колонном аппарате составляла 520 мм. Слои насадки в виде 4-х отдельных блоков высотой 85 мм располагали в аппарате с зазором 10 мм друг относительно друга. Верхний слой сотовой

насадки имел высоту 45 мм. Для обеспечения оптимальных условий для разрыва пленки жидкости между соседними по высоте слоями насадки последние выполнены со смещением.

Основные геометрические характеристики испытанной сотовой насадки представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Название и геометрические размеры элементов, мм	Удельная поверхность, $a$ , $\text{м}^2/\text{м}^3$	Порозность, $\varepsilon$ , $\text{м}^3/\text{м}^3$	Эквивалентный диаметр канала, $d_e = 4\varepsilon/a$ , м
6-ти гранник 6x10	387	0,96	0,0099

Во время опытов по изучению гидравлического сопротивления сотовой насадки в качестве рабочего газа использовали атмосферный воздух при температуре 20÷22°C. Расход воздуха изменяли от 60  $\text{м}^3/\text{ч}$  до 484  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Результаты наших опытов по измерению гидравлического сопротивления сухой и орошаемой сотовой насадки представлены на графиках рисунке 1.

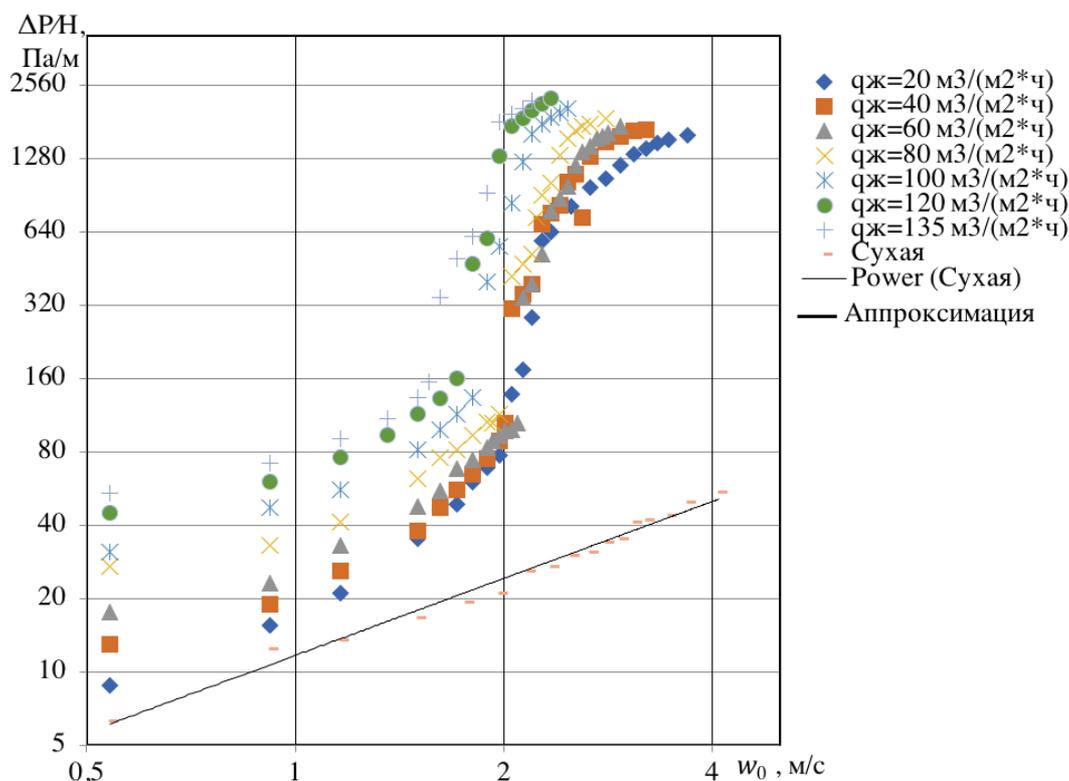


Рисунок 1 – Зависимость  $f(w_0) = (\Delta P/H)$  для сотовой насадки.

Плотность орошения  $q_{ж}$  составляла 20; 40; 60; 80; 100; 120 и 135  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

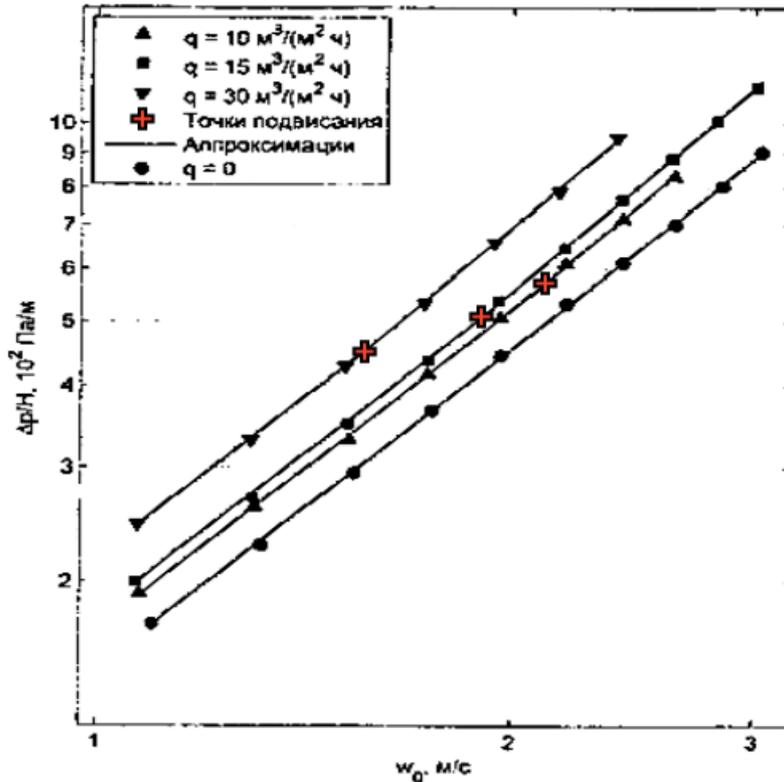
Как и описывалось ранее практическое использование эффективного режима инверсии фаз в промышленных условиях сдерживает весьма узкий диапазон работы всех известных насыпных насадок при нагрузках по газу  $w_0$ . Однако анализ работы [8], где испытана сетчатая насадка типа 2 показывает более широкий и предсказуемый характер, при нагрузках по газу  $w_0$  в режиме подвисяния, что позволяет обеспечить устойчивый технологический режим работы колонных аппаратов с насадкой в отличие от любых структур насыпных контактных устройств.

Основные геометрические характеристики испытанной сетчатой насадки представлены в Таблице 2.

**Таблица 2 – геометрические характеристики испытанной сетчатой насадки**

Название и геометрические размеры элементов, мм	Удельная поверхность, $a$ , $M^2/M^3$	Порозность, $\epsilon$ , $M^3/M^3$	Эквивалентный диаметр канала, $d_e = 4\epsilon/a$ , м
Сетка	400	0,97	0,01

Результаты наших опытов по измерению гидравлического сопротивления сухой и орошаемой сетчатой насадки представлены на графиках (рисунок 2).



**Рисунок 2 – График зависимостей гидравлического сопротивления одного погонного метра насадки регулярной сетчатой насадки от скорости движения воздуха в расчёте на полное сечение аппарата при различных значениях плотности орошения  $q$ .**

На рисунке 2 приведены зависимости  $\Delta P/H = f(w_0)$  для различных насадок в сравнении с регулярной насадкой, выполненной из сетки [8]. Как это видно, кривая зависимости  $\Delta P/H = f(w_0)$  для регулярной насадки из сетки после точки захлебывания располагается существенно более полого по сравнению с насыпными насадками. При этом точка захлебывания у насадки из сетки сдвинута в область существенно больших значений фиктивной скорости газа  $w_0$ .

Анализ зависимостей  $\Delta P/H = f(w_0)$ , представленных на рис.2, показывает, что использование регулярной сетчатой насадки позволяет существенно увеличить диапазон нагрузок по газу в колонном аппарате при его работе в области наиболее эффективного режима «инверсии фаз» [4 и 5], что делает их перспективными для осуществления ряда технологических процессов химической технологии экологии.

### **Выводы**

Использование сотовой насадки обеспечивает меньшее гидравлическое сопротивление по сравнению с сетчатой насадкой.

Комбинация слоёв сотовой и сетчатой насадки позволяет расширить диапазон устойчивой работы комбинированного контактного устройства в режиме близком к подвисянию.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранов Д.А., Беренгартен М.Г., Левин Б.В. Насадки массообменных колон / Под редакцией Баранова Д.А. М.: ООО «Инфохим», 2009, 358 с.
2. Пушнов А.С., Каган А.М. Структура и гидродинамика колонных аппаратов с насадкой. Введение в химический инжиниринг. СПб.: Издательство политехнического университета, 2011, 135 с.
3. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов Монография. Под редакцией Лаптева А.Г. Казань: Отечество, 2013, 454 с.
4. Москалик В.М. Гидродинамика и массообмен в насадочных аппаратах при пульсирующей подаче жидкости. Автореферат диссерт. На соиск. учёной степени к.т.н. М.: РАН ИОНХ им. Н.С. Курнакова, 1994, 9с.
5. Мемедляев З.Н. Гидродинамика и массообмен в аппаратах с самоорганизацией потоков. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: Институт общей и неорганической химии им. Н.С.Курнакова РАН, 1994, 50с.
6. Чиж К.В., Пушнов А.С., Беренгартен М.Г. Структура укладки миникольцевых насадок в колонных аппаратах// Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2014, №4, с. 23-26.
7. Машины и аппараты химических производств: учебник для вузов / А.С. Тимонин, Б.Г. Балдин, В.Я. Боршев, Ю.И. Гусев и др. / под общей редакцией Тимонина А.С. Калуга: Издательство «Ноосфера», 2014, 856 с.
8. Ваганов А.А. Совершенствование регулярной сетчатой насадки для процесса охлаждения воды в градирнях. Автореферат диссертации к.т.н. М.: МГУИЭ, 2011, 16 с.

УДК 664.723.047

**ИЗМЕНЕНИЕ МАССООБМЕННОГО КРИТЕРИЯ КИРПИЧЕВА ПРИ  
КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ ЗЕРНА  
CHANGING THE MASS TRANSFER CRITERION KIRPICHEVA WHEN CONVECTIVE  
DRYING OF GRAIN**

**Владимир Федорович Сорочинский, Алексей Львович Догадин  
Vladimir F. Sorochinsky, Alexei L. Dogadin**

*Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, Россия, Москва  
All-Russian Scientific and Research Institute for Grain and Products of its Processing – Branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS, Russia, Moscow  
(e-mail: vlafest@bk.ru; dogadin1@inbox.ru)*

*Аннотация:* Приведены результаты экспериментальных исследований изменения массообменного критерия Кирпичева при сушке зерна нута, относящегося к зернобобовым культурам, которые подвержены образованию трещин и ухудшению качества в процессе сушки. Получены уравнения регрессии для определения максимально допустимых значений критерия Кирпичева при разных режимах сушки зерна.

*Abstract:* The results of experimental studies of changes in the mass transfer criterion of Kirpichev during drying chickpea grain related to legumes, which are prone to cracking and deterioration in the drying process. Regression equations are obtained to determine the maximum values of the Kirpichev criterion under different grain drying regimes.

*Ключевые слова:* зерно, сушка, качество, влажность, зерно, критерии  
*Keywords:* grain, drying, quality, humidity, grain, criteria

Одними из основных критериев определяющих эффективность сушки и сохранение качества высушиваемого материала являются теплообменные критерии Кирпичева, Коссовича и Ребиндера [1]. В процессе сушки зерна подверженного трещинообразованию: риса, кукурузы, сои, бобовых культур, может наблюдаться ухудшение их качества. Величиной, характеризующей процесс трещинообразования, является массообменный критерий Кирпичева, который называют еще технологическим критерием. Он определяет отношение интенсивности испарения влаги с поверхности зерновки к градиенту влагосодержания, определяющего подвод влаги из центра к поверхности. Для параболического распределения влагосодержания в зерновке критерий можно определить по зависимости [2]:

$$Ki_m = q_m Rv / a_m \rho_o u_o = 2(u_{ц} - u_{пов}) / u_o, \quad (1)$$

где  $q_m$  – интенсивность испарения влаги с поверхности зерновки, кг/(м<sup>2</sup>·ч);  $Rv$  – определяющий размер зерновки, м;  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги, м<sup>2</sup>/ч;  $\rho_o$  – плотность сухого вещества зерновки, кг/м<sup>3</sup>;  $u_o$  – начальное влагосодержание зерновки, кг Н<sub>2</sub>О/кг. сух.в-ва;  $u_{ц}$  и  $u_{пов}$  – влагосодержание в центре и на поверхности образца, кг. Н<sub>2</sub>О/кг. сух.в-ва.

В период постоянной скорости сушки массообменный критерий Кирпичева зависит от температуры, относительной влажности и скорости агента сушки и не зависит от продолжительности этого периода. В период падающей скорости сушки критерий Кирпичева изменяется во времени, так как поток удаляемой влаги, а также коэффициент диффузии влаги изменяются в процессе сушки и значение этой функции будет определяться соотношением этих потоков. При этом, критерий Кирпичева прямо пропорционален интенсивности сушки и обратно пропорционален коэффициенту диффузии влаги

Что касается отдельной зерновки, то ввиду ее малых размеров и относительно незначительной влажности период постоянной скорости сушки практически отсутствует и изменение критерия Кирпичева будет определяться изменением влагосодержания между центром и поверхностью зерновки.

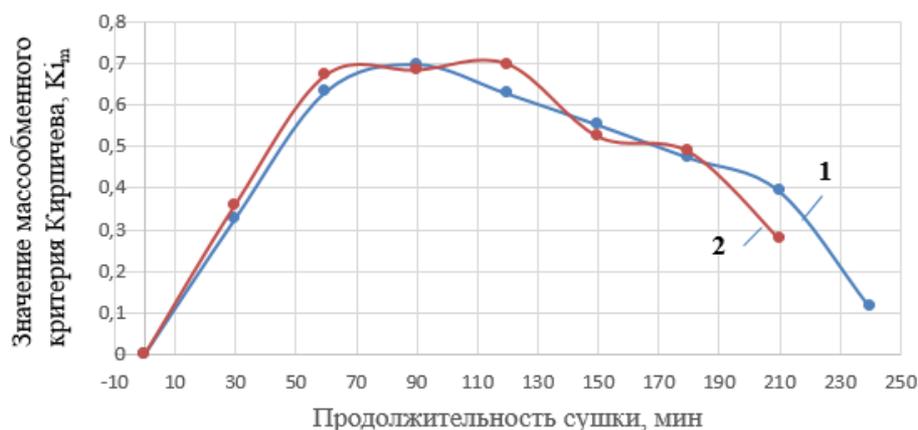
В Инструкции по сушке для зерна различных культур установлены высшие пределы температуры агента сушки и нагрева зерна различной начальной влажности, обеспечивающие сохранение его качества [3]. Вместе с тем, они не привязаны к максимально допустимому значению критерия Кирпичева и предназначены только для отдельных типов зерносушилок. Исследование зависимости критерия Кирпичева от начальной влажности зерна, температуры его нагрева, температуры агента сушки и скорости его фильтрации позволит совершенствовать режимы сушки зерна и конструкции зерносушилок.

Целью исследования является изучение зависимости критерия Кирпичева от начальной влажности и температуры зерна, температуры и скорости фильтрации агента сушки применительно к сушке зернобобовых культур, а также зерна других зерновых культур, подверженных образованию трещин при сушке, для обеспечения и сохранения их качества и снижения энергопотребления при сушке.

Настоящие исследования являются продолжением ранее проведенных исследований полей влагосодержания на модельном теле зерновки нута, для увеличения области определения и получения новых расчетных зависимостей. Сведения о экспериментальной установке, объектах и методах исследования приведены в [4].

Исследования проведены на зерновках нута при начальной влажности зерна  $W_n = 18,9 - 40,7\%$ , температуре агента сушки  $t_{a.c.} = 35, 50$  и  $70^{\circ}\text{C}$ , скорости его фильтрации  $V_{\phi} = 0,3 - 1,0$  м/с, продолжительность сушки составляла от 90 до 240 минут в зависимости от параметров зерна и агента сушки.

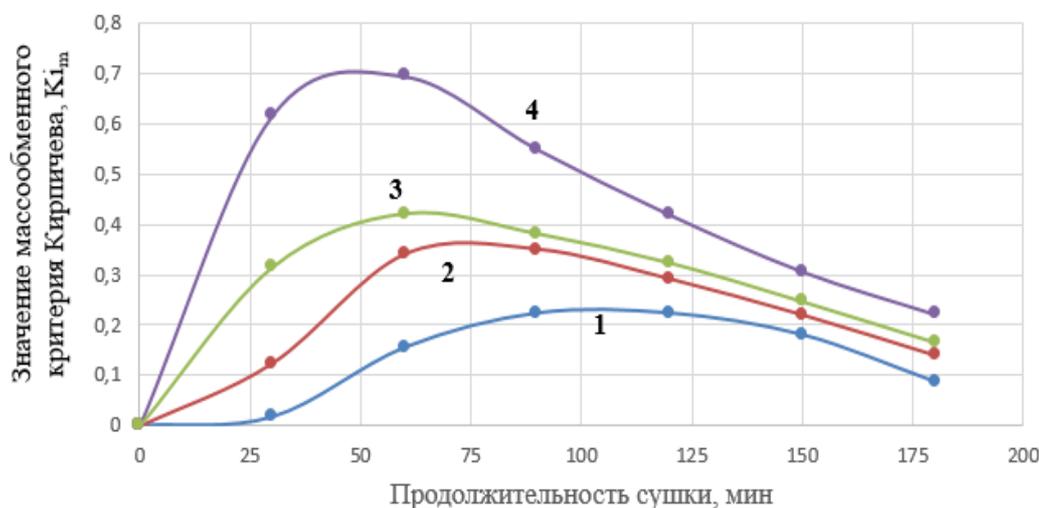
Установлено, что для высоковлажной зерновки скорость фильтрации агента сушки не играет существенной роли (рисунок 1).



**Рисунок 1 - Изменение массообменного критерия Кирпичева в процессе сушки при разной скорости фильтрации агента сушки: 1 – скорость фильтрации  $V_{\phi} = 0,3$  м/с, начальная влажность  $W_n = 38,7\%$ ; 2 -  $V_{\phi} = 1,0$  м/с,  $W_n = 40,7\%$ . Температура агента сушки  $t_{a.c.} = 35^{\circ}\text{C}$ .**

Как видно из рисунка, при примерно одинаковой начальной влажности зерна значения массообменного критерия Кирпичева при одинаковой продолжительности сушки близки друг к другу. При этом с увеличением продолжительности сушки и снижением влажности зерна значение массообменного критерия Кирпичева вначале увеличивается вследствие снижения коэффициента диффузии влаги, а затем уменьшается, вследствие снижения общего потока испаряемой влаги и уменьшения разницы во влагосодержании между центром и поверхностью зерновки. Установлено, что с увеличением начальной влажности до  $W_n = 38,7 - 40,7\%$  время достижения максимального значения критерия Кирпичева составляет 70 -90 минут при значении  $K_{i,m(max)} = 0,65 - 0,7$ , что свидетельствует о увеличении разницы во влагосодержании между центром и поверхностью зерновки и наибольшей опасности трещинообразования зерна.

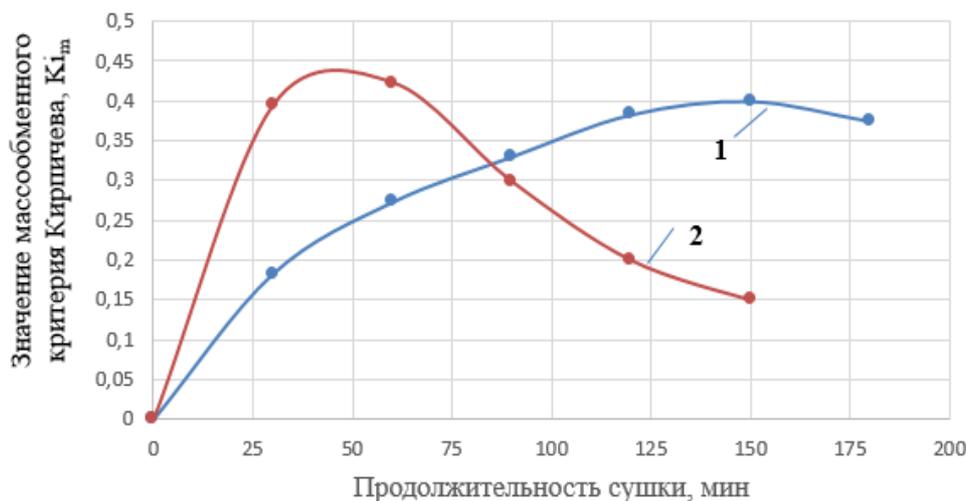
На величину массообменного критерия Кирпичева и времени его наступления существенное влияние оказывает влажность зерна (рисунок 2).



**Рисунок 2 - Изменение массообменного критерия Кирпичева в процессе сушки при разной начальной влажности зерна: 1 – начальная влажность  $W_n = 18,9\%$ ; 2 –  $22,3\%$ ; 3 –  $30,8\%$ ; 4 –  $36,2\%$ . Температура агента сушки  $t_{a.c.} = 50^{\circ}\text{C}$ , скорость его фильтрации  $V_{\phi} = 0,5$  м/с.**

При скорости фильтрации агента сушки 0,5 м/с, его температуре 50°C и начальной влажности зерна от 18,9 до 36,2% максимальное значение массообменного критерия Кирпичева изменяется соответственно от 0,25 до 0,7 и время его наступления сокращается от 105 до 70 минут, то есть происходит его смещение к началу процесса сушки.

Температура агента сушки, определяющая температуру нагрева зерна, также влияет на время наступления максимального значения массообменного критерия Кирпичева и с ростом температуры агента сушки это значение существенно уменьшается (рисунок 3). То есть с ростом температуры агента сушки при максимальном значении критерия Кирпичева быстрее наступает опасность трещинообразования и ухудшение качества зерна.



**Рисунок 3 – Изменение массообменного критерия Кирпичева в процессе сушки при разной температуре агента сушки: 1 – температура агента сушки  $t_{ac} = 35^\circ C$ , начальная влажность зерна  $W_n = 23,6\%$ ; 2 –  $t_{ac} = 70^\circ C$  и  $W_n = 23,6\%$ .  
Скорость фильтрации агента сушки  $V_\phi = 0,3$  м/с.**

Для расчета максимального значения массообменного критерия Кирпичева в процессе сушки получено уравнение регрессии:

$$Ki_{m(max)} = 0,012W_n + 0,011t_{c.a.} + 0,65V_\phi - 0,83, \quad R^2 = 0,9661 \quad (2)$$

где  $W_n = 21,7 - 30,8\%$ ,  $t_{ac} = 35 - 70^\circ C$ ,  $V_\phi = 0,3 - 1,0$  м/с – соответственно, начальная влажность зерна, температура и скорость фильтрации агента сушки. При этом температура нагрева зерна принята равной температуре агента сушки.

Увеличение максимального значения критерия Кирпичева с ростом влажности зерна, температуры и скорости фильтрации агента сушки, связано с увеличением интенсивности испарения влаги и градиента влагосодержания между центром и поверхностью зерновки.

Для расчета времени достижения в процессе сушки максимального значения массообменного критерия Кирпичева также получено уравнение:

$$\tau_{max} = 239,8 - 1,98W_n - 1,51t_{c.a.} - 44,0V_\phi, \text{ мин}, \quad R^2 = 0,9155 \quad (3)$$

где  $W_n = 18,9 - 40,7\%$ ,  $t_{ac} = 35 - 70^\circ C$ ,  $V_\phi = 0,3 - 1,0$  м/с – соответственно, начальная влажность зерна, температура и скорость фильтрации агента сушки.

Как видно из этого уравнения время достижения максимального значения массообменного критерия Кирпичева уменьшается как с ростом начальной влажности зерна, так и с ростом температуры и скорости фильтрации агента сушки, т.е. опасность трещинообразования в процессе сушки с увеличением этих параметров наступает раньше. Следует отметить существенное влияние скорости агента сушки на достижение максимального значения критерия Кирпичева.

Для предотвращения этого негативного явления «для каждого продукта опытным путем устанавливается область допустимых градиентов, т.е. область таких режимных параметров, при которых гарантируется сушка изделий с градиентами влажности не выше допустимых» [2]. Такая область определена и для сушки зернобобовых культур предусматривающая, например, для шахтных прямоточных зерносушилок при влажности зерна до 20% предельную температуру его нагрева  $40^{\circ}\text{C}$  [3]. Используя вышеприведенные уравнения (2) и (3), и принимая температуру агента сушки равной температуре нагрева зерна, при скорости фильтрации агента сушки в слое зерна равной 0,5 м/с, характерной для шахтных зерносушилок, максимальное значение критерия Кирпичева будет составлять 0,175, а время его наступления 118 минут.

Для определения максимально допустимого значения критерия Кирпичева в соответствии с [5] была проведена оценка влияния режимных параметров сушки на энергию прорастания и всхожесть семян нута. Для энергии прорастания “Э” и всхожести “В” получены следующие расчетные уравнения:

$$\text{Э} = 70,4 + 8,1 W_{\text{к}} - 0,53 W_{\text{н}} - 2,3 \Theta, \quad R^2 = 0,8594, \quad (4)$$

$$\text{В} = 76,2 + 7,9 W_{\text{к}} - 0,52 W_{\text{н}} - 2,35 \Theta, \quad R^2 = 0,8589, \quad (5)$$

где  $W_{\text{к}}$  и  $W_{\text{н}}$  – влажность зерна до и после сушки, %,  $\Theta$  – температура нагрева зерна, равная температуре агента сушки,  $^{\circ}\text{C}$ .

По полученным уравнениям можно рассчитать температуру нагрева зерна бобовых культур для обеспечения 100 % энергии прорастания и всхожести. Например, при сушке зерна бобовых культур начальной влажностью 20 до 14% и обеспечения 100 % всхожести, температура нагрева зерна, рассчитанная по уравнению (5) не должна превышать  $32,5^{\circ}\text{C}$ . При этом максимально допустимое значение критерия Кирпичева рассчитанное по уравнению (2) не должно превышать значений  $Ki_{\text{м(дон)}} = 0,093$ . Это превышает рассчитанное максимальное значение этого критерия  $Ki_{\text{м(мак)}} = 0,175$ , и предполагает проведение сушки при семенном режиме, при снижении температуры нагрева зерна.

Для интенсификации процесса сушки такого зерна и повышения максимально допустимого значения массообменного критерия Кирпичева целесообразно использование ступенчатых режимов сушки, сочетания сушки с отволаживанием и активным вентилированием, использование технологии «драйаэрации» зерна для снижения градиента влагосодержания в зерновке и утилизацию тепла, ранее пошедшего на нагрев зерна, а также электрофизические и другие способы, способствующие интенсификации процесса перемещения влаги в зерне [6].

### Выводы

Проведено экспериментальное исследование изменения массообменного критерия Кирпичева при сушке зерна подверженного образованию трещин, определена его зависимость от начальной влажности зерна, температуры и скорости фильтрации агента сушки. Получены уравнения для определения его максимального значения, а также время достижения этого значения в процессе сушки. По показателям энергии прорастания и всхожести на примере зерна нута установлено максимально допустимое значение критерия Кирпичева в зависимости от режимов сушки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 473 с.
2. Гинзбург А. С. Технология сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1976. 248 с.
3. Инструкция по сушке продовольственного, кормового зерна, маслосемян и эксплуатации зерносушилок № 9-3-82. М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1982. 61 с.
4. Сорочинский В. Ф., Догадин А. Л. Определение полей влагосодержания на модельном теле зерновки нута // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. семинара, посвящённого 175-летию со дня рождения К. А. Тимирязева. 2018. С. 40-45.

5. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М.: Стандартинформ, 2011. 64 с.

6. Сорочинский В. Ф. Снижение расхода топлива в прямоточных зерносушилках // Комбикорма. 2007. №7. С. 51-52.

УДК 677.31.017:531.213

## МЕТОД ОЦЕНКИ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ОТДЕЛЬНОЕ ВОЛОКНО THE METHOD OF ESTIMATING THE FORCE ACTING ON A SEPARATE FIBER

Светлана Юрьевна Богачева  
Svetlana Yu. Bogacheva

*Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва  
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow  
(e-mail: sveta\_bogacheva@mail.ru)*

*Аннотация:* Представлен метод оценки силы чесания, действующей на отдельное волокно в зависимости от его пространственной конфигурации. Для оценки силы в работе применим принцип виртуальных перемещений. Для расчета силы требуется определение параметров конфигурации модели волокна.

*Abstract:* The method of estimation of the carding force acting on a separate drag depending on its spatial configuration is presented. The principle of virtual displacements is applicable for the assessment of force in work. To calculate the force required to determine the configuration parameters of the fiber model.

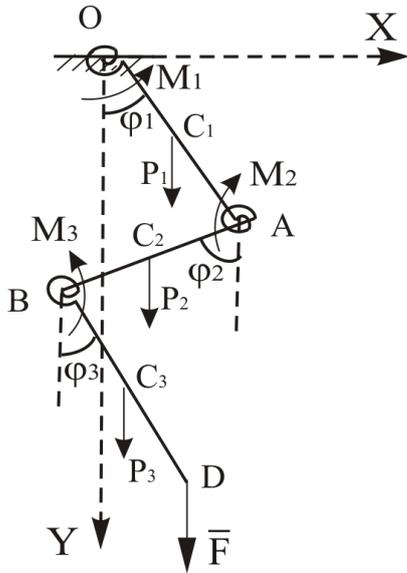
*Ключевые слова:* Волокно, сила чесания, принцип виртуальных перемещений, механическая система.

*Keyword:* Fiber, carding force, the principle of virtual movement, mechanical system.

Основная часть процессов прядильного производства основана на механическом воздействии на волокна и связана с распрямлением и ориентацией их пространственной конфигурации. Распрямление волокон может сопровождаться их повреждением и разрывом, которые имеют негативные технико-экономические последствия [1]. Регулирование сил, действующих на волокна, позволит качественно улучшить процессы их переработки, в частности, чесание. Из изложенного следует необходимость разработки метода оценки силы чесания, действующей на отдельное волокно в зависимости от его пространственной конфигурации.

Для оценки силы применим принцип виртуальных перемещений для точек системы [2]. Представим волокно в виде механической системы, состоящей из звеньев длиной  $l_i$  и массой  $m_i$  соединенных спиральными пружинами с угловой жесткостью  $c$  и находящихся в вертикальной плоскости  $Oxy$  (рис.1). Один конец системы звеньев (точка  $O$ ) закреплен с помощью пружины, а второй (точка  $D$ ) свободен. На свободный конец системы наложена растягивающая сила  $\vec{F}$ . После наложения нагрузки система приняла равновесное положение, характеризуемое независимыми углами наклона звеньев к вертикали  $\varphi_i$ .

Рассмотрим силы, действующие на механическую систему.



**Рисунок 1 – Волокно как механическая система с тремя степенями свободы**

а) На нижнюю точку D системы наложена сила  $\bar{F}$ , направленная вертикально вниз.

б) Под действием силы в спиральных пружинах возникает момент  $M_i = c\Delta\varphi_i^*$ , равный произведению жесткости пружины  $C$  на ее угловую деформацию  $\Delta\varphi_i^*$ . Деформация пружины равна разнице между углами поворота звеньев относительно друг друга до  $\Delta\varphi_i^0 = \varphi_{i-1}^0 + \varphi_i^0$  и после  $\Delta\varphi_i = \varphi_{i-1} + \varphi_i$  наложения силы  $\bar{F}$ .

в) На каждое звено действует сила тяжести  $\bar{P}_i = m_i\bar{g}$ .

Пусть данная модель состоит из трех звеньев, тогда система имеет три степени свободы, ее положение определяется тремя независимыми углами  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ .

Выразим  $y$ -координаты точек системы через углы наклона и длину звеньев:

$$y_{c1} = \frac{l_1}{2} \cdot \cos \varphi_1;$$

$$y_{c2} = l_1 \cdot \cos \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \cdot \cos \varphi_2;$$

$$y_{c3} = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + \frac{l_3}{2} \cos \varphi_3;$$

$$y_D = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3.$$

При бесконечно малом виртуальном перемещении точек системы углы получат приращения, тогда виртуальные перемещения точек  $C_1, C_2, C_3$  и  $D$ :

$$\delta y_{c1} = -\frac{l_1}{2} \sin \varphi_1 \delta \varphi_1;$$

$$\delta y_{c2} = -l_1 \sin \varphi_1 \delta \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \sin \varphi_2 \delta \varphi_2;$$

$$\delta y_{c3} = -l_1 \sin \varphi_1 \delta \varphi_1 - l_2 \sin \varphi_2 \delta \varphi_2 - \frac{l_3}{2} \sin \varphi_3 \delta \varphi_3;$$

$$\delta y_D = -l_1 \sin \varphi_1 \delta \varphi_1 - l_2 \sin \varphi_2 \delta \varphi_2 - l_3 \sin \varphi_3 \delta \varphi_3.$$

где  $\delta y_1, \delta y_2, \delta y_3$  – виртуальные перемещения центра тяжести звеньев,  $\delta y_D$  – виртуальное перемещение точки приложения силы  $\bar{F}$ ,  $\delta \varphi_1, \delta \varphi_2, \delta \varphi_3$  – виртуальные угловые перемещения звеньев.

Для данной механической системы принцип виртуальных перемещений выражается в общем случае в виде:

$$\delta A_{m_1 g} + \delta A_{m_2 g} + \delta A_{m_3 g} + \delta A_F + \delta A_{M_1} + \delta A_{M_2} + \delta A_{M_3} = 0 \quad (3)$$

Для определения условий равновесия модели дадим системе виртуальное перемещение  $\delta \varphi_1 \neq 0$ , при этом пусть  $\delta \varphi_2 = 0, \delta \varphi_3 = 0$ . С учетом равенства нулю углового перемещения второго и третьего звена, из формулы 2 получим виртуальные перемещения точек системы:

$$\begin{aligned} \delta y_{c1} &= -\frac{l_1}{2} \cdot \sin \varphi_1 \delta \varphi_1; \\ \delta y_{c2} &= -l_1 \sin \varphi_1 \delta \varphi_1; \\ \delta y_{c3} &= -l_1 \sin \varphi_1 \delta \varphi_1; \\ \delta y_D &= -l_1 \sin \varphi_1 \delta \varphi_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Условие равновесия данной модели для первого случая примет вид:

$$\begin{aligned} \delta A_{m1q} + \delta A_{m2q} + \delta A_{m3q} + \delta A_F + \delta A_{M1} &= 0; \\ m_1 q \cdot \delta y_1 + m_2 q \cdot \delta y_2 + m_3 q \cdot \delta y_3 + F \cdot \delta y_C + M_1 \cdot \delta \varphi_1 &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{m_1 g \cdot l_1}{2} \cdot \sin \varphi_1 + m_2 g \cdot l_1 \cdot \sin \varphi_1 + m_3 g \cdot l_1 \cdot \sin \varphi_1 + F \cdot l_1 \cdot \sin \varphi_1 - c \Delta \varphi_1^* = 0 \quad (6)$$

Дадим системе виртуальное перемещение  $\delta \varphi_2 \neq 0$ , считая  $\delta \varphi_1 = 0$ ,  $\delta \varphi_3 = 0$ . С учетом равенства нулю углового перемещения первого и третьего звена, получим виртуальные перемещения точек системы:

$$\begin{aligned} \delta y_{c2} &= -\frac{l_2}{2} \sin \varphi_2 \delta \varphi_2; \\ \delta y_{c3} &= -l_2 \sin \varphi_2 \delta \varphi_2; \\ \delta y_D &= -l_2 \sin \varphi_2 \delta \varphi_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Запишем условие равновесия модели для этого случая:

$$\begin{aligned} \delta A_{m2g} + \delta A_{m3g} + \delta A_F + \delta A_{M2} &= 0; \\ m_2 g \cdot \delta y_2 + m_3 g \cdot \delta y_3 + F \cdot \delta y_C + M_2 \cdot \delta \varphi_2 &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{m_2 g \cdot l_2}{2} \cdot \sin \varphi_2 + m_3 g \cdot l_2 \cdot \sin \varphi_2 + F \cdot l_2 \cdot \sin \varphi_2 - c \Delta \varphi_2^* = 0 \quad (9)$$

Дадим системе виртуальное перемещение  $\delta \varphi_3 \neq 0$ , считая  $\delta \varphi_1 = 0$ ,  $\delta \varphi_2 = 0$ . С учетом равенства нулю углового перемещения первого и второго звена получим виртуальные перемещения точек системы:

$$\begin{aligned} \delta y_{c3} &= -\frac{l_3}{2} \sin \varphi_3 \delta \varphi_3; \\ \delta y_D &= -l_3 \sin \varphi_3 \delta \varphi_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Запишем условие равновесия модели волокна для третьего случая:

$$\begin{aligned} \delta A_{m3g} + \delta A_F + \delta A_{M3} &= 0; \\ m_3 g \cdot \delta y_3 + F \cdot \delta y_C + M_3 \cdot \delta \varphi_3 &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{m_3 g \cdot l_3}{2} \cdot \sin \varphi_3 + F \cdot l_3 \cdot \sin \varphi_3 - c \Delta \varphi_3^* = 0 \quad (12)$$

Полученные уравнения (7, 10, 12) являются уравнениями равновесия плоской модели волокна, как механической системы с тремя степенями свободы. Запишем эти уравнения в виде:

$$\begin{cases} l_1 \cdot \sin \varphi_1 \left( \frac{m_1}{2} g + m_2 g + m_3 g + F \right) - c \Delta \varphi_1^* = 0; \\ l_2 \cdot \sin \varphi_2 \left( \frac{m_2}{2} g + m_3 g + F \right) - c \Delta \varphi_2^* = 0; \\ l_3 \cdot \sin \varphi_3 \left( \frac{m_3}{2} g + F \right) - c \Delta \varphi_3^* = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, для определения силы  $\bar{F}$ , действующую на механическую систему с тремя степенями свободы, необходимо решить систему трех уравнений.

Если система имеет  $k$  степеней свободы, имеется  $k$  уравнений равновесия:

$$\begin{aligned} l_1 \cdot \sin \varphi_1 \left( \frac{m_1}{2} g + m_2 g + \dots + m_k g + F \right) - c \Delta \varphi_1^* &= 0; \\ l_2 \cdot \sin \varphi_2 \left( \frac{m_2}{2} g + m_3 g + \dots + m_k g + F \right) - c \Delta \varphi_2^* &= 0; \\ l_k \cdot \sin \varphi_k \left( \frac{m_k}{2} g + F \right) - c \Delta \varphi_k^* &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Следовательно, условия равновесия плоской многосвязной модели волокна можно описать системой  $k$  уравнений вида:

$$l_i \cdot \sin \varphi_i \left( \frac{m_i}{2} g + \sum_{j=i+1}^k m_j g + F \right) - c \cdot \Delta \varphi_i = 0 \quad (15)$$

Анализ формулы показывает, что для расчета силы  $\bar{F}$  (аналога силы чесания волокна) требуется определение: параметров конфигурации модели волокна: длины звена  $l_i$  (элементарного участка волокна), конечных углов наклона звена к вертикали  $\varphi_i$ ; и физико-механических свойств: жесткости спиральной пружины  $c$  (жесткость волокна на изгиб), массы звена  $m_i$  (масса элементарного участка волокна).

Данный подход может быть применен к случаю, когда волокно располагается в горизонтальной плоскости и силой тяжести звеньев можно будет пренебречь. Определение силы чесания является предпосылкой к разработке метода управления силами, действующими на отдельное волокно за счет параметров, входящих в модель. Разработанный метод позволяет определить силу, действующую на единичное волокно по экспериментально определяемым параметрам его конфигурации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капитанов А.Ф. Фрикционные процессы в прядении. В 2-х ч. Ч. 1. Прядение и трибология. М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2005. 294 с.
2. Добронравов В.В., Никитин Н.Н. Курс теоретической механики: учебник для машиностроительных спец. вузов. М.: Высшая школа, 1983. 575 с.

УДК 577.31

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ МИКРОВОЛНОВОЙ  
ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН  
METHODIC OF DETERMINING THE RATIONAL MODES OF THE MICROWAVE  
PROCESS PRE-SOWING SEED TREATMENT**

**Ирина Леонидовна Бошкова\*, Наталья Викторовна Волгушева\*,  
Лидия Александровна Жарикова\*\*  
Irina L. Boshkova\*, Natalya V. Volgusheva\*, Lidiya A. Zharikova\*\***

*\*Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса  
Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine, Odessa  
(e-mail: boshkova.irina@gmail.com)*

*\*\*Институт физико-математических наук и информационных технологий Балтийского  
федерального университета им. И. Канта, Россия, Калининград  
Immanuel Kant Baltic Federal university, Russia, Kaliningrad  
(e-mail: l\_zharikova@mail.ru)*

*Аннотация:* предложена методика расчета предельно допустимого времени обработки семенного зерна в микроволновом поле. Учитывается, что причиной возникновения биостимуляции является улучшение транспортных свойств растительной ткани в процессе изобарного нагрева. Приведены результаты расчета граничных кривых для зерна пшеницы в зависимости от его влажности и температуры.

*Abstract:* methodic for calculating the maximum allowable time for processing seed grain in a microwave field is proposed. It is taken into account that the cause of biostimulation is the improvement of the transport properties of plant tissue in the process of isobaric heating. The results of the calculation of the boundary curves for wheat grain depending on its humidity and temperature are given

*Ключевые слова:* микроволновой нагрев, семена, биостимуляция, температура, допустимое время

*Keywords:* microwave heating, seeds, biostimulation, temperature, time allowed

В настоящее время созданы основы для практического применения в сельском хозяйстве предпосевной обработки семян микроволновым (МВ) полем, целью которой является улучшение их посевных качеств, таких как всхожесть и энергия прорастания. Для эффективного внедрения метода МВ биостимуляции целесообразно получение расчетной методики оценки рационального режима обработки, которая позволяет для заданной мощности микроволновой установки и вида обрабатываемого зерна с определенным влажностью оценивать граничное время выдержки в микроволновом поле. При разработке этой методики в основу была положена гипотеза, согласно которой эффект биостимуляции связан с улучшением транспортных свойств растительной ткани [1]. Представляется следующая схема протекания процессов в семенах при их МВ обработке. Вначале протекает квазиизобарный процесс преобразования энергии МВ поля в теплоту в объеме растительной клетки. В то же время в замкнутых микрообъемах микрофибрилл целлюлозы, содержащих полярные молекулы, растет давление, что приводит к некоторому расширению клеточной стенки, вызывая увеличение проницаемости капиллярно-пористой структуры растительной ткани. При дальнейшем подводе МВ энергии, когда клетки уже не в состоянии увеличивать свой внутренний объем, начинается нарастание давления в цитоплазме, что, в конечном счете, приводит к нарушению целостности клеточных стенок. Этот режим в технологии микроволновой биостимуляции является недопустимым. Предлагаемая методика расчета позволяет оценить длительность обработки, при которой

процесс МВ нагрева будет безопасным для семян, и в то же время, способствовать допустимому растяжению клеточных стенок, определяемому продолжительностью квазиизобарного процесса. Расчет предлагается проводить по следующему алгоритму.

1. Определить максимально допустимый объем клетки зародыша семян  $V_K$  – т.е. тот объем, который может быть достигнут при термическом расширении протоплазмы.

2. Найти изменение температуры в процессе увеличения объема от  $V_0$  до  $V_K$  из соотношения:

$$\Delta t = \frac{V_K - V_0}{\beta \cdot V_0}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент температурного расширения, принимается для воды с учетом влагосодержания семян.

3. Определить количество теплоты, Дж, поглощенной в этом процессе:

$$Q = Mc_p \Delta t + P \Delta V, \quad (2)$$

4. Рассчитать время, с, в течение которого это тепло было получено:

$$\tau = Q / (q \cdot V), \quad (3)$$

где  $V$  – объем обрабатываемых зерен,  $q$  – удельная мощность, выделяющаяся в виде тепла в единице объема материала, находящегося в микроволновом поле, которая выражается уравнением (4) [2]:

$$q = 0,556 \cdot 10^{-10} \varepsilon' \operatorname{tg} \delta \cdot E^2, \text{ Вт/м}^3 \quad (4)$$

где  $\varepsilon'$  – диэлектрическая проницаемость материала,  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь,  $E$  – напряженность электрического поля.

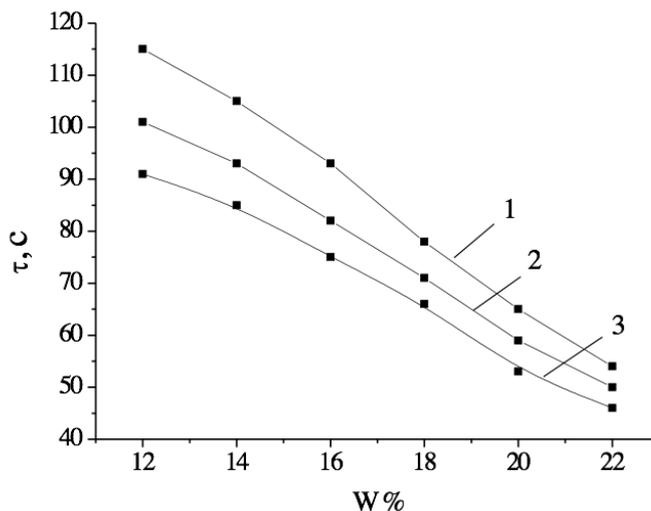
Значения диэлектрических характеристик и метод расчета напряженности электрического поля представлен в [3, 4].

В течение этого времени нахождение в микроволновой камере не будет представлять опасности для жизненных функций семян. Пользуясь представленной методикой, были проведены расчеты граничного времени МВ обработки. Геометрические характеристики элементов растительной клетки определялись согласно данным [5]. Максимально допустимое увеличение объема клетки зародыша от первоначального считалось равным 5%. Теплоемкость зерна пшеницы определяется зависимостью (5) согласно [6]:

$$c = 0,01 [c_0 (100 - W) + c_g \cdot W], \quad (5)$$

где  $W$  – влажность зерна,  $c_0$  – теплоемкость сухого материала.

На рисунке 1 представлены результаты расчета граничных кривых для времени обработки семян пшеницы в микроволновой камере при выходной мощности магнетрона 1 кВт в зависимости от влажности зерна и при различных значениях начальной температуры материала. Начальная температура материала оказывает существенное влияние на значение допустимого времени обработки, что связано с зависимостью от температуры диэлектрических характеристик и коэффициента объемного (температурного) расширения. При расчете полагалось, что начальная температура зерна и температура окружающей среды одинаковы.



1 – начальная температура 10 °С, 2 – начальная температура 15 °С,  
3 – начальная температура 20 °С.

**Рисунок 1 – Граничные кривые по времени обработки семян пшеницы в микроволновой камере. Выходная мощность магнетрона – 1 кВт.**

Рациональные режимы обработки, которые определяются выходной мощностью магнетрона, температурой материала и окружающей среды и временем, оцениваются по полученным кривым, при этом длительность нахождения в МВ камере должна быть несколько ниже соответствующего значения на кривой. Данные расчета по предложенной методике удовлетворительно коррелируются с результатами, полученными при лабораторных и полевых испытаниях семян, высеванных после их предпосевной обработки в микроволновой камере [7].

#### **Выводы**

Методика расчета предельной выдержки семян в микроволновом поле при их предпосевной обработке, основанная на гипотезе улучшения транспортных свойств проводящей системы растительной ткани в процессе изобарного нагрева растительных клеток, позволяет произвести выбор рациональных режимов обработки с учетом вида зерна, его начального влагосодержания и температуры.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Калинин Л. Г., Бошкова И. Л. Физическая модель отклика растительной ткани на воздействие микроволнового электромагнитного поля // Биофизика. 2003. Т.48. Вып.1. С. 122-124.
2. Рогов И. А., Некрутман С. В., Лысов Г. В. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 200 с.
3. Nelson S. O. Dielectric Properties of Agricultural Products and Some Applications // J. of Res. Agr. ENG. 2008. Vol. 54. №2. P. 102-112.
4. Бошкова И.Л., Колесниченко Н. А. Оценка теплового эффекта взаимодействия материала с микроволновым электромагнитным полем // Научные труды ОНАХТ. 2014. Вып. 45. Т. 1. С. 22-28
5. Грин Н., Стаут У., Тейлор Д. Биология. Т.1. М.: Мир, 1996. 454 с.
6. Гинзбург А. С., Громов М. А. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы. М.: Колос, 1984. 304 с.
7. Калинин Л.Г., Бошкова И. Л., Волгушева Н.В. Влияние микроволнового электромагнитного поля на семена агрокультур // Материалы научно-практической конференции ГНУ КНИИХП «Комплексное использование биоресурсов: малоотходные технологии». Краснодар: Издательский Дом-Юг, 2010 г. С. 74-78.

УДК: 621.793

## СВОЙСТВА КОНТРОЛИРУЕМЫХ АТМОСФЕР ИЗ РАЗНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА PROPERTIES OF CONTROLLED ATMOSPHERE FROM DIFFERENT TYPES OF FUEL

**Болеслав Болеславович Виленчиц, Вячеслав Константинович Попов,  
Геннадий Викторович Шаронов  
Boleslav B. Vilenchic, Viachaslav K. Popov, Gennadiy V. Sharonov**

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко,  
Белорусский государственный университет, Республика Беларусь, Минск  
The Institute of Applied Physical Problems named after A.N. Sevchenko,  
Belorussian state university, Republic of Belarus, Minsk  
(e-mail: vkp@bk.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрено поведение различных видов топлива при создании контролируемых атмосфер. Определены различия, связанные с видом топлива, в скорости передачи углерода и точности управления. Установлены топливно-воздушные смеси, отличающиеся высокой скоростью передачи углерода при обеспечении энергоэффективной и качественной термообработки.

*Abstract:* The behavior of various types of fuel during the creation of controlled atmospheres is considered. The differences associated with the type of fuel in the carbon transfer rate and control accuracy are determined. Fuel-air mixtures that have a high carbon transfer rate while providing energy-efficient and high-quality heat treatment are found.

*Ключевые слова:* термообработка, контролируемые атмосферы, топливно-воздушные смеси, энергоэффективность.

*Keywords:* heat treatment, controlled atmospheres, fuel-air mixtures, energy efficiency.

Разнообразие видов топлива, которые могут быть использованы для создания контролируемой печной атмосферы для термообработки представляет определенную проблему, поскольку данных о свойствах цементационных атмосфер, образующихся при использовании различных видов топлива, недостаточно для практического использования.

Для решения той задачи были испытаны различные виды топлива для создания печной атмосферы при прямом ее создании непосредственно в объеме печи.

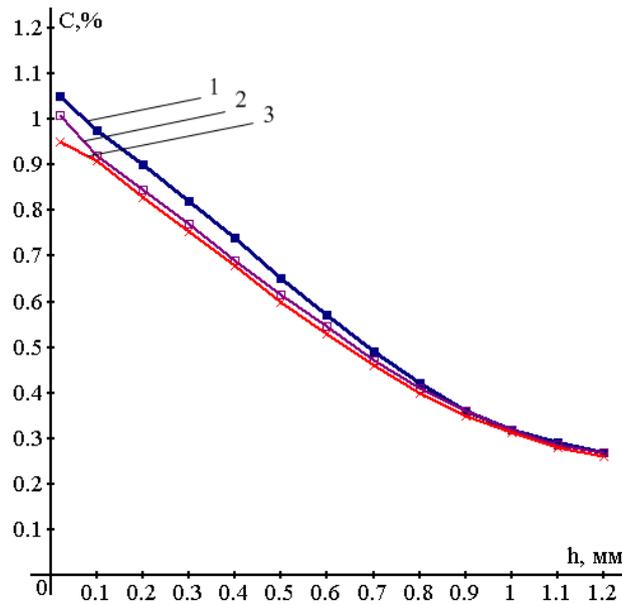
Для проверки свойств различных цементационных атмосфер сравнительные испытания проводились в автоматической камерной печи объемом около 1 м<sup>3</sup>. Для всех партий выполнялся один и тот же цикл термической обработки: нагрев до 950 °С в течение 50 мин. при углеродном потенциале  $C_p = 0,80 \%C$  и науглероживание при 950 °С в течение 240 мин при углеродном потенциале  $C_p = 1,12 \%C$ . Для всех видов топлива был установлен примерно равный расход газа через камеру печи.

В экспериментах были использованы атмосферы, указанные в таблице 1.

**Таблица 1– Науглероживающие атмосферы**

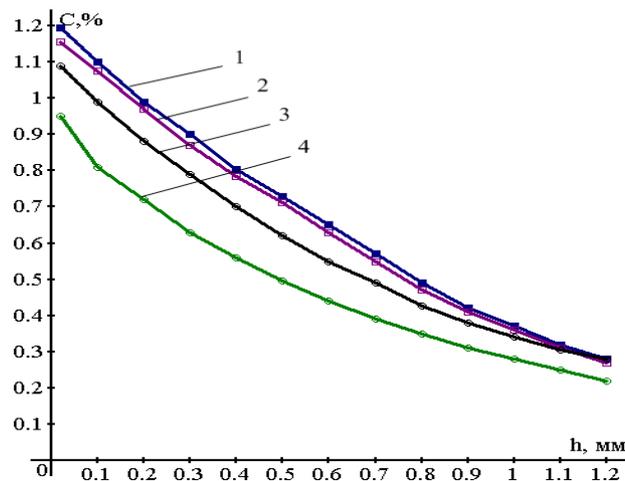
Эндогазы	Углеводороды	Спирты
Эндогаз (из метана)+метан	Метан + воздух	Ацетон + воздух
Эндогаз(из пропана)+ пропан	Пропан + воздух	Изопропанол + воздух
Метанол+ 40% азот+ метан	Керосин + воздух	Этанол + воздух
	Дизтопливо + воздух	

Профили углерода образцов, обработанных в эндогазе или эндогазоподобных атмосферах, показаны на рисунке 1.



1 – метан/воздух, 2 – N<sub>2</sub>/метанол/метан, 3 – пропан/воздух

**Рисунок 1 – Профили углерода после цементации в эндотермических газах**

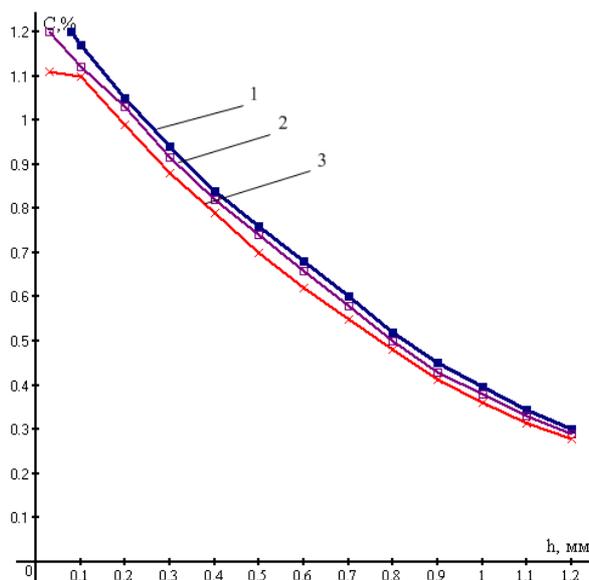


1 – метан/воздух, 2 – керосин/воздух, 3 – дизтопливо/воздух, 4 – пропан/воздух

**Рисунок 2 – Профили углерода при цементации в смеси углеводородов с воздухом**

Среднее содержание углерода составляло около 1,0 %C , глубина науглероживания была около 0,95 мм.

По сравнению с этими данными, предельное содержание углерода в образцах, цементированных в смесях углеводород/воздух, выше и составляло в среднем 1,15 %C. Исключение составляла смесь дизтопливо/воздух, что можно видеть на рисунке 2, где глубина науглероживания была около 1,0 мм. Слабый науглероживающий эффект смеси дизтопливо/воздух, вероятно, обусловлен наличием серы в дизельном топливе, содержащем 15-35 ppm H<sub>2</sub>S.



1 – ацетон/воздух, 2 – этанол/воздух, 3 – изопропанол/воздух

**Рисунок 3 – Профили углерода при цементации в спиртовоздушных смесях**

Дальнейшее увеличение содержания углерода и глубины цементации происходит в спиртовоздушных смесях, что можно видеть на рисунке 3. Здесь содержание углерода составляет в среднем 1,2 %С и глубина цементации достигает 1,05 мм.

Рассчитанное по профилям углерода количество переносимого углерода всех эндогазоподобных атмосфер и смеси воздух/керосин составляет около 40 г/м<sup>2</sup>. В то время как перенос углерода при использовании спиртовоздушных смесей составляет в среднем около 50 г/м<sup>2</sup>, то есть на 25% больше.

Смеси природного газа или пропана с воздухом обеспечивают перенос углерода около 48 г/м<sup>2</sup>.

Эндогаз с добавками природного газа обладает лучшими свойствами переноса, чем использование смеси пропана с воздухом. При использовании смеси азот + метанол + природный газ результаты испытаний были ниже, чем в случае эндогаза с природным газом. Этот результат подтверждается более ранними исследованиями [1].

В случае смеси природного газа и воздуха, переносимое количество углерода при содержании оксида углерода в атмосфере порядка 17% было особенно высоко. Это объясняется размером молекул: молекула СН<sub>4</sub> является самой маленькой из используемых углеводородов в данном случае. При более крупных молекулах углеводородов передаточные свойства переноса углерода были значительно ниже.

Исследуемые спиртовоздушные смеси обладают хорошими свойствами переноса и имеют лишь небольшие отличия. Самая высокая скорость переноса – в ацетоне и кетоне, который имеет молекулу СО с двумя метил радикалами (СН<sub>3</sub>–СО–СН<sub>3</sub>) в структурной формуле.

Увеличение коэффициента массопереноса  $\beta$  для топливно-воздушных смесей с ростом граничного содержания углерода связано с уменьшением содержания кислорода. Степень покрытия кислородом поверхности заготовки зависит от степени расщепления СН<sub>4</sub> [1, 2].

При оценке воспроизводимости процесса науглероживания возникает вопрос о том, какие условия вызывают равновесное содержание СН<sub>4</sub> в атмосфере. При этом следует обратить внимание на принципиальные различия в процессе создания печной атмосферы.

В топливно-воздушных смесях расход топлива поддерживается постоянным. Для достижения необходимого углеродного потенциала регулируется расход воздуха. Остаточное содержание СН<sub>4</sub> в камере печи определяется реакцией топлива и воздуха.

В случае использования эндогазовой атмосферы, для достижения нужного углеродного потенциала добавляют некоторое количество  $\text{CH}_4$  и остаточное содержание  $\text{CH}_4$  не соответствует реакциям в атмосфере печи.

Постоянный расход топлива обеспечивает в смеси топлива и воздуха превосходную воспроизводимость науглероживания даже при разных объемах загрузок и печи. Профили углерода трех партий с одинаковым циклом науглероживания показали разброс значений содержания углерода в узком диапазоне не более 0,04 % С.

#### **Выводы**

Обнаружены различия в коэффициенте массопередачи углерода  $\beta$  и в управляемости печной атмосферы при применении разных видов топлива, которые, очевидно, связаны со структурой топливной молекулы.

Показано, что атмосферы, образующиеся при прямой подаче природного газа и воздуха, ацетона и воздуха, изопропанола и воздуха, обладают лучшими свойствами передачи углерода и в то же время очень хорошим контролем и воспроизводимостью.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Göhring, W., Luiten, C. H. Aufkohlungseigenschaften von Atmosphären mit konstanter Kohlenwasserstoffzufuhr // Härterei-Tech. Mitt. 1988. V.43. № 4. P. 236-240.
2. Luiten, C. H.; Grabke, H. J.; Göhring, W. Chemisches Gleichgewicht oder Nicht-Gleichgewicht bei Aufkohlungsatmosphären // Härterei-Tech. Mitt. 1986. V.41. № 1. P. 24-27.

УДК 66.067

### **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕМБРАННОЙ СИСТЕМЫ В ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД THE EFFICACY OF MEMBRANE SYSTEMS IN TECHNOLOGY COMBINED WASTEWATER TREATMENT**

**Елена Заболотная\*, Ирина Игоревна Меньшова\*\*  
Elena Zabolotnaya\*, Irina I. Menshova\*\***

*\*АО Научный центр «Малотоннажная химия», Россия, Москва*

*\*R&D Centre "Fine Chemicals", Russia, Moscow*

*(e-mail: zabolotnaya.e@inbox.ru)*

*\*\*Российский химико-технологический университет им. Менделеева*

*(Логистика и экономическая информатика), Россия, Москва*

*D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,*

*Russia, Moscow*

*(e-mail: iimenshova@gmail.com)*

**Аннотация:** Рассмотрено комбинирование физико-химических методов очистки с мембранной очисткой методом микрофльтрации. Исследовано многократное повторное использование очищенной воды для крашения текстильных материалов.

**Abstract:** The combination of physical and chemical methods of cleaning with membrane cleaning by microfiltration is considered. The repeated reuse of purified water for dyeing textile materials has been investigated.

**Ключевые слова:** мембранные технологии, крашение, сточные воды, очистка сточных вод.

**Keywords:** membrane technologies, dyeing, wastewater, wastewater treatment.

В настоящее время для очистки сточных вод всё больше используют мембранные технологии. Очистка мембранами способна обеспечить высокое качество очищенной воды, полное задержание взвешенных частиц и бактерий, частичное обеззараживание очищенной

воды. В результате будет уменьшен расход свежей воды, что является особенно важным для регионов с дефицитом воды, и снизится нагрузка на окружающую природную среду вследствие уменьшения количества загрязняющих веществ, содержащихся в сточных водах.

Мембранные процессы используются широко, и сфера их применения постоянно расширяется. Мембранные процессы можно разделить на: микрофильтрация (МФ); ультрафильтрация (УФ); обратный осмос (ОО); электродиализ (ЭД); газоразделение (ГР); перапарация (ПВ); мембранная дистилляция (МД); разделение с помощью жидких мембран [1].

В работе предложен комбинированный метод очистки с микрофильтрацией микропористой капроновой мембраной сточных вод после крашения. В соответствии с технологическим режимом, ткани после крашения текстильных материалов подвергаются промывке, которая осуществлялась периодическим или непрерывным способами. Крашение и промывку проводили с использованием технологической воды из следующих источников: вода из магистрального водопровода г. Москвы ГОСТ 2874-82, модельная технологическая вода, содержащая различное количество ионов:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}$  (III); вода с нормативным содержанием элементов, используемых в текстильном производстве. Сточные воды содержали различного класса красители: прямой синий С-П С.I.Direkt Blue 151, прямой красный 2С С.I.Direkt Red 54, активный realan Blau В Granulat После очистки остаточных сточных вод активированным порошковым углём марки «Chemviron Carbon». При контакте сорбента с раствором в первый момент времени (тк < 10 мин) исследуемую воду с повышенным содержанием солей подвергли более глубокой очистке с применением микропористой капроновой мембраны. [2].

**Таблица 1 - Параметры воды, с повышенным содержанием солей, после комбинированной очистки активированным углём и микропористой капроновой мембраной.**

Вода	Концентрация Fe(III), мг/л	Концентрация Mn(II), мг/л	Концентрация Cu (II), мг/л	Концентрация $\text{SO}_4^{2-}$ , Мг/л	Концентрация $\text{PO}_4^{3-}$ , мг/л	Концентрация $\text{Cl}^-$ , мг/л	Концентрация $\text{Al}^{3+}$ , мг/л	pH	Общая жесткость воды, С мг экв/л
После адсорбции порошковым углём марки «Chemviron Carbon»	0,063	11,6	0,0045	680,9	0,042	1215,1	0,31	6,0	7,0
После капроновой микрофильтрационной мембраны	0,061	11,5	0,0045	680,7	0,042	1215,0	0,30	6,0	7,0

Комбинированный способ позволяет на заключительной стадии очистки получить воду с содержанием солей, которые по существующим нормативам могут быть использованы для промывки или крашения. Промывные воды отбирали после крашения с применением умягчителей в крашении, препаратов на базе смеси фосфорной кислоты и ее натриевых солей; полифосфорной кислоты, на технологических водах [3].

Количество красителя на волокне определяется фотоколориметрическим методом (по остаточной ванне), а также цветовых характеристик полученных окрасок по методикам, представленным в методической части. Устойчивость окрасок красителей к сухому трению определяется по ГОСТ 9733.27 - 83. Общие цветовые различия окрасок с использованием различной технологической воды определяли на приборе спектрофотометр «MINOLTA» CM 3600 d (Италия) с программным обеспечением фирмы «Orintex» [4].

Качество окрасок при повторном крашении с применением препарата для умягчения на базе полифосфорной кислоты красителем realan Blau В Granulat на очищенных водах после крашения, показано в таблице 1.

**Таблица 2 – Качество окрасок при крашении прямыми красителями на технологической воде, очищенной комбинированным способом.**

Тип воды	Содержание красителя на волокне, %		ΔE	Устойчивость к трению ГОСТ 9733.27-83	
	прямой синий С-П C.I.Direkt Blue 151	прямой красный 2С C.I.Direkt Red 54,		Мокрое	Сухое
Вода из магистрального водопровода г.Москвы соответствующая ГОСТу 2874-82	73	73,5		5	4
Модельная технологическая вода, содержащая повышенный состав солей, после комбинированной очистки	81,4	82,3		5	5
Вода с нормативным содержанием элементов, используемых в текстильном производстве	75	74,8		5	4

Предложенная схема комбинированной очистки, позволяет многократно использовать очищенные сточные воды в повторном крашении текстильных материалов, и использовать воду в десятикратном размере [5].

#### **Выводы**

Рассмотрено применение комбинированной мембранной установки в очистке технологических вод, состоящей из очистки активированным углём и микропористой мембраной. Показано, что очистка предлагаемым способом позволяет полностью удалить краситель из остаточной ванны, а также частично соли, оставив их необходимое количество для последующего повторного использования в крашении. Установлено, что предлагаемый способ очистки позволяет использовать сложные многокомпонентные технологические воды для повторного использования многократно.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Свитцов А.А. Введение в мембранную технологию.-М.: ДеЛи принт, 2007.- С. 208.
2. Свитцов А.А., Меньшова И.И. Мембранная очистка промывных вод крашения для их повторного использования печ. Всероссийская научная конференция «Мембраны-2007».- М., Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева.- 2007, С.122.
3. Меньшова И.И., Кострова А.Д. Мембранные технологии в процессах очистки сточных вод отделочного производства текстильной промышленности. Сборник научных трудов Технология отделки и чистки текстильных изделий к 75-летию кафедры химической технологии волокнистых материалов под ред. В.В. Сафонов, М.-: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2009г, С.33-41.
4. Учебное пособие под редакцией д.т.н., проф. В.В. Сафонова Практикум по химической технологии отделочного производства М.:ГОУВПО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2008.- С. 595.
5. А.А. Свитцов, А. Штогрин, Н. Филимонова. Основы проектирования производств, использующих мембранное разделение/ РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М. 2007, С.100.

УДК 544.723:546.302:677.31

**ХЕМОСОРБЦИЯ КАТИОНОВ МЕТАЛЛОВ ( $M^{2+}$ ) БИОПОЛИМЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ**  
**CHEMISORPTION OF METAL CATIONS ( $M^{2+}$ ) BY BIOPOLYMERIC MATERIALS FROM AQUEOUS SOLUTIONS**

**Владимир Александрович Козлов, Татьяна Евгеньевна Никифорова**  
**Vladimir A. Kozlov, Tatiana E. Nikiforova**

*Ивановский государственный химико-технологический университет,  
Россия, Иваново*

*Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo  
(e-mail: kozlov@isuct.ru, tatianaenik@mail.ru)*

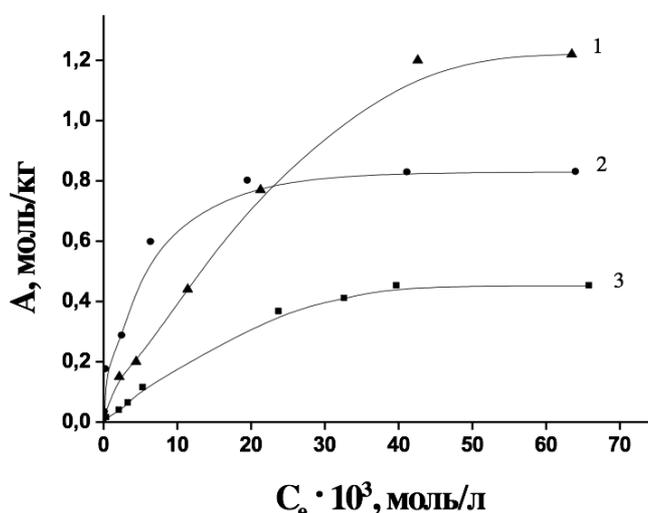
*Аннотация:* Рассмотрены некоторые особенности механизма сорбции и протондесорбции тяжелых металлов ( $M^{2+}$ ) из водных растворов кислот и солей нативными (целлюлоза, хитозан, кератин) и модифицированными биополимерными материалами с участием в качестве центров сорбции кислотных (Cell-COOH), солевых ( $-OOC-W-NH_3^+$ ), аминогрупп (CS-NH<sub>2</sub>) и других.

*Abstract:* Some features of the mechanism of sorption and proton-desorption of heavy metals ( $M^{2+}$ ) from aqueous solutions of acids and salts by native (cellulose, chitosan, keratin) and modified biopolymer materials with the participation of acid groups (Cell-COOH), amino groups (CS-NH<sub>2</sub>), salt sorption sites ( $-OOC-W-NH_3^+$ ) and others are considered.

*Ключевые слова:* целлюлоза, хитозан, кератин, сорбция катионов металлов.

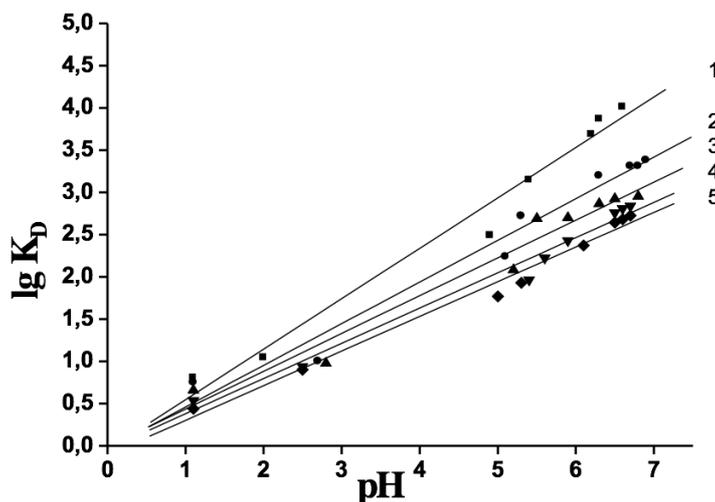
*Keywords:* cellulose, chitosan, keratin, sorption of metal cations.

Изотермы хемосорбции катионов металлов ( $M^{2+}$ ) из водных растворов их солей (рН < 7) биополимерными материалами (целлюлоза, хитозан, кератин) хорошо описываются в рамках модели Ленгмюра. Заполнение центров сорбции модифицированной целлюлозы проходит в соответствии с их количеством и дентатностью на начальном участке изотермы сорбции (область Генри), а на завершающем участке изотермы (область насыщения) - с их количеством и основностью [1] (рис. 1).



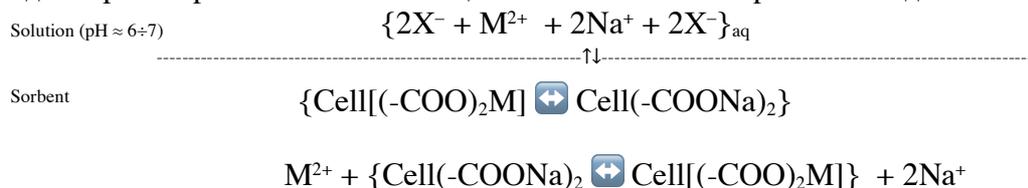
**Рисунок 1 – Изотермы сорбции ионов никеля образцами целлюлозы с альдегидбисульфитными группами (1), с гидроксамовыми кислотными группами (2) и немодифицированной целлюлозой (3)**

В водно-кислотных средах (при  $pH < 7$ ) наблюдается конкурентная, эквивалентная, равновесная сорбция катионов металла и протона биополимерными сорбентами. Это подтверждается линейной зависимостью коэффициента распределения ( $K_{DM^{2+}} = [C_{M^{2+}}]_{solid}/[C_{M^{2+}}]_{aq}$ )<sub>i</sub> индикаторного, постоянного количества катионов металла ( $M^{2+}$ ) от кислотности водной фазы в логарифмических координатах  $lg(K_{DM^{2+}})_i = tg\alpha \cdot (pH)$  с  $tg\alpha \approx 0,5$  для биополимеров с различными по природе центрами сорбции: хитозан  $CS(\sim NH_2)_n$ , кератин  $(^+H_3N\sim)_n W(\sim COO^-)_n$  и целлюлоза  $Cell(-COO^-)_n$  [2-4]. Влияние кислотности среды на распределение ионов  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  и  $Cd^{2+}$  в гетерофазной системе « $H_2O - H_2SO_4 - MSO_4 - Cell-CHONCOOH$ » показано на рис. 2.

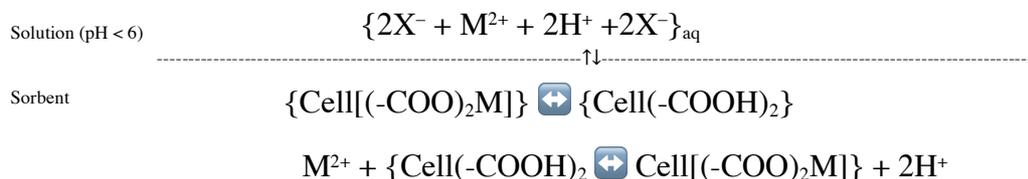


**Рисунок 2 – Зависимость  $lgK_D$  ионов  $Cu^{2+}$  (1),  $Fe^{2+}$  (2),  $Ni^{2+}$  (3),  $Zn^{2+}$  (4) и  $Cd^{2+}$  (5) от  $pH$  водной фазы**

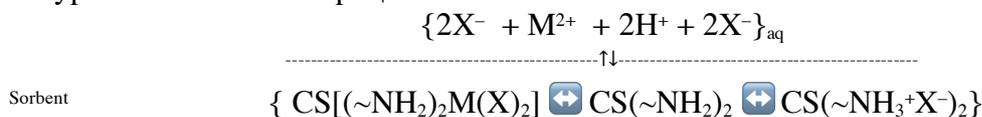
Конкурентную, эквивалентную, равновесную, сорбцию катионов металла ( $M^{2+}$ )/( $2Na^+$ ) на анионных центрах целлюлозного  $Cell(-COO^-)$  биополимера в гетерофазной системе «водный раствор кислот и солей – целлюлоза» можно отразить в виде схемы:



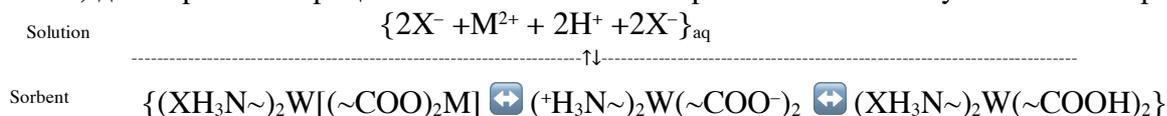
Схемы и уравнения протондесорбции катионов металла ( $M^{2+}$ )/( $2H^+$ ) в форме:



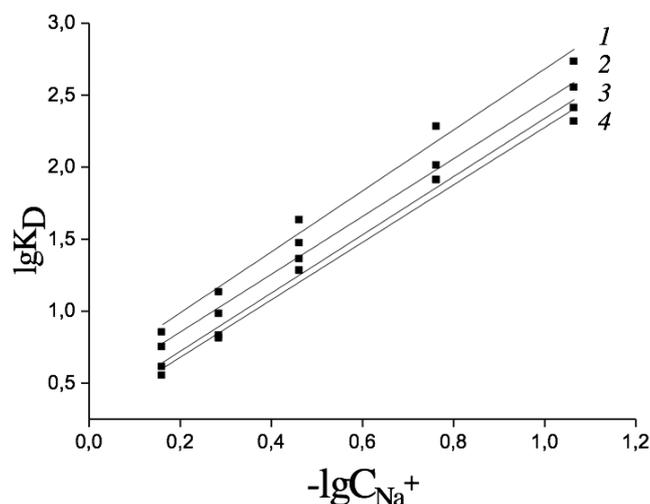
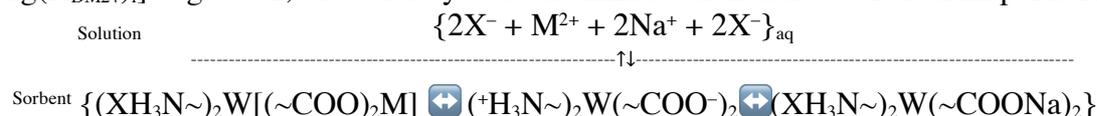
Согласованную сорбцию/протондесорбцию катионов металла на аминогруппах хитозана  $CS(\sim NH_2)$  в зависимости от кислотности водной фазы можно представить в виде конкурентной солевой сорбции:



Для кератина шерсти (изоэлектрическая точка  $pH_{i(Wool)} \approx 4$ ) с участием карбоксильных ( $pK_{a(-COOH)} \approx 4$ ) и аминогрупп ( $pK_{a(-NH_3^+)} \approx 10$ ) в области  $pH 4 \pm 2$  сорбция катионов металлов ( $M^{2+}$ ) снижается с увеличением кислотности водной фазы. В этой области кислотности (при  $pH < 7$ ) для кератина сорбция катионов металла и протона соответствует солевой сорбции.



В нейтральных средах наблюдается линейная зависимость коэффициента распределения ( $K_{DM^{2+}})_i$  индикаторного постоянного количества катионов металла ( $M^{2+}$ ) от концентрации ионов натрия ( $Na^+$ ) водной фазы в логарифмических координатах  $\log(Na^+) = f[\log(K_{DM^{2+}})_i]$  с  $tg\alpha = -2$ , что согласуется с ионным обменом в соответствии равновесием.



**Рисунок 3 – Зависимость распределения ионов  $Cu^{2+}$  (1),  $Ni^{2+}$  (2),  $Cd^{2+}$  (3) и  $Zn^{2+}$  (4) от концентрации ионов  $Na^+$  в координатах  $(\lg K_D) - (-\lg C_{Na^+})$**

Это позволяет отразить структуру катионов d-металла ( $M^{2+}$ ) в водной фазе в виде внутрисферного гидратного анионного комплекса, а на поверхности сорбента (кератин) в форме хелатного, электронейтрального, катионного комплекса d-металла ( $M^{2+}$ ) с участием карбоксильных групп в анионной форме и аминогрупп в солевой форме. Тогда весь механизм межфазного распределения катионов ( $M^{2+}$ ) при эквивалентном обмене ионов сводится при нейтральной pH к ионному обмену катионов ( $M^{2+}$ )/(2 $Na^+$ ), а в водно-кислотной среде при  $pH < 7$  - к обмену в форме протондесорбции ( $M^{2+}$ )/(2 $H^+$ ). Такой механизм межфазного распределения катионов ( $M^{2+}/2Na^+/2H^+$ ) можно отразить через их пересольватацию при переходе из объема водной фазы на поверхность биосорбента.

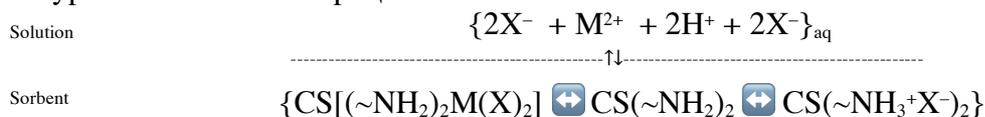
Конкурентный, эквивалентный, равновесный ионный обмен:



Конкурентный, эквивалентный, равновесный ионный обмен (протондесорбция):



Согласованную сорбцию / протондесорбцию катионов металлов на аминогруппах хитозана  $CS(\sim NH_2)$  в зависимости от кислотности водной фазы можно отразить в форме конкурентной солевой сорбции.



### Выводы

Исследованы кинетика и термодинамика сорбции и протондесорбции катионов d-металлов и установлены закономерности влияния различных параметров проведения процессов ( $C_{M^{2+}}$ ,  $C_{Na^+}$ , pH, температуры, времени контакта, количества и природы центров сорбции и др.). Установлено, что в основе межфазного распределения катионов в гетерофазных системах «водный раствор солей и кислот – биополимер» лежит хемосорбция. В процессе хемосорбции происходит образование катионных металлокомплексов на карбоксильных и аминогруппах биосорбента в результате конкурентного, эквивалентного, равновесного ионного обмена ( $M^{2+}/2Na^+$ ), протондесорбции ( $M^{2+}/2H^+$ ) и солевой сорбции  $M(X)_2/2HX$ .

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-03-00221.*

*Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ФГБОУ ВО ИГХТУ.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozlov V.A., Nikiforova T.E., Loginova V.A., Koifman O.I. Mechanism of protodesorption – exchange of heavy metal cations for protons in a heterophase system of  $H_2O-H_2SO_4-MSO_4$  – cellulose sorbent // Journal of Hazardous Materials. 2015. V. 299. P. 725.
2. Nikiforova T.E., Kozlov V.A. Regularities of the Effects of the Nature of Polysaccharide Materials on Distribution of Heavy Metal Ions in a Heterophase Biosorbent–Water Solution System // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2016, V. 52(3). P. 399.
3. Nikiforova T.E., Kozlov V.A. Various Factors Affecting Heavy Metal Ion Sorption From Aqueous Media By Sorbent Containing Cellulose // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2011. V. 47(1). P. 20.
4. Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Loginova V.A. Peculiarities of Heavy-Metal Ions Sorption Mechanism from Aqueous Media by Modified Cellulose // Adsorption Science & Technology. 2014. V. 32(5). P. 389.

УДК 677.021.16

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ШВЕЙНЫХ НИТЕЙ ДЛЯ  
НАМАТЫВАНИЯ НА БОБИНЫ  
RESEARCH OF DEFORMATION PROPERTIES OF SEWING THREADS FOR  
WINDING ON BOBBINS**

**Татьяна Львовна Платонова, Виталий Яковлевич Энтин,  
Валерия Владиславовна Васильева  
Tatyana L. Platonova, Vitaly Y. Entin, Valeria V. Vasilyeva**

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,  
Россия, Санкт-Петербург*

*St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Russia, St. Petersburg  
(e-mail: platonova0712@yandex.ru, entin@sutd.ru, vasilievavv@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрена задача регулирования натяжения нити при её вытягивании. Результаты проведенных исследований позволили оценить разрывную нагрузку и удлинение нити для дальнейшего проектирования системы вытягивания нитей.

*Abstract:* The task of regulating the tension of the thread when it is stretched. The results of the studies allowed us to estimate the breaking load and elongation of the thread for the further design of the system for pulling the threads.

*Ключевые слова:* нить, вытягивание, натяжение, линейная скорость, разрывное удлинение, автоматическое регулирование, подвижный ролик, разрывная сила, волокна, упругость.

*Keywords:* filament stretching, tension, line speed, elongation, automatic adjustment, the movable roller, the tensile force of the fiber elasticity.

Ниточный способ соединения деталей одежды и обуви является одним из основных. Качество и долговечность швов во многом обеспечивается прочностью швейных ниток. Широкое применение в швейной промышленности находят армированные нитки. По сравнению с другими типами ниток, армированные нитки отличаются крученым плетением. Сердечник такой нити обычно синтетический (полиэстер). Оплетка может быть выполнена из хлопка, полиэфира или сиблона, которые придают необходимую гладкость. Использование двух компонентов обеспечивает защиту от расплавления синтетического сердечника при глажке, стирке или других воздействиях высоких температур. Армированные швейные нитки обеспечивают высокую прочность соединения швейных деталей, а также минимальную усадку при влажно-тепловой обработке. Благодаря универсальности комплексные нитки с одинаковой эффективностью применяются в швейной, трикотажной, обувной и кожгалантерейной промышленности. В зависимости от состава готовые нитки имеют определенные условные обозначения. В работе используются полиэфирные армированные швейные нитки марки 45ЛЛ-бк. Данный тип ниток выполнен по новой технологии выработки армированной пряжи, путем введения в треугольник кручения двух комплексных нитей для достижения лучшего закрепления оплетки. Маркировка "ЛЛ" означает, что армированная нить сделана из лавсана. Сердечник нитки выполнен из полиэфирного волокна (лавсан) и оплетена полиэфирным штапельным волокном. Эта разновидность ниток обеспечивает высокую прочность соединения швейных деталей.

При пошиве нитки испытывают большие силовые и термические нагрузки, возникающие из-за высоких скоростей движения и совместного трения нити и иглы. В связи с этим к нити предъявляются высокие требования по прочности и термической стойкости. Кроме недостатка прочности на частоту обрывов оказывает существенное влияние и удлинение нити при вытягивании её швейной иглой. Известно, что при пошиве изделий невытянутой нитью частота обрывов существенно превосходит частоту обрывов при пошиве

этого же изделия, но уже вытянутой нитью [1]. Это обусловлено тем, что при использовании вытянутой нити в зону шитья поступает нить с натяжением и количеством, соответствующими заданным параметрам шва (длина стежка и др.). В случае же не вытянутой нити в зону шитья из-за вытягивания нити иглой поступает дополнительное (лишнее) количество нити. В результате этого резко падает натяжение нити, а следовательно, и силовая нагрузка на иглу. Последнее приводит к возникновению на игле не расчетных дополнительных ускорений. Это является причиной неравномерности движения иглы и появления дополнительных динамических нагрузок на нить, приводящих к дополнительным обрывам, пропуску стежков и снижению качества шва. При пропуске стежков ухудшается качество изделий, растет количество брака и уменьшается производительность швейного производства. Для решения этой проблемы в технологическую схему производства армированных швейных ниток и был добавлен процесс вытягивания, который позволяет существенно уменьшить величину разрывного удлинения при пошиве и количество обрывов. Так, для лавсановых ниток снижение разрывного удлинения достигается за счет вытягивания в процессе кручения и длина безобрывного шва увеличивается в 3-5 раз [2].

В процессе вытягивания волокна нити перестраиваются параллельно друг другу вдоль оси стержневой нити. Существующие межвитковые зазоры оплетки образуют пустоты, которые дают возможность элементарным волокнам при нагружении скользить вдоль оси. Следовательно, навивки оплетки, неплотно прилегающие друг к другу, имеют возможность при нагрузках сокращать расстояния между собой. Чтобы исключить подобные перемещения в процессе пошива, нитки подвергают вытягиванию в процессе производства. За счет повышения степени продольной ориентации макромолекул в волокне возрастает плотность и увеличивается длина нити. Максимальной вытяжке, когда все межвитковые пустоты будут ликвидированы, должно соответствовать максимальное удлинение  $\Delta L$  и растягивающая нагрузка  $P_{Hmax}$ . При дальнейшем увеличении нагрузки наступит предел вытягивания, который состоит в том, что нагрузка на нить увеличивается, но нить больше не удлиняется и происходит разрыв. Этот момент и фиксирует значение предельной нагрузки. Эти характеристики необходимы для работы разработанной системы вытягивания [3].

Ниже приводится схема системы для вытягивания нитей и результаты исследования с целью определения для полиэфирных ниток марки 45 ЛЛ-бк предельных удлинений и соответствующих им усилий.

Используемая схема системы регулирования, изображенная на рисунке 1, была описана ранее в статье [3]. В состав схемы вошли: 1 - прижимной ролик,  $f$  - сила прижатия нити к поверхности барабана; 2 - подающий барабан; 3,6 - электрические двигатели D1 и D2; 4 – нить; 5 – приемная бобина; 7 – суммирующее устройство; 8 – усилитель; 9,10 – измеритель преобразователь.

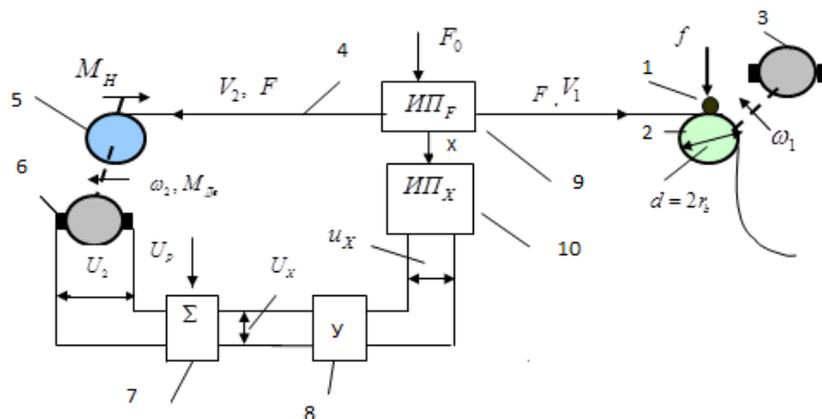


Рисунок 1 – Система для перемотки нити с целью вытягивания

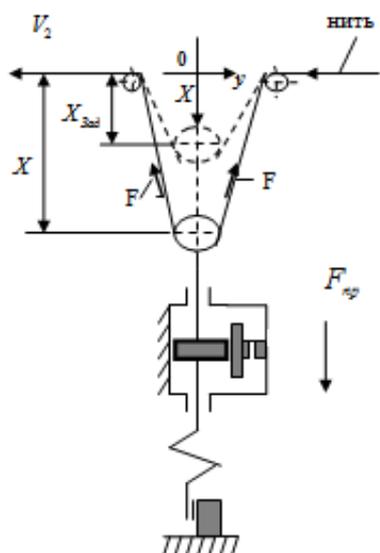
В представленной схеме, расстояние между точками схода нити с барабана 2 и приема ее на бобину 5 определяет длину зоны вытягивания и позволяет вытягивать нить за счет разности линейных скоростей нити

$$\Delta V = V_2 - V_1 = const, \quad (1)$$

где  $V_1 = \omega_1 r_b$  - линейная скорость нити, сходящей с подающего барабана,  $r_b$  - радиус барабана;  $V_2 = \omega_2(t)r(t)$  - линейная скорость нити, поступающей на приемную бобину;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  - угловые скорости вращения двигателей,  $\omega_1 = const$ .

При перематывании нити с целью вытягивания очень важно сохранять постоянным натяжение нити для всего технологического процесса. Однако в процессе вытягивания (при сохранении условия (1)) натяжение нити может существенно изменяться, причиной этого является линейная неоднородность нити, обусловленная погрешностями в технологиях её изготовления. В связи с этим в системе вытягивания должна быть предусмотрена операция регулирования натяжения нити в зоне вытягивания.

На рисунке 3 изображена схема движения подвижного ролика при регулировании натяжения в процессе перематки и вытягивания нити. Подвижный ролик является элементом измеряющим отклонение величины натяжения от заданного значения, которое устанавливается перед началом работы общей системы.



**Рисунок 2 – Схема движения подвижного ролика**

На рисунке 2 заданному и текущему значениям натяжений соответствуют положения ролика  $X_{зад}$  и  $X$ . Отклонению натяжения будет соответствовать разность

$$\Delta X = X_{зад} - X.$$

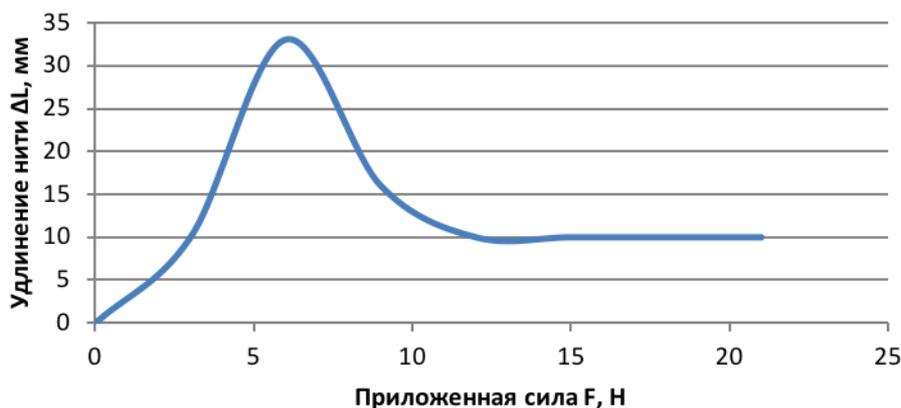
Изображенный на рисунке 2 механизм определения отклонений на рисунке 1 представлен блоком ИПФ. Видно, что величина  $\Delta X$  далее преобразуется в электрический сигнал  $U_x$  и после усиления подается на электродвигатель для коррекции угловой скорости вращения и линейной скорости приема нити.

Очевидно, что для работы системы перематки и вытягивания нити необходимо знать разрывную нагрузку  $P_{Hmax}$ . Это необходимо для установки измерительного ролика в положение  $X=X_{зад}$ , с целью установки в системе требуемого натяжения  $P_{xзад}$ . Для разных типов швейных ниток эти усилия различны и в настоящее время неизвестны.

В данном материале рассматриваются нитки марки 45 ЛЛ-bk. Ниже приводятся результаты статистических исследований с целью определения максимальных значений  $P_{Hmax}$ .

Инструментом для выполнения исследований являлся измерительный комплекс Инстрон 1122. От имеющейся катушки ниток исследованию подвергались отрезки нити, длиной 50 см (в соответствии с ГОСТ 6611.1-73). Поочередно образцы подвергались испытанию. Диаграммы растяжения фиксировались самописцем прибора как зависимости  $P = f(L)$ . Для сравнения полученных данных с кривых снимались точки значений приложенной силы  $F$  и соответствующие им значениям удлинения нити  $L$ .

По результатам исследований на рисунке 3 представлен график зависимости удлинения нити при нагружении. Данные графика отражают усредненные значения удлинения нити, полученные в результате обработки всех кривых.



**Рисунок 3 – Зависимость удлинения нити при нагружении**

Ранее говорилось, что при осевом сокращении межвитковых расстояний увеличивалось удлинение нити. Причем эти удлинения до разрыва происходят неравномерно. Из графика видно, что на начальном этапе нагружения нити происходят достаточно большие удлинения. Затем, по мере дальнейшего нагружения с тем же шагом, удлинение нити уменьшается. Это свидетельствует тому, что возможность вытяжки нити становится меньше. При дальнейшем пошаговом росте нагрузки от 10 Н до 20 Н удлинение практически не изменялось. Нить держит приложенную к ней силу за счет своих прочностных свойств. Когда заканчиваются резервы нити, увеличение нагрузки не приводит к удлинению нити, это является пределом в удлинении и предвестником предстоящего обрыва. Для исследуемых армированных швейных ниток марки 45 ЛЛ-bk разрывное удлинение нити равно 19 %, а разрывное усилие 21 Н.

#### **Выводы**

В результате исследований швейной нити марки 45 ЛЛ-bk определены установочные параметры для разрабатываемой системы вытягивания швейных ниток [3]:

- Разрывная нагрузка  $P = 21$  Ньютонов;
- Разрывное удлинение  $\Delta L = 19$  %.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Чельшев С.В. Разработка и исследование механизма вытягивания армированных швейных ниток. Дис. ...канд. техн. наук. Спб.: СПбГУТД, 2011, 120 с.
2. Федоровская В.С., Филатов Н.С. Влияние разрывного удлинения на свойства ниток. Р.С. Швейная промышленность, 1975, № 3, с.16-21.
3. Энтин В.Я., Васильева Е.К., Платонова Т.Л. Исследование процессов регулирования в задаче перематки неоднородной нити с целью ее вытягивания. Спб.//Известия Вуз. Технология легкой промышленности, 2016 №3 т.33, стр.21-26.

УДК 536.423.1

**ТЕМПЕРАТУРА МАКСИМАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТЕКАНИЯ  
ПРОЦЕССА КАПЕЛЬНОГО КИПЕНИЯ ЖИДКОСТИ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ  
THE MAXIMUM EFFICIENCY TEMPERATURE OF THE PROCESS OF DROP  
BOILING LIQUID IN REAL CONDITIONS**

**Пётр Сергеевич Васильев, Леонид Саввич Рева, Александр Борисович Голованчиков  
Pyotr S. Vasilyev, Leonid S. Reva, Alexander B. Golovanchikov**

*Волгоградский государственный технический университет, Россия, Волгоград  
Volgograd State Technical University  
(e-mail: nestorvv@mail.ru, leonidreva46@mail.ru, pahp@vstu.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрены особенности физической картины процесса капельного кипения, приведено уравнение для расчёта температуры максимальной эффективности протекания процесса.

*Abstract:* Features of the physical picture of the process of drip boiling were researched, equation for calculating the temperature of the maximum efficiency of the process were shown.

*Ключевые слова:* капельное кипение, сфероидальное состояние, влияющие факторы.

*Keywords:* drop boiling, spheroid state, influencing factors.

Кипение широко распространено в различных технологических процессах химической промышленности. Основное преимущество его использования состоит в возможности отводить от теплоотдающих поверхностей большие тепловые потоки, не повышая существенно её температуру и обеспечивая тем самым высокую энергонапряжённость технологического оборудования. Интенсивность кипения определяет эффективность работы промышленного оборудования, его габариты и металлоёмкость.

Одним из инновационных методов повышения интенсивности кипения является переход от кипения жидкости в объёме, ограниченном стенками сосуда, или испарения при плёночном течении жидкости к испарению в режиме кипения жидкости, периодически подаваемой на теплоотдающую поверхность в виде капель, – *капельному кипению* [1].

Анализ литературных источников [2-5] показывает, что капельное кипение не сопровождается крайне нежелательными технологическими последствиями, характерными для кипения жидкости в объёме, ограниченном стенками сосуда, такими как резкое падение коэффициентов теплоотдачи, перегрев теплоотдающих поверхностей, паровой взрыв. Кроме того, для капельного кипения практически полностью отсутствует тепловая инерционность процесса, т. к. при прекращении подачи капель испаряемой жидкости в технологический аппарат из-за очень небольшого времени их испарения процесс кипения останавливается почти мгновенно.

Собственный опыт экспериментальных исследований [1] показал, что для капельного кипения воды при атмосферном давлении рабочий диапазон температурного напора лежит в пределах  $\Delta t = 20 \div 160$  °С против  $\Delta t = 5 \div 30$  °С для кипения воды в объёме, ограниченном стенками сосуда, при этом максимальные значения коэффициентов теплоотдачи и удельного теплового потока при капельном кипении жидкости практически на порядок превышают максимальные значения при кипении жидкости в объёме: при температурном напоре  $\Delta t = 100 \div 120$  °С соответственно  $\alpha = 90 \div 100$  кВт/(м<sup>2</sup>·°С) и  $q = 10 \div 12$  МВт/м<sup>2</sup>. Это обстоятельство объясняется тем, что в малом объёме капли, в связи с отсутствием ограничивающих её стенок, плёночный режим кипения не развивается во всём диапазоне температурного напора вплоть до значений, соответствующих переходу капли в сфероидальное состояние.

В таблице 1 приведены максимальные практические значения основных режимных параметров различных видов процесса кипения (испарения) воды.

**Таблица 1 – Максимальные практические значения основных режимных параметров различных видов процесса кипения (испарения) воды**

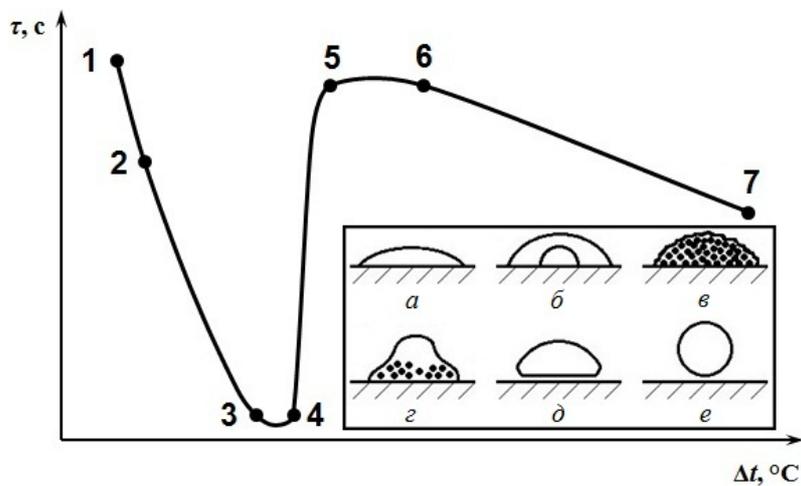
Вид кипения (испарения)	Коэффициент теплоотдачи	Удельный тепловой поток	Температурный напор
	$\alpha$	$q$	$\Delta t$
	кВт/(м <sup>2</sup> ·°С)	МВт/м <sup>2</sup>	°С
Кипение в объёме [6]	12 ÷ 13	0,7 ÷ 0,8	20 ÷ 30
Плёночное испарение [6]	6 ÷ 8	0,12 ÷ 0,14	10 ÷ 20
Капельное кипение [1]	90 ÷ 100	10 ÷ 12	120 ÷ 160

Физическая картина капельного кипения на принципиальном уровне впервые была описана в работе [7] (рисунок 1).

При температуре теплоотдающей поверхности ниже температуры кипения испаряемой жидкости капля приобретает на поверхности форму плосковыпуклой линзы и удерживает её на протяжении всего процесса испарения, который идёт с поверхности линзы (рисунок 1, а).

При незначительном превышении температуры поверхности над температурой кипения жидкости внутри плосковыпуклой линзы образуется преимущественно один большой паровой пузырь, а сам процесс испарения идёт также с поверхности линзы (рисунок 1, б). Причём с увеличением температуры поверхности внутри плосковыпуклой линзы в центрах парообразования всё чаще образуется большее количество всё более мелких паровых пузырьков.

При значительном превышении температуры поверхности над температурой кипения жидкости частота возникновения небольших паровых пузырьков достигает своего максимума, и они полностью заполняют собой весь объём жидкости внутри плосковыпуклой линзы, частично сливаясь друг с другом и активно прорываясь через её поверхность (рисунок 1, в).



**Рисунок 1 – Принципиальная физическая картина капельного кипения, совмещённая с зависимостью времени испарения от температурного напора  $\tau=f(\Delta t)$  по данным [7]:**

1÷2 – а; 2÷3 – б; 3÷4 – в; 4÷5 – г-д-е; 5÷6 – г-д-е; 6÷7 – е

С дальнейшим увеличением температуры теплоотдающей поверхности небольшие пузырьки пара скапливаются в основном только вблизи центров парообразования, при этом верхняя часть капли, не содержащая паровой фазы, деформируется (рисунок 1, г), и через короткое время капля перестаёт контактировать с поверхностью (рисунок 1, д) и трансформируется в сфероид (рисунок 1, е). Необходимо отметить, что диапазоны 4÷5 и 5÷6 соответствуют неустойчивой области перехода жидкости в сфероидальное состояние, в связи с чем описанные трансформации капли могут проявляться по-разному.

Таким образом, наибольшая эффективность капельного кипения соответствует диапазону  $3 \div 4$  (рисунок 1, в), при котором время протекания процесса принимает свои минимальные значения, а коэффициенты теплоотдачи – максимальные, и достигает своего максимума в точке 4, соответствующей температуре начала перехода капли в сфероидальное состояние.

Исследованию перехода капель жидкости в сфероидальное состояние посвящены многие работы, например [8-11]. В [11] отмечается, что температура, при которой такой переход становится физически возможным, зависит от материала теплоотдающей поверхности и вида её технологической обработки или, иначе говоря, степени её смачивания испаряемой жидкостью.

Проведённые авторами настоящей работы экспериментальные исследования позволили предложить критериальное уравнение для определения температуры начала перехода капли в сфероидальное состояние  $t_{cm,L}$  в зависимости от следующих влияющих факторов, воздействующих на процесс в реальных условиях: теплофизических свойств жидкости, размера капли  $d_k$ , начальной температуры жидкости в капле  $t_n$ , скорости нестационарного падения капли в момент её соударения с теплоотдающей поверхностью  $w$ , состояния поверхности, определяемого её шероховатостью, и её адгезионных свойств [1]:

$$\frac{1}{Ra} \cdot \left( \frac{t_{kun} - t_n}{t_{cm,L} - t_{kun}} \right) = 9,671 \cdot 10^{13} \cdot Oh^{6,100} \cdot Re^{0,317} \cdot \left( \frac{S_m}{R_a} \right)^{-1,165} \cdot \left( \frac{W_a}{W_k} \right)^{-2,198} \quad (1)$$

или

$$t_{cm,L} = \frac{t_{kun} - t_n}{9,671 \cdot 10^{13} \cdot Ra \cdot Oh^{6,100} \cdot Re^{0,317} \cdot \left( \frac{S_m}{R_a} \right)^{-1,165} \cdot \left( \frac{W_a}{W_k} \right)^{-2,198}} + t_{kun} \quad (1, a)$$

где

$$Ra = \frac{g \cdot d_k^3 \cdot \rho^2 \cdot c_p}{\mu \cdot \lambda} \cdot \beta \cdot \Delta t \quad \text{– число подобия Рэлея};$$

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\sigma \cdot \rho \cdot d_k}} \quad \text{– число подобия Онезорге};$$

$$Re = \frac{w \cdot d_k \cdot \rho}{\mu} \quad \text{– число подобия Рейнольдса};$$

$$W_a = \sigma \cdot (1 + \cos \theta) \quad \text{– работа адгезии};$$

$$W_k = 2 \cdot \sigma \quad \text{– работа когезии};$$

$\theta$  – краевой угол смачивания теплообменной поверхности при натекании жидкости, град.;  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля теплоотдающей поверхности, мкм;  $S_m$  – средний шаг неровностей профиля теплоотдающей поверхности по средней линии, мкм; теплофизические свойства жидкости, взятые при температуре её кипения  $t_{kun}$ :  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с;  $\beta$  – коэффициент объёмного расширения, °C<sup>-1</sup>;  $c_p$  – удельная массовая теплоёмкость, Дж/(кг·°C);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Дж/м<sup>2</sup>.

Уравнение (1) получено по экспериментальным данным кипения капель воды на различных металлических теплоотдающих поверхностях, средняя относительная ошибка не превышает 6 %. В работе [1] авторами показано, что уравнение (1) хорошо описывает экспериментальные данные других авторов [3, 8, 9] для капельного кипения воды на металлических теплоотдающих поверхностях с расхождением, не превышающим 5÷20 %.

Однако в реальных условиях проведения химико-технологических процессов часто в качестве испаряемых сред используют различные углеводороды, которые в отличие от воды и

водных растворов практически полностью растекаются на металлических теплоотдающих поверхностях технологических аппаратов, т. е. для которых  $\theta \approx 0$  град.

В связи с этим, в таблицах 2 и 3 представлено сравнение по температуре начала перехода капель различных углеводородов в сфероидальное состояние на металлических поверхностях экспериментальных данных других авторов с расчётными по уравнению (1). Необходимо отметить, что в случае отсутствия в литературе значений параметров шероховатости теплоотдающих поверхностей при расчёте по уравнению (1) их значения подбирались наилучшим образом с наименьшим отклонением опытных данных от расчётных.

**Таблица 2 – Сравнение экспериментальных значений температуры начала перехода капель различных углеводородов в сфероидальное состояние с расчётными по уравнению (1) данными:  $t_n=20$  °C**

Испаряемая жидкость	Параметры шероховатости теплоотдающей поверхности		Диаметр капли $d_k$	Скорость падения капли в момент её соударения с теплоотдающей поверхностью $w$	Опытные значения температуры начала перехода капли в сфероидальное состояние $t_{cm,L}^*$	Расчётные значения температуры начала перехода капли в сфероидальное состояние $t_{cm,L}$	Литература
	$R_a$	$S_m$					
-	МКМ	МКМ	ММ	М/С	°С	°С	-
<i>n</i> -гептан	0,374	540	2,92	2,671	180,1	177,7	[3]
<i>n</i> -цетан	0,374	540	3,06	0,441	389,9	397,1	
<i>n</i> -гептан	0,160	70	0,068	0,085	175,7	177,2	[4]
	0,160	130	0,314	0,551	166,4	167,9	
<i>n</i> -цетан	0,160	12	0,094	0,151	311,4	319,6	
	0,160	12	0,381	0,582	300,0	309,7	
<i>n</i> -гептан	0,040	60	2,20	0,440	177,5	178,1	[7]
	1,320	1000	2,20	0,440	150,0	151,9	
	4,000	3500	2,20	0,440	155,0	156,6	
<i>n</i> -гептан	0,250	400	4,0	0,198	83,3	83,7	[9]
гексан	0,250	400	4,0	0,198	100,0	108,7	

**Таблица 3 – Сравнение экспериментальных значений температуры начала перехода капель бензола в сфероидальное состояние с расчётными по уравнению (1) данными:  $d_k=2,22$  мм;  $t_n=20$  °C;  $w=0,441$  м/с;  $R_a=0,500$  мкм;  $S_m=428$  мкм [13]**

Давление в испарительной системе $p$	Диапазон температур теплоотдающей поверхности, соответствующий началу перехода капли в сфероидальное состояние $t_{cm,L}^*$	Расчётные значения температуры начала перехода капли в сфероидальное состояние $t_{cm,L}$
МПа	°С	°С
0,1	146,0 ÷ 231,2	143,4
0,5	230,0 ÷ 291,3	292,8
1	254,5 ÷ 324,4	329,4
2	289,7 ÷ 356,4	331,0
5	304,4 ÷ 385,6	289,0

Из таблиц 2 и 3 видно, что уравнение (1) также хорошо описывает экспериментальные данные других авторов [3, 4, 7, 9, 13] для кипения капель различных углеводородов, растекающихся на металлических теплоотдающих поверхностях.

### **Выводы**

Таким образом, полученное в работе критериальное уравнение (1) позволяет надёжно определить температуру максимальной эффективности протекания процесса капельного кипения любых жидкостей на металлических теплоотдающих поверхностях технологических аппаратов в зависимости от основных влияющих факторов, воздействующих на процесс в реальных условиях. В связи с этим, уравнение (1) может быть рекомендовано для выполнения инженерных расчётов аппаратов, работающих по технологии капельного кипения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Васильев П.С., Рева Л.С., Рева С.Л., Голованчиков А.Б.* Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении капли жидкости на поверхности нагрева // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 22. С. 28-33.
2. *Стырикович М.А., Ламден Д.И., Костановская М.Е.* О пространственно-временной структуре теплового взаимодействия при кратковременном контакте капли жидкости с сильно перегретой поверхностью // ТВТ. 1986. Т. 24. № 4. С 753-761.
3. *Chandra S., Avedisian C.T.* The evaporation and combustion of levitated arrays of two, three and five droplets at a hot surface // Proc. R. Soc. Lond. A. 1988. Vol. 418. P. 365-382.
4. *Xiong T.Y., Yuen M.C.* Evaporation of a liquid droplet on a hot plate // Int. J. Heat Mass Transf. 1991. Vol. 34. № 7. P. 1881-1894.
5. *Kim S., Kim H.D., Kim H., Ahn H.S., Jo H., Kim J., Kim M.H.* Effects of nano-fluid and surfaces with nano structure on the increase of CHF // Exp. Therm. Fluid Sci. 2010. Vol. 34. P. 487-495.
6. Теория тепломассообмена / под. ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа. 1979. 495 с.
7. *Mizomoto M., Hayano H., Ikai S.* Evaporation and ignition of a fuel droplet on a hot surface // JSME. 1978. Vol. 21. № 162. P. 1765-1771.
8. *Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е.* Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука. 1984. 302 с.
9. *Скрипов В.П., Виноградов А.В., Скоков В.Н., Решетников А.В.* Капля на горячей плите: появление 1/f-шума при переходе к сфероидальной форме // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 6. С. 21-23.
10. *Mura E., Massoli P., Josset C., Loubar K., Bellettre J.* Study of the micro-explosion temperature of water in oil emulsion droplets during the Leidenfrost effect // Exp. Therm. Fluid Sci. 2012. Vol. 43. P. 63-70.
11. *Kim H., Truong B., Buongiorno J., Hu L.-W.* Effects of micro/nano-scale surface characteristics on Leidenfrost Point temperature of water // J. Therm. Sci. Tech. 2012. Vol. 7. № 3. P. 453-462.
13. *Hiroyasu H., Kadota T., Senda T.* Droplet evaporation on a hot surface in pressurized and heated ambient gas // JSME. 1974. Vol. 17. № 110. P. 1081-1087.

УДК 536.24

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ОРЕБРЕННОГО РЕКУПЕРАТОРА  
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYDRAULIC RESISTANCE OF FINNED HEAT  
EXCHANGER**

**Елена Васильевна Романова, Александр Николаевич Колиух  
Elena V. Romanova, Alexandr N. Koliukh**

*Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов  
The Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
(e-mail: kvidep@cen.tstu.ru)*

*Аннотация:* Предложено конструктивное решение теплообменного аппарата для рекуперации тепла, представляющего собой теплообменник типа «труба в трубе» с оребрением. Проведено исследование адекватности расчета гидравлического сопротивления оребренного рекуператора с использованием программного комплекса ANSYS (модуль FLUENT) в сравнении с экспериментальными данными; сделан вывод о возможности применения программного данного комплекса для моделирования.

*Abstract:* A constructive solution of the heat exchanger for heat recovery, which is a finning pipe-in-pipe heat exchanger is proposed. The adequacy of calculating the hydraulic resistance of a finned heat exchanger using the ANSYS software package (FluentFlow module) in comparison with the experimental data was studied. The comparison with the experimental data enables to conclude that the ANSYS software package is suitable for modeling.

*Ключевые слова:* оребренный рекуператор; гидравлическое сопротивление; газодинамическое моделирование.

*Key words:* finned heat exchanger; hydraulic resistance, gas-dynamic simulation.

Важнейшим направлением энергосберегающей политики является расширение масштабов использования вторичных тепловых энергоресурсов, которые образуются в различных технологических процессах, жилищно-коммунальном хозяйстве и др. Для этого необходимы исследования, реализация новых способов утилизации тепла, а также разработка нового или усовершенствование уже имеющегося теплообменного оборудования. Одним из методов утилизации вторичных тепловых энергетических ресурсов является рекуперация, при которой отходящие газы и подогреваемый воздух разделяются теплообменными поверхностями. Однако в газовых теплообменниках наблюдается низкий теплообмен, и интенсификация теплообмена в таких аппаратах является актуальной задачей.

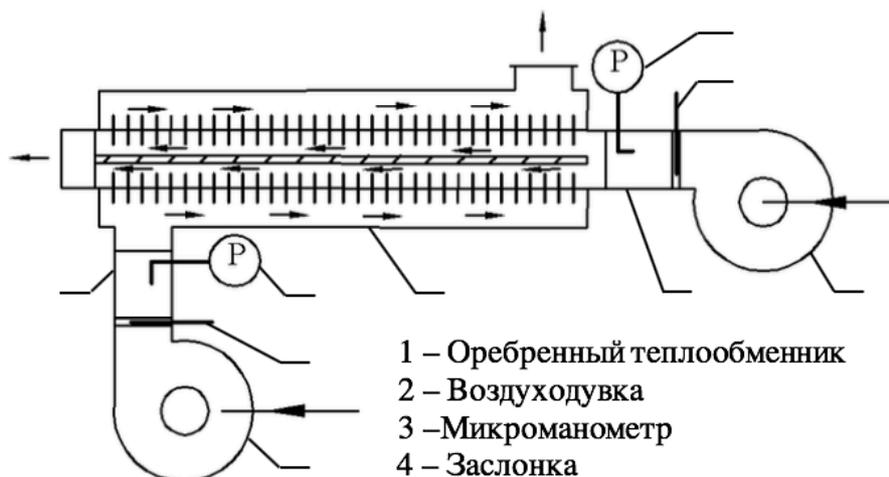
Методы интенсификации можно разделить на пассивные, активные и комбинированные [1-3]. Пассивные методы не требуют применения дополнительной энергии. К этим методам относятся: использование разных турбулизирующих вставок, завихрителей, шероховатых поверхностей теплообмена; применение оребренных и других развитых поверхностей теплообмена со стороны теплоносителя с низким коэффициентом теплоотдачи.

В настоящее время применяются теплообменники с ребрами самой разнообразной конфигурации, изготавливаемые по различной технологии [4 - 6]. Наиболее распространенные из них: продольное оребрение, выполненное прокаткой или сваркой; поперечное, состоящее из ребристых элементов и дальнейшее их соединение сваркой или пайкой; поперечно-винтовое, выполненное прокаткой или навивкой ленты с различными методами ее крепления на трубе, а также шипы различного профиля для оребрения труб в установках кондиционирования воздуха и калориферах и др.

В результате анализа литературных источников, учитывая требования предъявляемые к оребренным поверхностям [7], предложено конструктивное решение теплообменного

аппарата для рекуперации тепла. Рекуператор представляет собой теплообменник типа "труба в трубе". С целью повышения интенсивности теплопередачи между холодным воздухом, поступающими в межтрубное пространство, и горячим воздухом, проходящим по внутренней трубе, внутренняя труба выполнена из меди с ребрами, в виде штырей, расположенными в шахматном порядке.

Одной из важнейших характеристик теплообменника является его гидравлическое сопротивление. Для сравнения и анализа гидравлического сопротивления оребренного теплообменника с «обычным» теплообменником «труба в трубе» была создана экспериментальная установка, позволяющая получать гидравлические сопротивления трубного и межтрубного пространства при различных расходах воздуха. Экспериментальная установка показана на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки**

Воздуходувкой 2 воздух при комнатной температуре (21-23 °С) подавался в оребренный теплообменник 1, в котором для стабилизации возможных пульсаций давления предусматривался участок стабилизации потока 5. На входе в трубное и межтрубное пространство теплообменника производилось измерение статического давления с помощью микроманометра 3. Регулирование расхода подаваемого в теплообменник воздуха производилось с помощью заслонки 4. Значения, полученные в результате экспериментов, представлены в таблице 1.

Далее было проведено моделирование процесса течения воздуха в теплообменнике в модуле FLUENT пакета ANSYS v17.0, хорошо зарекомендовавшего себя в моделировании процессов течения и теплообмена [8 – 11]. В результате расчета в пакете ANSYS были получены данные по гидравлическому сопротивлению трубного и межтрубного пространств. Результаты сравнения эксперимента и расчета приведены в таблице 1.

### **Выводы**

Проведенное исследование позволило подтвердить адекватность полученных данных при моделировании в процесса течения воздуха в оребренном теплообменнике в пакете ANSYS. Видно, что в результате моделирования максимальное отклонение от экспериментальных данных составляет не более 15 %. Таким образом можно сделать вывод, что пакет ANSYS позволяет получать надежные данные о распределении скоростей и давлений воздуха в рекуператоре. Выполненные исследования позволят обосновать технологические параметры процесса рекуперации тепла.

**Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные значения гидравлических сопротивлений**

Средняя скорость воздуха во входных сечениях, м/с	0,05	0,5	1	1,5	2	5	10	15	20
Трубное пространство (эксперимент), ДР Па	0,5	16	40,5	98,5	163,7	753,3	1872,1	3450	5600
Трубное пространство (расчет), ДР Па	0,5	18,2	42	102,7	148,7	671	2120	3730	5920
Отклонение от эксперимента, %	0	13,8	3,7	4,3	9,1	10,9	13,2	8,1	5,7
Межтрубное пространство (эксперимент), ДР Па	0,2	1	2,1	3,4	5,1	42,1	148,6	393,3	696,1
Межтрубное пространство (расчет), ДР Па	0,18	0,86	1,8	2,9	4,5	40,2	158	370,1	725,5
Отклонение от эксперимента, %	10	14	14,3	14,7	11,7	4,5	6,3	5,9	4,2

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теплообменникам: В 2 х т. Т.1 / Пер. с англ. под ред. О.Г.Мартыненко и др. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 352 с.
2. Попов, И.А. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор)/И.А. Попов, Ю.Ф. Гортышов, В.В. Олимпиев//Теплоэнергетика, 2012, №1, с. 3-14
3. Bejan A. Heat transfer handbook/ A. Bejan, A. D. Kraus – Hoboken, N. J.: Jonh Wiley & Sons, Inc. – 2003. – 1427 p.
4. Керн, Д. Развитые поверхности теплообмена./ Д. Керн, А. Краус - М.: Энергия, 1977.- 464 с
5. Ройзен, Л.И. Тепловой расчет ребренных поверхностей./ Л.И. Ройзен, И.Н. Дулькин - Под редакцией В.Б. Фастовского. М.: Энергия, 1977. - 256 с.
6. Бажан, П.И. Справочник по теплообменным аппаратам./ П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов – М.: Машиностроение, 1989. – 365 с.
7. Тепломассообмен [Электронный ресурс]: курс лекций /М. С. Лобасова, К. А. Финников, Т. А. Миловидова и др. – Электрон. дан. (4 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 1 электрон. опт. диск (DVD).
8. Bholá Mayank. Heat Transfer Enhancement in Concentric Tube Heat Exchanger in ANSYS FLUENT 14.5 [Электронный ресурс] / Mayank Bholá, Mr. Vinod Kumar, Dr. Satyendra Singh // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – Vol. 2, Issue 3. – March 2015. – Режим доступа : [http://ijiset.com/vol2/v2s3/IJSET\\_V2\\_I3\\_59.pdf](http://ijiset.com/vol2/v2s3/IJSET_V2_I3_59.pdf) .
9. Ахмедзянов, Д. А. К вопросу об адекватности трехмерного газодинамического моделирования ГТД в современных программных комплексах / Д. А. Ахмедзянов, А. Е. Кишалов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 11 – 20.
10. Щербаков, М. А. Определение коэффициентов теплоотдачи при моделировании задач в ANSYS CFX / М. А. Щербаков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7. – С. 165 – 169.
11. Голованчиков, А. Б. Моделирование процесса нагревания воздуха конденсирующимся паром в двухтрубном теплообменнике / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Дулькина // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 255 – 263.

УДК 66.047.75

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСРЕДНИТЕЛЯ  
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ  
IMPROVING THE DESIGN EQUALIZATION OF MULTI-COMPONENT MIXTURES OF  
GRANULAR MATERIALS**

**Вячеслав Яковлевич Борщев, Татьяна Александровна Сухорукова  
Vyacheslav Yakovlevich Borshchev, Tatyana Aleksandrovna Sukhorukova**

*Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов  
Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
(e-mail: borschov@yandex.ru; t.suhorukova2015@yandex.ru)*

*Аннотация:* Приведен обзор конструкций аппаратов для усреднения сыпучих сред. Намечены пути развития усреднительного оборудования. Наиболее перспективными являются способы и конструкции, обеспечивающие турбулизацию и циркуляцию потоков смешиваемых сыпучих материалов в корпусе усреднителя. Разработана конструкция усреднителя, состоящая из каскада пересыпных воронок и установленных между ними разрыхлителей.

*Abstract:* A review of the design of devices for averaging bulk media is given. The ways of development and blending equipment. The most promising are the methods and designs that provide turbulence and circulation of flows of mixed bulk materials in the housing of the averager. The developed design approach consisting of the cascade peresypnymi funnels and installed them between the baking powder.

*Ключевые слова:* сыпучий материал, усреднение, усреднители.

*Key words:* bulk material, averaging, averaging agents.

В различных отраслях промышленности, в частности в пищевой, химической, в сельскохозяйственных производствах и других отраслях, широко применяется процесс усреднения сыпучих сред

Типовые конструкции смесителей периодического действия (барабанные, центробежные, ленточные и т. п.), как правило, имеют низкую экономическую эффективность, а также достаточно сложны в изготовлении и эксплуатации. Вследствие этого применять их в качестве усреднителей сыпучих материалов не всегда представляется целесообразным.

В отечественной и зарубежной практике приготовление больших объемов смеси сыпучих материалов часто реализуется в смесителях, рабочими органами которых являются бункеры и транспортирующие устройства [1]. Такие конструкции применяют для усреднения готовых партий сыпучих материалов, которые отличаются друг от друга составом. Однако вследствие низкой эффективности данных конструкций до настоящего времени весьма актуальной является разработка эффективных усреднителей сыпучих материалов, обеспечивающих получение смеси высокого и стабильного качества конечного продукта.

Целью настоящей работы является анализ известных конструкций усреднителей, возможности их эффективного использования для усреднения партий сыпучих материалов в химической и смежных отраслях промышленности, а также разработка высокоэффективного усреднителя.

Конструкции непрерывнодействующих усреднителей также как и непрерывнодействующие смесители в зависимости от характера движения в них сыпучего материала условно делят на три группы: 1) усреднители с практически с поршневым движением материала вдоль оси, т.е. без продольного перемешивания частиц; 2) усреднители, характеризующиеся продольным перемешиванием частиц сыпучего материала; 3) усреднители с хаотичным перемещением частиц по внутреннему объему устройства.

Типичным представителем усреднителей с поршневым продольным движением материала является пересыпной усреднитель [1]. Заданное качество смеси материала в этом усреднителе может быть получено только за счет многократного прохождения материала через коническую часть бункера, в которой имеет место продольное перемешивание частиц. Вследствие этого эффективность пересыпных усреднителей в значительной степени зависит от кратности циркуляции материала внутри их корпуса. Из-за низкой интенсивности процесса усреднения в пересыпном бункере необходимое качество смеси в них можно обеспечить только за счет большой кратности циркуляции материала.

Интенсифицировать процесс смешивания можно в циркуляционных усреднителях, отличающихся от бункерных наличием различных дополнительных перемешивающих элементов. Дополнительный вращающийся рабочий орган в циркуляционных усреднителях кроме циркуляции по замкнутому контуру создает также дополнительное продольное движение сыпучего материала.

Как в смесительной, так и в усреднительной технике широко применяются устройства с планетарно-шнековой мешалкой. В этих конструкциях вращающийся шнек транспортирует материал из нижней части смесителя на поверхность, а при планетарном вращении шнек перемещает материал вдоль стенки корпуса, обеспечивая тем самым конвективное смешивание частиц и необходимое сдвиговое воздействие. За счет этого достигается быстрое и интенсивное перемешивание частиц материала, а также достаточно высокая однородность смешивания.

Основным недостатком планетарно-шнековых смесителей является образование застойных зон у стенок корпуса аппарата, а также достаточно низкая эффективность горизонтального перемещения частиц материала в корпусе.

Широко применяемые в производстве гранулированных полимерных материалов конструкции усреднителей с псевдооживленным слоем материала характеризуются низкой эффективностью при приготовлении больших объемов смеси, а также истиранием частиц и, как следствие, значительным пылеуносом.

Достаточно простой конструкцией и универсальностью характеризуются барабанные смесители непрерывного действия [2]. Однако процесс усреднения материалов в барабанных усреднителях достаточно продолжительный. Вследствие этого в процессе усреднения сыпучих материалов может наблюдаться как повышенное истирание частиц, так и их дополнительное измельчение.

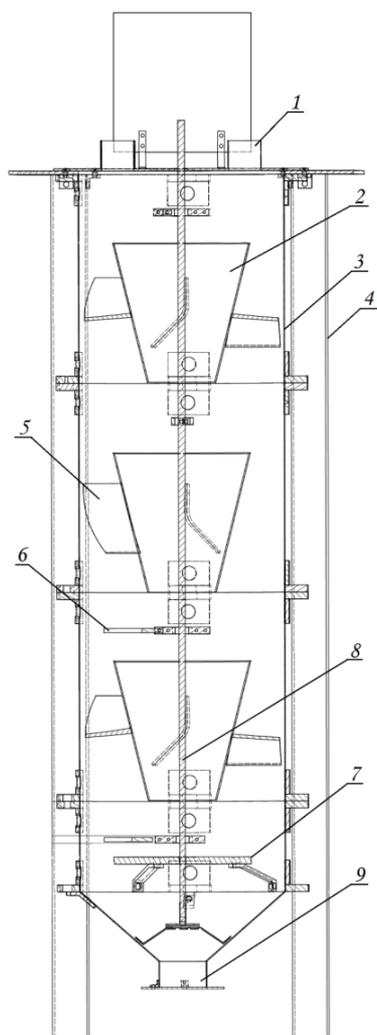
В различных отраслях промышленности, в частности в горной, широкое применение имеют различные конструкции гравитационных усреднителей [3]. Для этих устройств характерна достаточно сильная сегрегация сыпучего материала, вызывающая разделение крупных и мелких кусков руды и, как следствие, снижающая качество усреднения.

Выполненный авторами работы анализ свидетельствует, что современные конструкции промышленных усреднителей в большинстве случаев характеризуются значительной металло- и энергоемкостью, а также невозможностью получения стабильного состава и высокого качества смеси. Кроме того, существенным недостатком существующих конструкций усреднителей является их малая эксплуатационная надежность. Перспективные конструкции усреднителей, на наш взгляд, должны обеспечивать интенсивную турбулизацию и циркуляцию потоков смешиваемых партий материала.

Авторы работ [1, 4, 5] отмечают, что высокоэффективная конструкция усреднителей должна соответствовать следующим требованиям: обеспечивать стабильную подачу исходных партий материалов в установку, высокое качество и интенсивность процесса усреднения; предотвращать образование конгломератов из частиц материала или обеспечивать их эффективное разрушение. С учетом этих требований нами разработана установка для усреднения партий сыпучих материалов [6].

Установка (рисунок 1) состоит из цилиндрического корпуса 3 с коническим днищем, внутри которого осесимметрично корпусу каскадом закреплены с зазором относительно друг

друга пересыпные воронки 2 и тарель 7. Пересыпные воронки 2 имеют вид усеченных конусов. Они устанавливаются осесимметрично в корпусе усреднителя с помощью кронштейнов 5 узким основанием вниз. Разрыхлители изготовлены в виде лопастей 6, закрепленных на вертикальном валу 8, установленном осесимметрично воронкам. Под действием разрыхлителей угол откоса насыпок материала под воронками уменьшается и, в результате, организуются параллельные разрыхленные потоки материала вдоль корпуса усреднителя в пространстве между воронками и корпусом.



**Рисунок 1 – Усреднитель сыпучих материалов**

Дополнительный эффект перемешивания партий материала организуется при самотечном движении материала в пересыпных воронках вдоль корпуса усреднителя. Усредненный материал выгружается из усреднителя через патрубок 9 в коническом днище корпуса.

С помощью каскада разрыхлителей потока сыпучего материала создается большое количество параллельных разрыхленных потоков перемешивания в зазоре между пересыпными воронками и корпусом усреднителя. Вследствие этого значительно повышается эффективность процесса усреднения партий сыпучего материала. Повышение интенсивности перемешивания материала параллельных потоков обеспечивается также с помощью криволинейных наклонных пластин, которые устанавливаются каскадом в зазорах между пересыпными воронками и корпусом усреднителя и имеют противоположный угол наклона.

Разработанная конструкция усреднителя обеспечивает интенсивное взаимное проникновение частиц сыпучего материала отдельных партий, вследствие этого достигается высокая однородность частиц на выходе из усреднителя.

### **Выводы**

Наиболее эффективными и предпочтительными являются конструкции усреднителей с активным гидродинамическим режимом, в которых обеспечивается организованное движение вдоль корпуса аппарата партий сыпучих материалов, подвергаемых усреднению [7–9]. Для организации движения сыпучего материала в корпусе усреднителя устанавливаются различные транспортирующие устройства в виде шнеков, пересыпных воронок, а также применяются устройства для аэрирования потока сыпучего материала.

Разработана конструкция усреднителя партий сыпучего материала, которая позволяет получать смеси заданного качества за счет обеспечения активного режима движения смешиваемых материалов по высоте корпуса аппарата. Эффективность процесса усреднения достигается путем организации с помощью разрыхлителей потока сыпучего материала большого количества параллельных разрыхленных потоков перемешивания в зазоре между пересыпными воронками и корпусом усреднителя. Кроме того интенсивность перемешивания материала параллельных потоков повышается также с помощью наклонных кронштейнов, установленных в зазорах между пересыпными воронками и корпусом усреднителя и имеющих противоположный угол наклона. В результате интенсифицируется взаимное перемещение частиц материала отдельных партий и обеспечивается высокое качество смеси.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. Москва.: Машиностроение, 1973. 216 с.
2. Темкин, И.В. Производство электроугольных изделий. Учеб. пособие. Москва, Изд-во Высшая школа, 1975, 232 с.
3. А.с. СССР 991051 (E21C41/00)/ Устройство для усреднения качества твердых сыпучих материалов / Кишкашев С. - 3333722/22-03; заявл. 07.08.1981; опубл. 23.01.1983, Бюл. № 3.
4. Иванец В.Н., Бакин И.А., Иванец Г.Е. Интенсификация процессов гомогенизации и диспергирования при получении сухих, увлажненных и жидких комбинированных продуктов. Техника и технология пищевых производств, Выпуск № 3 (26), 2012, с. 3 – 12.
5. Зайцев А.И., Быгев Д.О., Сидоров В.Н. Теория и практика переработки сыпучих материалов Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева, 1988, Т. 33, №4, с. 390.
6. Пат. 2624477 ( B01F7/18, B01F03/00). Усреднитель партий сыпучего материала / Долгунин В.Н., Борщев В.Я., Сухорукова Т.А. – № 2016116112; заявл. 25.04.2016; опубл. 04.07.2017.
7. Першин В.Ф., Селиванов Ю.Т., Демин О.В. Перспективы использования циркуляционных смесителей в промышленности. Химическая промышленность сегодня, 2003, № 11, с. 41 – 44.
8. Бородулин Д. М., Иванец В.Н. Развитие смесительного оборудования центробежного типа для получения сухих и увлажненных комбинированных продуктов: монография. Кемерово, Изд-во КемГИПП, 2012, 178 с.
9. Сухоруков Д.В. Разработка и исследование центробежного смесителя непрерывного действия с организацией направленного движения материальных потоков. Канд. Дисс. Кемерово, 2014. 152 с.

УДК 66.047

### НЕКОТОРЫЕ КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ПЛАСТИФИКАТОРОВ ВО ВСПЕНЕННОМ СОСТОЯНИИ THE KINETIC FEATURES OF THE DRYING PROCESS OF PLASTICIZERS IN THE FOAMED STATE

**Андрей Николаевич Пахомов, Наталия Цибиковна Гатапова,  
Юлия Владимировна Пахомова  
Andrey N. Pakhomov, N. Ts. Gatarova, Yu. V. Pakhomova**

*Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов  
Tambov State Technical University Russia, Tambov  
(e-mail: panpost@yandex.ru)*

*Аннотация:* Приведено описание экспериментальной установки для сушки жидких продуктов во вспененном состоянии, рассмотрены некоторые кинетические особенности конвективной сушки во вспененном состоянии жидкого пластификатора бетона синтезируемого на основе нафталинсульфонатов.

*Abstract:* The description of the experimental installation for drying liquid products in the foamed state is given, some kinetic features of convective drying of the liquid plasticizer of concrete synthesized on the basis of naphthalene sulfonates in the foamed state are considered.

*Ключевые слова:* пластификатор, пена, конвективная сушка, кинетика сушки.

*Keywords:* plasticizer, foam, convective drying, the drying kinetics.

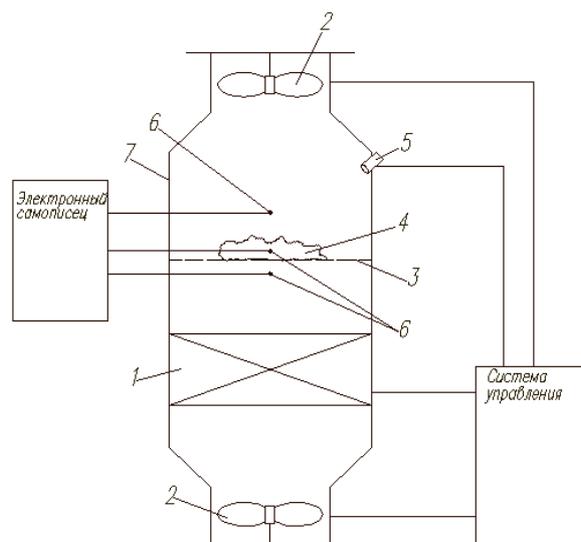
Поиск путей энергосбережения при сушке жидких дисперсных продуктов приводит к активным исследованиям в области методов сушки, ранее практически не применявшимся в технике сушки. Ярким примером является получившее в последнее время в ряде стран распространение исследований и разработки установок для сушки жидких дисперсных продуктов во вспененном состоянии с получением сухого продукта в виде порошка.

Сущность способа состоит в том, что жидкий продукт переводят во вспененное состояние (зачастую в присутствии пеностабилизирующих веществ для достижения определенной стойкости пены) и высушивают до заданного влагосодержания.

Вспенивание придает продукту более жесткую структуру и увеличивает его поверхность для ускорения диффузии влаги. С точки зрения теплопередачи этот способ менее эффективен, так как пене присуща низкая теплопроводность. Тем не менее, для определенных продуктов сушка во вспененном состоянии представляет собой сравнительно быстрый способ обезвоживания не требующий применения высокотемпературных теплоносителей.

В качестве исследуемого продукта для высушивания во вспененном состоянии был выбран жидкий пластификатор бетона, синтезируемый на основе нафталинсульфонатов. Классически этот продукт сушится с применением распылительных сушилок.

Экспериментальная часть работы выполнялась на конвективной сушилке, схема которой представлена на рис. 1. Экспериментальная установка состоит из электрокалорифера 1, встроенного в корпус сушилки 7, используемого как рабочая сушильная камера; вентилятора 2; решетки 3 для размещения исследуемого продукта 4; видеокамеры 5, используемой для визуальных наблюдений за поверхностью высыхающего продукта и термопар 6, используемых для контроля температурного режима аппарата и снятия термограммы высушиваемого продукта.



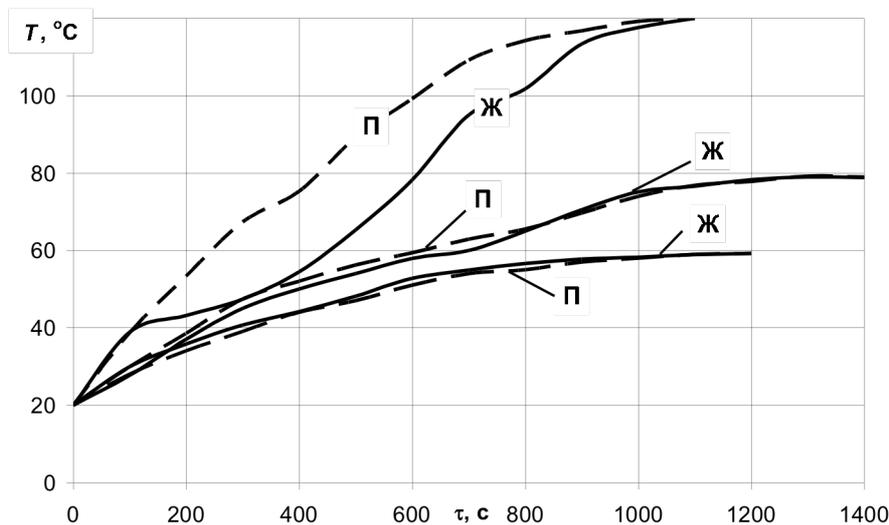
**Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки.**

Вспенивание жидкого пластификатора производилось механически с контролем величины кратности получаемой пены. Размещение образцов вспененного пластификатора происходит через крышку корпуса. Заданный расход воздуха устанавливается с помощью шкалы мощности в системе управления.

Продукт во вспененном состоянии 4 помещается на решетку 3. Корпус сушилки позволяет производить исследование, как с измерением убыли веса, так и без него. Для измерения убыли веса высушиваемого продукта (получении кривой сушки) в потоке воздуха используются специальные весы, разработанные при участии авторов. Термограмма сушки записывается электронным самописцем, соединенным с термопарой 6.

Для экспериментов в качестве подложки использовалась нейлоновая сетка с размером ячейки 0.2 мм. Время устойчивого сохранения пены на сетке в условиях отсутствия обдува ( $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $w=0\text{ м/с}$ ) составляет для  $K=1.3$  - 31 мин, для  $K=1.1$  - 47 мин.

На рис. 2. представлено сравнение термограмм сушки исследованных образцов пластификатора на нейлоновой сетке в жидком и вспененном состоянии при заданной кратности пены  $K=1.3$ , скорости сушильного агента 3 м/с и варьировании температуры сушильного агента от 60 °С до 120 °С.



**Рисунок 2 – Термограммы сушки пластификатора на нейлоновой сетке в жидком (Ж) и вспененном (П) состоянии (кратность пены  $K=1.3$ ) при температуре воздуха 60 °С, 80 °С и 120 °С и скорости сушильного агента 3 м/с.**

Как видно из характера термограмм, при сушке пластификатора во вспененном состоянии, в исследуемом диапазоне температур и скоростей сушильного агента, не формируется площадки мокрого термометра и площадки кипения. Характерный вид термограммы – монотонный рост температуры продукта от начальной температуры до температуры сушильного агента.

Сравнение представленных результатов с кинетическими кривыми сушки пластификатора в жидком (не вспененном) состоянии позволяют сделать вывод о зависимости скорости сушки от кратности пены. Также необходимо отметить, что при низкой кратности вспенивания пластификатора, интенсификация процесса сушки наблюдается только при высоких температурах сушильного агента.

### **Выводы**

Проведено экспериментальное исследование кинетики конвективной сушки жидкого пластификатора бетона, синтезируемого на основе нафталинсульфонатов, во вспененном состоянии; показана зависимость скорости процесса сушки от величины кратности получаемой пены и температуры сушильного агента.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Пахомов, А.Н. Исследование характера кипящего слоя в сушилке с инертными телами/Пахомов А.Н., Скрипникова С.Г., Сироткин А.О., Загребнев Р.С.//Инженерный вестник Дона. 2016. Т. 40. № 1 (40). С. 13.
2. Пахомов, А.Н. Некоторые особенности сушки пастообразных материалов на подложках/Пахомов А.Н., Пахомова Ю.В., Хатунцева Е.А., Елизарова В.А.// Инженерный вестник Дона. 2015. Т. 36. № 2-2. С. 91.

3. Пахомов, А.Н. Визуализация процесса формирования фонтанирующего слоя в щелевой установке/ Пахомов А.Н., Комбарова Е.Ю., Позднышева И.Г.// Наука без границ. 2017. № 6 (11). С. 62-65.

4. Пахомов, А.Н. Геометрия неподвижной капли жидкости, лежащей на наклонной поверхности/Пахомов А.Н., Гатапова Н.Ц., Пахомова Ю.В.//Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2018. Т. 24. № 4. С. 628-634.

5. Пахомов, А.Н. Опыт использования влагомера в исследованиях кинетики сушки жидкого лигносульфоната/Пахомов А.Н., Васенина С.В., Бирюкова И.А., Комбарова Е.Ю., Позднышева И.Г.//Инженерный вестник Дона. 2018. № 3 (50). С. 16.

УДК: 519.812.3:665.622.43

**КРИТЕРИИ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КАЧЕСТВА РАБОТЫ  
АППАРАТОВ ЭЛЕКТРООБЕССОЛИВАЮЩИХ УСТАНОВОК  
CRITERIA FOR COMPARATIVE ANALYSIS OF WORK QUALITY DEVICES FOR  
ELECTRIC DESALTING PLANTS**

**Константин Валентинович Таранцев\*, Сергей Иванович Поникаров\*\*,  
Клара Рустемовна Таранцева\*\*\*  
Konstantin V. Tarantsev\*, Sergey I. Ponikarov\*\*, Klara R. Tarantseva\*\*\***

*\*Пензенский государственный университет, Россия, Пенза*

*\* Penza State University, Russia, Penza*

*(e-mail: kvtar@bk.ru)*

*\*\*Казанский национально-исследовательский технологический университет,  
Россия, Казань*

*\*\* Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan*

*(e-mail: mahp\_kstu@mail.ru)*

*\*\*\*Пензенский государственный технологический университет, Россия, Пенза*

*\*\*\* Penza State Technological University, Russia, Penza*

*(e-mail: krtar@bk.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрены критерии для сопоставления показателей работы различных электрогидродинамических аппаратов, применяемых на электрообессоливающих установках на микро- и макроуровнях системы. Предложен интегральный критерий, позволяющий определить оптимальные значения параметров процессов создания и разрушения эмульсий в электрогидродинамических аппаратах.

*Abstract:* Criteria for comparing the performance of various electro-hydrodynamic devices used in electrical desalting plants are considered. An integral criterion is proposed, which allows determining the optimal values of the parameters of the processes of creation and destruction of emulsions in electro hydrodynamic devices.

Ключевые слова: Электрогидродинамические аппараты, обессоливание, критерии эффективности.

Keywords: Electrohydrodynamic apparatus, desalination, performance criteria.

При выборе электрогидродинамических аппаратов для электрообессоливающих установок необходимы критерии для сравнения интенсивности и эффективности протекающих в них процессов на микро- и макроуровнях. Для сопоставления различных вариантов исполнения аппаратов в настоящее время используют четыре группы критериев: технологические, термодинамические, экономические и статистические.

При выборе критерия учитывают следующие требования [1]: *критерий интенсивности* должен характеризовать процесс с позиций скорости достижения конечной его цели; *критерий эффективности* должен характеризовать процесс с точки зрения степени

достижения его конечной цели; *критерий* должен иметь конкретный физический смысл, быть универсальным, количественным и однозначным.

В зависимости от целей применения аппарата и условий его эксплуатации критерий может меняться.

Наиболее перспективными, согласно Баранову Д.А. [2], являются термодинамические критерии, основанные на сопоставлении энтропий исходной смеси и целевых продуктов разделения. Им предложено следующее выражение для определения эффективности разделения  $\mathcal{E}$ :

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n M_i \sum_{j=1}^m \beta_{i,j} - M_o \sum_{j=1}^m \alpha_j \ln \alpha_j \quad (1)$$

где  $M_i$  – масса получаемых продуктов;  $M_o$  – масса исходного продукта;  $\beta_{ij}$  – содержание компонентов в получаемых продуктах;  $\alpha_j$  – содержание компонентов в исходном продукте;  $n$  – количество продуктов разделения;  $m$  – количество извлекаемых компонентов.

М.В. Сулла и С.А. Фихтман [3] для определения эффективности разделения предложили другую зависимость:

$$\mathcal{E} = 1 - \frac{(q_v H_v + q_n H_n)}{H_o} \quad (2)$$

где  $H_o$ ,  $H_v$ ,  $H_n$  – энтропии смеси соответственно на входе, в верхнем и нижнем продуктах, рассчитываемые по зависимости

$$H = -a \log_2 a - (1-a) \log_2 (1-a) \quad (3)$$

где  $a$  – концентрация дисперсной фазы в долях единицы.

Эффективность разделения  $\mathcal{E}$  является функцией всех параметров процесса разделения и удовлетворяет требованиям наиболее представительного показателя [2].

Рассмотрим возможность применения данного подхода на примере сравнения и выбора конкретных электрогидродинамических аппаратов – смесителей, электродиспергаторов и электрокоалесценторов, применяемых в химико-технологических системах электрообессоливающих установок (ХТС ЭЛОУ).

К основным показателям эффективности ХТС ЭЛОУ относятся: технологические (производительность, расход промывной воды и др.); качественные показатели выпускаемой продукции (остаточное содержание воды и солей в товарной нефти и др.); экономические (удельные затраты на обезвоживание и др.).

Показателями эффективности отдельных аппаратов электрообессоливающих установок (ЭЛОУ) являются технологические критерии (расход электрической энергии, воды, пара; температура проведения процесса, доля удаленной воды, доля солей вымываемых из водонефтяной эмульсии и т.д.).

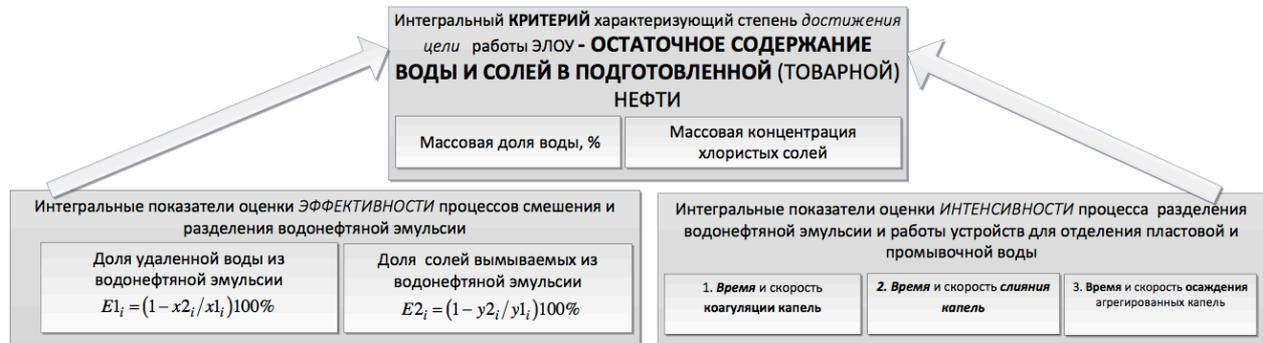
В практике для оценки и сравнения электрообессоливающих установок нашел применение обобщенный критерий – минимум удельных затрат на обезвоживание. В этом случае *экономический критерий* получается в результате аддитивного сложения величины стоимости потребляемой промывочной воды  $C_{вода}$ , израсходованного деэмульсатора  $C_{деэм}$ , затрат на очистку сточных вод  $C_{о.с.в.}$ , затрат на электроэнергию  $C_{эл}$  и нагрев водонефтяной эмульсии  $C_{нагрев}$ .

$$C_{\Sigma} = C_{вода} + C_{деэм} + C_{о.с.в.} + C_{эл} + C_{о.с.в.} \quad (4)$$

Основными *технологическими параметрами*, определяющими оптимальные режимы работы электрообессоливающих установок, являются: температура и давление процесса, тип и расход деэмульгатора, расход промывной воды и ее распределение между ступенями.

Основными *конструктивными параметрами*, определяющими конструкцию электрообессоливающих установок, являются: число ступеней, конструктивные особенности смесителей и электродегидраторов.

Поскольку конечной целью работы ЭЛОУ является обеспечение качества товарной нефти, прежде всего по содержанию в ней воды и солей, соответственно, *интегральным показателем эффективности процессов*, составляющих ХТС ЭЛОУ, будет минимизация всех видов затрат, при условии достижения поставленной цели. Таким образом, *интегральными показателями эффективной работы ЭЛОУ* являются доля удаленной воды и доля солей вымытых из водонефтяной эмульсии (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Критерии, показатели и параметры, описывающие процессы создания и разрушения эмульсий со слабопроводящей сплошной средой**

Отдельными показателями являются время дробления капель в смесительном аппарате  $\tau_{др}$ , время перемешивания капель промывочной соленой воды в смесительном аппарате и в последующем за смесителем объеме  $\tau_{пер}$ , времена коагуляции  $\tau_{коаг}$ , слияния  $\tau_{сл}$  и осаждения  $\tau_{ос}$  капель воды в процессе разделения водонефтяной эмульсии.

Эти показатели можно привести к безразмерному виду  $\delta\tau_{др}, \delta\tau_{пер}, \delta\tau_{коаг}, \delta\tau_{сл}, \delta\tau_{ос}$ , путем делением на характерное время – время осаждения капли диаметром 100 мкм в рассматриваемой дисперсионной среде на высоту 1 метр, при условии свободного осаждения и при выполнении закона Стокса. Далее каждому из них установить весовой коэффициент  $b_i$  из условия  $\sum b_i = 1$  и после аддитивного сложения получить *интегральный параметр интенсивности процесса*  $E_\tau$ .

$$E_\tau = \sqrt{\frac{b_{др} \delta\tau_{др} + b_{пер} \delta\tau_{пер} + b_{коаг} \delta\tau_{коаг} + b_{сл} \delta\tau_{сл} + b_{ос} \delta\tau_{ос}}{b_{др} + b_{пер} + b_{коаг} + b_{сл} + b_{ос}}} \quad (5)$$

Каждому уровню эффективности для данных условий протекания процессов соответствует свой уровень интенсивности. Анализ позволяет выбрать лимитирующую стадию процесса, воздействие на которую смещает равновесие, и ускоряет процесс при сохранении требуемой эффективности с минимальными затратами.

На *микроуровне критериями интенсивности процессов* создания и разрушения эмульсий являются *время разрушения* капли воды и *время слияния капель* воды в эмульсии, позволяющие комплексно оценить интенсивность процессов электродиспергирования и электрокоалесценции, соответственно.

На *макроуровне* наиболее рациональными критериями для определения интенсивности процессов создания и разрушения эмульсий со слабопроводящей сплошной средой в электрогидродинамических аппаратах являются *отношение диссипации энергии*  $Z_\varepsilon$  и *отношение потери давления*  $Z_p$  в результате гидравлического сопротивления в электрогидродинамическом аппарате:

$$Z_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{смесителя}}{\varepsilon_{тр}} \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{тр}$  гидравлическое сопротивление в пустой трубе;  $\varepsilon_{смесителя} = \frac{(\Delta w)^3}{D}$  - диссипация энергии, т.е. количество энергии, затрачиваемой в единицу времени на преодоление трения частиц

единицы массы жидкой среды для смешивания ее компонентов;  $\Delta w$  - изменение мгновенной скорости жидкости на пути, равном характерному размеру потока  $D$  м/с.

$$Zp = \frac{\Delta p_{\text{смесителя}}}{\Delta p_{\text{тр}}}, \quad (7)$$

где  $\Delta p_{\text{тр}}$  - потеря давления в пустой трубе;  $\Delta p_{\text{смесителя}} = \varepsilon \tau \rho = \frac{\rho w^2 \lambda L}{D}$  - гидравлическое сопротивление смесителя, т.е. энергия, затрачиваемая единицей объема жидкости на прохождение через статический смеситель;  $\tau = L/w$  — среднее время прохождения жидкости через статический смеситель длиной  $L$ , с;  $\rho$  — средняя плотность жидкости.

*Критерием эффективности процессов* создания и разрушения эмульсий со слабопроводящей сплошной средой в электрогидродинамических аппаратах на макроуровне является *степень разделения водонефтяных эмульсий*:

$$E_i = (1 - x_{2i}/x_{1i})100\% \quad (8)$$

где  $x_{1i}$  – массовая доля воды в водонефтяной эмульсии до разделения;  $x_{2i}$  - массовая доля воды в водонефтяной эмульсии после разделения.

Сравнительная оценка рассмотренных критериев показала, что определение эффективности и интенсивности процессов и аппаратов создания и разрушения эмульсий со слабопроводящей сплошной средой является сложной задачей. Особенно, при учете ряда частных показателей, которые, как правило, трудно аналитически связать с обобщенным критерием, что затрудняет их использование.

Многокритериальный синтез обуславливает необходимость выбора критерия оптимальности. Оценку и сравнение процессов и аппаратов создания и разрушения эмульсий со слабопроводящей сплошной средой можно проводить с использованием интегральных (обобщенных) критериев, учитывающих ряд наиболее важных частных критериев [4,5].

Для учета совокупности эксплуатационных, технологических и экономических показателей эффективности и интенсивности процессов и аппаратов создания и разрушения эмульсий со слабопроводящей сплошной средой за основу можно взять *обобщенный критерий практической оптимальности* [6]:

$$\Theta = \frac{b_1 y_1 + b_2 y_2 + \dots + b_n y_n}{C}, \quad (9)$$

где  $y_i$  – абсолютное значение показателя;  $C$  – стоимость системы;  $b_i$  – весовой коэффициент, который отражает ценность  $i$ -го критерия при принятии решения о выборе альтернативы.

Для того, чтобы весовые коэффициенты  $b_i$  имели одинаковую размерность, частные показатели необходимо привести к безразмерной относительной форме.

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n b_i \delta y_i}{\frac{C}{C_m} \sum_{i=1}^n b_i} = k(b_1 \delta y_1 + b_2 \delta y_2 + \dots + b_n \delta y_n) \quad (10)$$

где  $\delta y_i = y_{im}/y_i$  – относительное значение показателя  $i$ -го качества;  $y_{im}$  – максимально допустимое значение показателя;  $C_m$  – максимально допустимое значение стоимости.

Весовые коэффициенты должны определяться *математически* обоснованно, поэтому кроме построения математической модели для определения весовых коэффициентов, необходимо также получить информацию о возможных значениях параметров и частных показателей качества конкурирующих вариантов процессов и аппаратов для их проведения.

Модель эффективности процессов можно задать как функцию от частных показателей качества  $\Theta = f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ . Тогда, допустив, что все частные показатели являются независимыми переменными, влияние частного показателя качества на главный показатель можно определить по дифференциалу функции [6]:

$$d\mathcal{E} = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial y_1} dy_1 + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial y_2} dy_2 + \dots + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial y_n} dy_n \quad (11)$$

или:

$$d\mathcal{E} = b_1 dy_1 + b_2 dy_2 + \dots + b_n dy_n, \quad (12)$$

где  $b_i = \partial \mathcal{E} / \partial y_i$  – коэффициенты веса.

#### **Выводы.**

Для сопоставления показателей работы различных электрогидродинамических аппаратов, применяемых на электрообессоливающих установках необходимо использовать интегральный критерий, позволяющий определить их экономическую эффективность и сравнить стоимость различных вариантов исполнения химико-технологической схемы.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Барский Л.А., Плаксин И.Н. Критерии оптимизации разделительных процессов. М.: Наука, 1967, 118 с.
2. Баранов Д.А. Принципы расчета и конструирования гидроциклонов для разделения эмульсий: дис. ... д-ра техн. наук: М.: МГАХМ, 1996, 359 с.
3. Сулла М.Б., Фихтман С.А. Применение энтропийного показателя для оценки эффективности сгустительных устройств // Водоснабжение и санитарная техника. 1972. № 11. С. 11–13.
4. Таранцев К.В., Прошин И.А. Методология исследования поведения гетерогенных систем в процессах электродиспергирования и электродеэмульсации водонефтяных эмульсий // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 10. С. 20 – 22
5. Таранцев К.В., Прошин И.А. Интенсификация химико-технологических процессов создания и разрушения водонефтяных эмульсий на основе системного // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 12. С. 11 – 17.
6. Бормотов А.Н., Прошин И.А., Королев Е.В. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов. Пенза: ПГТА, 2011. 354 с.

УДК 666.1.022.8

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СУСПЕНЗИИ ЧАСТИЦ ГИДРОГЕЛЯ  
С НЕОРГАНИЧЕСКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ  
DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING SUSPENSION OF HYDROGEL  
PARTICLES WITH INORGANIC FILLER**

**Дмитрий Анатольевич Макаренко, Вячеслав Иванович Назаров, Валерия Андреевна  
Бухрякова, Сергей Львович Лобастов\*, Александр Павлович Попов  
Dmitry A. Makarenkov, Vyacheslav I. Nazarov, Valeria A. Bukhryakova, Sergey L. Lobastov,  
Aleksandr P. Popov**

*НИИ «Курчатовский институт» - ИРЕА, Россия, Москва*

*SIC «Kurchatov Institute» - IREA, Russia, Moscow*

*(e-mail: makarenkovd@gmail.com, nazarov\_vi41@mail.ru, 89036290438@list.ru,*

*Schreib@yandex.ru, valevrika@gmail.com)*

*Аннотация:* Рассмотрена технология получения композиционного гидрогелевого материала в виде водной суспензии. Приведены данные по процессу измельчения гидрогелевого материала в водной среде, с получением водной суспензии частиц гидрогелевого материала. Предлагаемая технология обеспечивает требуемое распределение частиц по размерам. Получены экспериментальные зависимости изменения грансостава от режимных параметров.

*Abstract:* The technology of obtaining a composite hydrogel material in the form of an aqueous suspension is considered. The data on the process of grinding a hydrogel material in an aqueous medium are presented to obtain an aqueous suspension of particles of a hydrogel material. The proposed technology provides the required particle size distribution. Experimental dependences of the change in the composition of grains on the operating parameters are obtained.

*Ключевые слова:* полиакриламидный гидрогель, суспензия, частицы, грансостав, композиционный материал, технология

*Keywords:* polyacrylamide hydrogel, suspension, particles, granular composition, composite material, technology.

Среди композиционных полимерных материалов определенный интерес представляют материалы на основе полиакриламидных гидрогелей. Полиакриламидные гидрогели благодаря относительной простоте синтеза, доступным компонентам и пожаро- и взрывобезопасности являются удобными материалами-носителями для различных веществ (наполнителей). Так для улучшения водного режима почвы [1] в состав вводят различные неорганические наполнители на основе глин, а для обеспечения идентификации материалов узкополосные люминофоры [2].

Акрилатные гидрогели не обладают липкостью, что значительно облегчает манипуляции с гидрогелем, в том числе, в процессе его диспергирования. Диспергирование гидрогелей осуществляется по принципу масштабирования в дежах с профильной геометрией, обеспечивающей прерывание потока в радиальном направлении и создание дополнительных противодействующих сил, что в итоге влияет на динамику процесса. Высокая турбулентность максимально увеличивает эффективность смешивания и диспергирования, что сокращает время обработки и требует меньших затрат энергии.

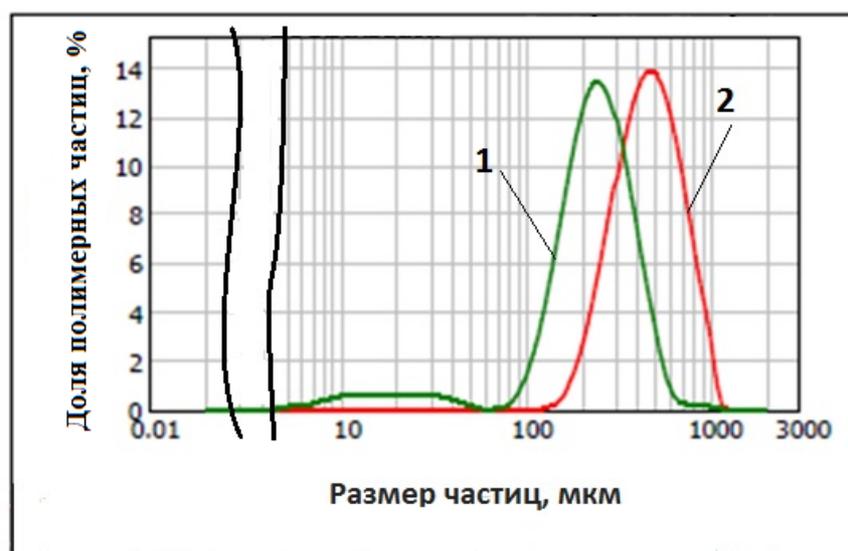
Заданный дисперсный состав гомогенизированной суспензии обеспечивается за счет создания вакуума, при этом образец попадает в центр системы и отбрасывается к периферии, проходя между зубцами статора. Между ротором и статором (кольцевой зазор) на продукт действуют значительные тормозящие- касательные силы и радиальное ускорение.

Для получения композиционного материала при постоянном перемешивании в смесь компонентов полиакриламидного гидрогеля до введения инициатора полимеризации вводят

тонкодисперсный неорганический наполнитель и инициатор радикальной полимеризации. В итоге образуется композиционный материал – монолитный гидрогелевый блок, который содержит в своем объеме равномерно распределенный неорганический наполнитель. Введение неорганического наполнителя повышает прочностные характеристики и термостабильность гидрогеля, существенно меняет его сорбционные свойства.

В НИЦ «Курчатовский институт»-ИРЕА разработана технология получения в едином технологическом цикле гидрогелевого блока с неорганическим ультрадисперсным наполнителем. Получение диспергированного гидрогелевого материала происходит в несколько стадий: 1) вначале получают гидрогелевый блок; 2) затем его подвергают предварительному измельчению в том же реакторе; 3) после этого проводят разбавление и диспергирование в устройстве типа «ротатор-статор» до заданного узкого гранулометрического состава с диаметром частиц  $D_{0,5}$  от 50 до 1000 мкм. Гранулометрический состав суспензии частиц композиционного материала контролируется частотой вращения диспергирующего устройства, временем диспергирования, прочностными характеристиками материала и содержанием материала в дисперсионной среде [3].

Время диспергирования во время опытов изменяли от 2,5 до 10 минут. Результаты влияния времени диспергирования на гранулометрический состав частиц гидрогелевого материала представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что увеличение времени диспергирования при одинаковой частоте вращения погружного диспергатора сужает гранулометрический состав получаемых частиц.



1 –  $\tau=10$  мин; 2 –  $\tau=5$  мин

**Рисунок 1 – Влияние времени диспергирования при постоянной частоте вращения  $n = 7000$  об/мин на гранулометрический состав частиц**

Полученное распределение гранулометрического состава частиц является нормальным (нормированное и центрированное) [4] и описывается зависимостью:

$$\varphi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (1)$$

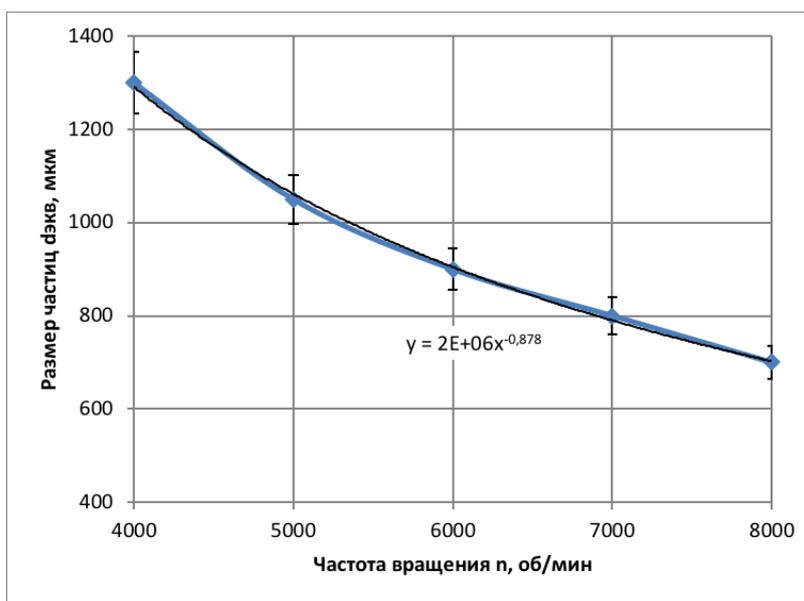
Определяющими параметрами при этом являются частота вращения, время диспергирования и размер частиц. Таким образом, для класса полиакриламидных гидрогелей можно прогнозировать гранулометрический состав конечного продукта.

На рисунке 2 приведена зависимость изменения размера частиц гидрогеля от частоты вращения погружного диспергатора. Увеличение частоты вращения в диапазоне от 4000 до 8000 об/мин и одинаковом времени диспергирования, приводит к уменьшению размера частиц гидрогеля в среднем на 200 мкм. График зависимости описывается степенной функцией в виде уравнения:

$$y = 2E + 0,6x^{-0,878} \quad (2)$$

или

$$d_{\text{ЭКВ}} = 0,02 + 0,6n^{-0,878} \quad (3)$$



**Рисунок 2 – Зависимость максимального размера частиц композиционного гидрогелевого материала от частоты вращения диспергирующего агрегата**

Таким образом, разработанная технология позволяет исключить энергозатратные многостадийные стадии сушки и дробления гидрогелевого материала. Кроме того, полученная суспензия не требует предварительной подготовки для введения в бумагу на этапе ее производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ихтиярова Г.А.* и др. Получение гидрогеля на основе бетонитовой глины и акриламида. Сборник трудов Бухарского государственного университета.
2. *Курятников А.Б., Павлов И.В.* и др. Способ изготовления защищенной бумаги. Защищенная бумага и ценный документ. Патент RU 2536215. Кл. МПК. D21H21/40 20.12.2014.
3. *Макаренков Д.А., Назаров В.И., Баринский Е.А.* Процессы и аппараты химических технологий. Основные процессы производства пигментов, суспензий и паст в лакокрасочной промышленности: учебное пособие под ред. В.И. Назарова. М.: ИНФРА-М, 2016 – 211 с. – (высшее образование: Бакалавриат)
4. *Шмаков П.С.* Математическая обработка результатов измерений: учеб. пособие/П.С. Шмаков, Ю.Л. Юнаков. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 410 с.

**СЕКЦИЯ 4. «ИНФОРМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ  
ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ И  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ И ПРОЦЕССАМИ»**

УДК 620.193.013:620.197

**О ПОСТРОЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В  
АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ  
ON MATHEMATICAL MODELS FOR PREDICTING THE DEGRADATION OF  
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS**

**Борис Владимирович Гусев\*, Александр Соломонович Файвусович\*\*  
Boris V. Gusev\*, Alexander S. Fayvusovich\*\***

*\*Российский университет транспорта (МИИТ), Россия, Москва  
Russian University of Transport (MIIT), Russia, Moscow*

*\*\*Международная инженерная академия, Россия, Москва  
International Academy of Engineering, Russia, Moscow  
(e-mail: l.a.ivanov@mail.ru)*

*Аннотация:* Излагаются особенности построения определяющих уравнений процессов коррозии химического типа железобетонных конструкций. В качестве исходных приняты следующие положения:

- двойная система пористости, при которой возможен массоперенос в жидкой фазе в продольном и поперечном направлении;
- физико-химические превращения при протекании гетерогенных химических реакций, кристаллизации, растворении;
- использование задач Стефана с подвижными границами для описания отдельных стадий процессов коррозии.

Функция скорости связывания агрессивного компонента при этом определяется из решения частной задачи Стефана на основе принятой схемы без привлечения каких-либо дополнительных зависимостей.

Исходные данные для прогнозирования на основе расчетных зависимостей предусмотрено определять по данным статистической обработки результатов распределения соединений агрессивного компонента по глубине слоя эксплуатируемых конструкций за весь предшествующий период эксплуатации.

*Abstract:* The special aspects of the creation of the governing equations of the corrosion processes of the chemical type of reinforced concrete structures were described.

The following provisions have been taken as initial:

- a dual system of porosity in which mass transfer in the liquid phase is possible in the longitudinal and transverse directions;
- physico-chemical transformations during heterogeneous chemical reactions, crystallization, dissolution;
- the use of Stefan's problems with moving boundaries to describe the individual stages of corrosion processes.

The function of the binding rate of the aggressive component is determined from the solution of a particular Stefan problem based on the adopted scheme without involving any additional dependencies.

It is planned to determine the initial data for forecasting based on the calculated dependences according to the data of statistical processing of the results of the distribution of

compounds of the aggressive component along the depth of the layer of operated structures for the entire previous period of operation.

*Ключевые слова:* коррозия, железобетон, фазовые превращения, двойная система пористости, скорость связывания, задача Стефана.

*Keywords:* corrosion, reinforced concrete, phase transformations, double porosity system, binding rate, Stefan problem.

### **Введение**

В настоящее время объем бетонных и железобетонных конструкций, находящихся в эксплуатации в России составляет ориентировочно 1,5 млрд. м<sup>3</sup>. С увеличением продолжительности эксплуатации, возрастает объем конструкций продолжительность безопасной эксплуатации которых, согласно действовавшим нормам, во время строительства исчерпана. Поэтому вопросы прогнозирования процессов деградации конструкции (прежде всего в условиях различных агрессивных воздействий), определяющие безопасность их эксплуатации, представляют важную проблему государственного значения.

Одним из наиболее актуальных направлений исследований в указанном направлении является разработка математических моделей процессов коррозии и на их основе инженерных методик прогнозирования, рассчитанных на массового потребителя.

Согласно действующим стандартам при прогнозировании определению подлежат: глубина нейтрализованного слоя бетона на заданный срок эксплуатации и время достижения критической (предельной) концентрации агрессивного компонента на границе с арматурой.

В статье анализируются виды коррозии, относящиеся к химическому типу (Chemical Damage). В него включаются сульфатная, карбонатная, хлоридная коррозия, выщелачивание, в т.ч. при фильтрации.

На основе анализа многочисленных экспериментальных и теоретических исследований установлено, что процесс коррозии определяется массопереносом агрессивного компонента в поровом пространстве бетона с учетом его связывания в результате химической реакции с химически активными частицами цементной матрицы, либо выделение при выщелачивании. Таким образом, для построения определяющего уравнения необходимо в исходное уравнение массопереноса включить функцию скорости связывания или выделения вещества.

Обоснованные зависимости, характеризующие скорость связывания или выделения вещества должны определяться из решения соответствующих краевых задач, учитывающих все особенности процессов. По этой причине достаточно широко используемые в моделях коррозии в качестве функции скорости связывания изотермы Ленгмюра и Фрейндлиха, характеризующие процессы адсорбции, могут рассматриваться в качестве компромиссного варианта.

При этом физический смысл коэффициентов изотерм, определяемых экспериментально, остается нераскрытым. Поэтому установление всех особенностей процессов коррозии требует более строгого учета ряда факторов. Во всех моделях используется одинарная система пористости в виде пучка параллельных капилляров, причем расстояние между ними может достигать 10 радиусов. Таким образом, вместо изотропного порового пространства рассматривается анизотропное. При этом массоперенос протекает в поперечном направлении, а также выравнивание концентраций агрессивного вещества и продуктов коррозии. Использование одинарной системы пористости означает, что частицы химически активного вещества переносятся внутри капилляров.

Построение системы определяющих уравнений в полном объеме характеризующих процессы коррозии и без использования дополнительных зависимостей возможно при соблюдении следующих условий:

- переходе от одинарной к двойной системе пористости;
- учете в полном объеме физико-химических превращений веществ в процессе коррозии;

- учет особенностей решения краевых задач с подвижными границами (задачи Стефана).

В статье приведены основные результаты исследований, включая полученные зависимости скорости связывания, а также даны расчетные зависимости отдельных видов коррозии для прогнозирования процессов деградации.

В современных условиях, в качестве надежных исходных данных для прогнозирования авторами рекомендуется использовать результаты экспериментальных данных о распределении концентраций агрессивного компонента общей и в свободном состоянии [EN 14629(2007) и ASTM (с 1152 Internation 2012)]. В этом случае исходные данные являются статистически усредненными и учитывают все особенности эксплуатации конструкций.

В данной статье продемонстрированы особенности используемой методики, приведена постановка и решение задачи нейтрализации портландита в условиях сульфатной коррозии. Отметим, что полученное решение может быть без корректировки использовано для описания процессов хлоридной, карбонатной и частично в других видах коррозии [12 - 18].

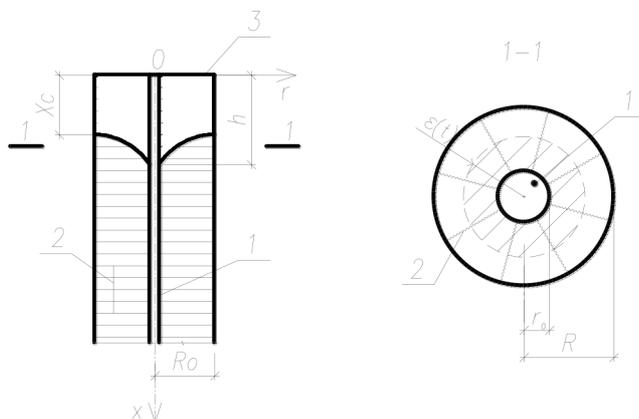
## 1. Кинетика физико-химических превращений в процессе коррозии бетона

### 1.1. Двойная система пористости.

В работах авторов развито направление разработки математических моделей с использованием двойной системы пористости. Двойная система основывается на следующих исходных предпосылках [12,17]:

- все капилляры ( $0,5 \cdot 10^{-7} \leq r_o \leq 10^{-5}$ ) м с учетом площадей поперечного сечения разделяются на два типа. К первому типу относятся сквозные капилляры продольного направления, по которым возможен массоперенос жидкой и, в случае атмосферной коррозии, также и газообразной фазы. В поперечных капиллярах, радиально примыкающих к сквозным, возможен массоперенос только жидкой фазы. Условно в данном случае поперечные капилляры называются микрокапиллярами;

- для описания процесса коррозии в массиве из всего разнообразия выделяется один структурный элемент, который характеризуется значениями пористости в продольном ( $\varepsilon_f$ ) и поперечном направлении ( $\varepsilon_r$ ), радиуса  $R_o$  (рисунок 1).



1 - сквозной капилляр; 2 - микрокапилляры; 3 - нейтрализованная зона бетона;  $x_c$  - глубина полностью нейтрализованной зоны;  $R_o$  - радиус структурного элемента;  $r_o$  - радиус сквозного капилляра

Рисунок 1 – Схема структурного элемента

Основные соотношения, характеризующие структурный элемент, имеют вид:

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \varepsilon_r ; \quad (1)$$

где  $\varepsilon_f$ ,  $\varepsilon_r$  – соответственно пористость капилляров продольного и поперечного направления.

Кроме того, вводится величина относительной степени нейтрализации  $\theta(x,t)$ :

$$\theta(x, t) = \frac{r^2(x, t) - r_0^2}{R_0^2 - r_0^2}; \quad (2)$$

$$\text{В интервале} \quad x \geq x_c \quad 0 \leq \theta(x, t) \leq 1, 0 \quad (3)$$

Принципиальная особенность массопереноса в структурном элементе с двойной системой пористости заключается в том, что в сквозном капилляре происходит только массоперенос, а массоперенос со связыванием вещества происходит в микрокапилляре поперечного направления.

Основное требование, предъявляемое к структурному элементу, заключается в обеспечении соответствия распределения концентраций агрессивного компонента в бетоне эксплуатируемых конструкций и структурном элементе. Указанное достигается путем статистической обработки результатов распределения концентраций по глубине слоя эксплуатируемых конструкций и определения на их основе обобщенных параметров, используемых для прогнозирования процессов деградации на дополнительный срок эксплуатации при известном текущем. Более детальное описание алгоритма построения модели излагается далее.

Для описания процессов коррозии при фильтрационном массопереносе также используется двойная система пористости, включающая фильтрационные поры или трещины продольного направления и примыкающие к ним капилляры поперечного направления.

Концентрация нейтрализуемых частиц цементной матрицы определяется только той частью, которая расположена в капиллярах поперечного направления или примыкает непосредственно к ним.

Процесс нейтрализации химически активного вещества цементной матрицы при двойной системе пористости протекает по следующей схеме. При массопереносе агрессивного компонента в жидкой фазе в сквозном капилляре происходит ее переток в микрокапилляры, заполненные нейтрализуемым веществом. В результате гетерогенной химической реакции образуются подвижные границы фазовых превращений. Для дальнейшего анализа и построения модели структурный элемент по высоте может быть разделен на элементарные слои, в каждом из которых располагается один ряд микрокапилляров.

### 1.2. Кинетика физико-химических превращений в процессах коррозии.

Одна из важных особенностей разработки математических моделей процессов коррозии бетонов связана с необходимостью учета физико-химических превращений веществ. К ним относятся гетерогенные химические реакции (ГХР), в которых в данном случае протекает взаимодействие в твердой и жидкой фазах.

Причем на границе раздела фаз образуется пограничный слой. ГХР характеризуется тремя стадиями [12-18]:

- подводом реагента к границе раздела фаз;
- реакцией на поверхности раздела фаз с учетом площади контакта;
- отводом продуктов реакции из реакционной зоны.

Процесс может контролироваться стадией 2 – кинетическая область; 1,3 – диффузионные области. Геометрия порового пространства является основным фактором, определяющим контролируемую стадию.

В работах авторов на основании анализа было принято, что контролирующей стадией процесса является стадия 1, характеризующая скорость подвода реагента к границе межфазного превращения.

С учетом введенных допущений уравнение кинетики имеет вид:

$$\mu_1 m_1 = -D_1 \frac{\partial C_1(r, t)}{\partial r} / r = \xi(t) \quad (4)$$

$$t = 0 \quad r = r_0; \quad (5)$$

где  $m_1$  – концентрация портландита в твердой фазе в единице объема бетона;

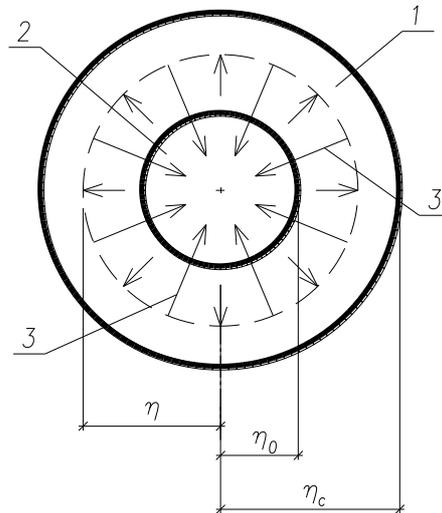
$D_1$  – эффективный коэффициент диффузии сульфата натрия (NS);

$C_l(x,t)$  – концентрация NS;  $\mu_1$  – стехиометрический коэффициент;

$\xi(t)$  – координата подвижной границы фазового превращения.

Процесс нейтрализации частиц трехкальциевого алюмината ( $C_3A$ ) имеет отличительные особенности.

Образующийся в результате первой ГХР раствор гипса  $CSH_2$  полностью заполняет внутреннее пространство с начальным радиусом  $\eta_0$ . Массоперенос происходит в радиальном направлении. В процессе реакции радиус микрокапилляра увеличивается до  $\eta_c$  (рис. 2).



1 –  $C_3A$ , 2 –  $CSH_2$ , 3 – раствор этtringита.

**Рисунок 2 – Схема нейтрализации  $C_3A$  под действием  $CSH_2$ .**

Определенные трудности возникают при разработке модели сульфатной коррозии с образованием этtringита в выборе теории для описания кинетики стадии кристаллизации с учетом условий баланса веществ и непрерывности со смежными стадиями. В работе авторов использована зависимость диффузионной теории [17].

Согласно диффузионной теории кристаллизации скорость процесса определяется зависимостью [17]:

$$m_3 \frac{\partial \beta}{\partial \tau} = \frac{D_3}{\delta} (C_n - C_H), \quad (4)$$

где  $m_3$  – концентрация этtringита в кристаллической форме;  $D_3$  – эффективный коэффициент диффузии этtringита в гелеобразной форме;  $C_n, C_H$  – концентрации перенасыщенного и насыщенного геля этtringита;  $\delta$  – толщина пограничного слоя;  $\tau$  – продолжительность протекания процесса.

## 2. Математическая модель процесса нейтрализации портландита

Математическая модель с учетом наличия двойной системной пористости представлена в виде двух краевых задач. Одна из них связана с массопереносом реагента в продольном направлении и его переносом в поперечном направлении, а вторая – с массопереносом в поперечном направлении с образованием подвижной границы фазового превращения.

$$\frac{\partial C_f(x,t)}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C_t(x,t)}{\partial r^2} - \frac{\partial C_b(x,t)}{\partial t}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_f(r,x,t)}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 C_f(r,x,t)}{\partial r^2}; \quad r_0 \leq r \leq R_0; \quad (8)$$

$$C_t(x,t) = C_f(x,t) + C_b(x,t); \quad (9)$$

Краевые условия:

$$t = 0; C_f(x,t) = 0; \xi(x,r,t) = r_0 \quad (10)$$

$$x = 0; C_{\xi}(x,t) = C_f(0); C_i(x,t) = C_b(0); \quad (11)$$

$$x \rightarrow \infty; \frac{\partial C_f(x,t)}{\partial r} \rightarrow 0; \quad (12)$$

$$r = \xi(x,t); D_2 \frac{\partial C_f(x,t)}{\partial r} = -m_1 \mu_1 \frac{\partial \xi(r,x,t)}{\partial t}; \quad (13)$$

$$r = \xi(x,t); \frac{\partial C_b(x,t)}{\partial t} = \frac{2m_1 \mu_1}{\xi(x,t)} \cdot \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial t}; \quad (14)$$

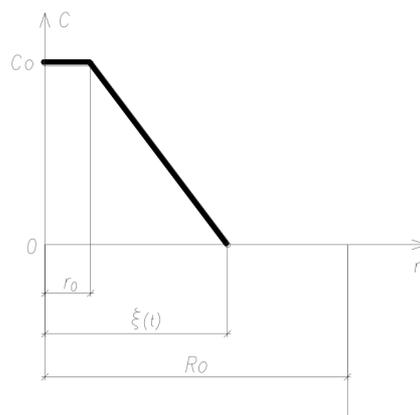
$$D_1 = D\varepsilon_f; D_2 = D\varepsilon_r; \varepsilon = \varepsilon_f + \varepsilon_r,$$

где  $C_i(x,t); C_f(x,t); C_b(x,t)$  - общая концентрация агрессивного вещества, в свободном и связанном состоянии,  $\varepsilon_f, \varepsilon_r$  - пористость в направлении осей  $x$  и  $r$ ,  $\varepsilon$  - общая пористость;  $D, D_1, D_2$  - молекулярный и эффективные коэффициенты взаимной диффузии;  $\xi(x,r,t)$  - координата подвижной ГФП.

При наличии нейтрализованного слоя  $x = x_c$   $C_i(0), C_f(0)$  определяется на границе слоя.

Для определения скорости связывания в структурном элементе в интервале  $0 < \theta(x,t) < 1,0$  выделяется элементарный слой, включающий

один ряд микрокапилляров. Принимается, что в центре элементарного слоя  $0 \leq r \leq r_0$  концентрация  $C_f(0)$  постоянна. Затем выполняется постановка задачи Стефана для одного микрокапилляра с учетом условия квазистационарности, которое означает, что из-за низкой скорости, распределение агрессивного вещества в жидкой фазе в любой момент времени совпадает со стационарным (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Расчетная схема нейтрализации портландита в отдельном микрокапилляре.**

Решение уравнения (8) в этом случае имеет вид:

$$C(r,t) = C_0 \left(1 - \frac{r-r_0}{\xi(t)}\right); r_0 \leq r \leq \xi(t) \quad (15)$$

Подставляя (15) в (13) с учетом (10), получаем:

$$\frac{\partial C_b(x,t)}{\partial t} = \frac{\lambda C_f^0}{\beta C_f^0 t + 1}, \quad (16)$$

где  $\lambda = \frac{2D_1}{r_0^2}; \beta = \frac{2D_2}{q_0 r_0^2}; q_0 = m_1 \mu_1$

Непосредственное использование зависимости (16) для решения краевой задачи связано с необходимостью учета изменения  $C_f(x,t)$  в интервале  $x > x_c$ . Такой учет связан с использованием численных методов расчета с большим количеством параметров, определение которых представляет большие сложности. Для разработки инженерных методик прогнозирования использован другой подход, связанный с определением усредненного значения  $C_f^0$  в переходной зоне по данным обработки экспериментальных данных о

распределении концентраций общих и в свободном состоянии по глубине слоя эксплуатируемых конструкций. Таким образом, вместо решения нелинейной используется решение линеаризованной системы с минимальными отклонениями. Подробнее об этом в заключительной части. Указанное означает подобие зависимостей  $C_i(x,t)$ ,  $C_f(x,t)$ , что подтверждено экспериментально [2 - 11].

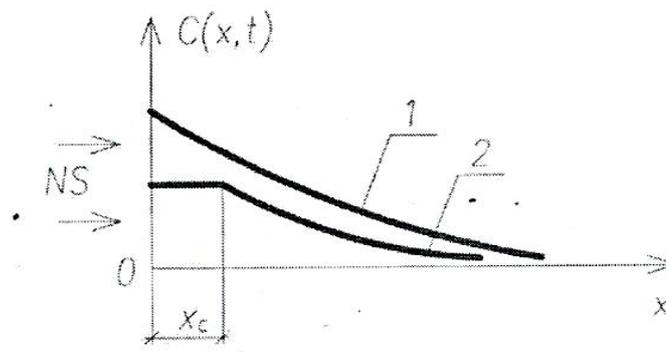
Аналитическое решение уравнения (7) с учетом (16) и краевых условий (10 - 12), полученное методом синус-преобразования Фурье, имеет вид [12]:

$$C_f(x,t) = C_i(0) \operatorname{erfc} u - q_0 \ln(\alpha t + 1) \operatorname{erfc} u, \quad (17)$$

где  $\operatorname{erfc} u = 1 - \operatorname{erfc} u$ ;  $\operatorname{erfc} u$  - функция ошибок.

$$u = \frac{x}{2\sqrt{D_1 t}}; \quad \alpha = \frac{2D_2 C_f^0}{q_0 r_0^2}; \quad \alpha = \beta C_f^0.$$

В зависимости (17) логарифмическая функция имеет физический смысл функции  $\theta(x,t)$  и изменяется в тех же пределах. Второй член в правой части (17) характеризует концентрацию реагента в связанном состоянии  $C_b(x,t)$ . Зависимость (17) справедлива в интервале  $x \geq x_c$ . В интервале  $x < x_c$  реакция связывания прекращается и граничное условие (11) формулируется для  $x = x_c$  (рисунок 4).



- 1 - общая концентрация сульфата натрия;  
2 - концентрация в связанном состоянии.

**Рисунок 4 – Распределение концентраций по глубине слоя бетона.**

Из (17,18) следует:

$$\frac{C_b(x,t)}{C_t(x,t)} = \frac{q_0}{C_t(0)} \ln(\alpha t + 1) \quad (18)$$

Решение (17) позволяет определить глубину нейтрализации бетона ( $x=x_c$ ,  $t=t_1$ ) и время  $t_p$  достижения пороговой концентрации  $C_{cr\xi}$ , определяющей начало коррозии арматуры ( $x = \alpha_c$ ):

$$1 = \ln(\alpha t_1 + 1) \operatorname{erfc} \frac{x_c}{2\sqrt{D_1 t_1}} \quad (19)$$

$$C_{cr}(a_c, t_p) = [C_t(0) - q_0 \ln(\alpha t_p + 1)] \operatorname{erfc} \frac{a_c}{2\sqrt{D_1 t_1}}, \quad (20)$$

где  $\alpha_c$  – толщина защитного слоя арматуры.

Из анализа зависимостей (19, 20) следует, что для прогнозирования процессов деградации требуется определение двух обобщенных параметров  $D_1$  и  $\alpha$ . Представленные в публикациях материалы о распределении концентраций по глубине слоя бетона при различной продолжительности экспериментов и в эксплуатируемых конструкциях подтверждают возможность такой статистической обработки [1 - 11].

Не менее важно, что при такой обработке удастся установить значения  $C_i(0)$ ;  $C_f(0)$  с учетом всех особенностей эксплуатации конструкций.

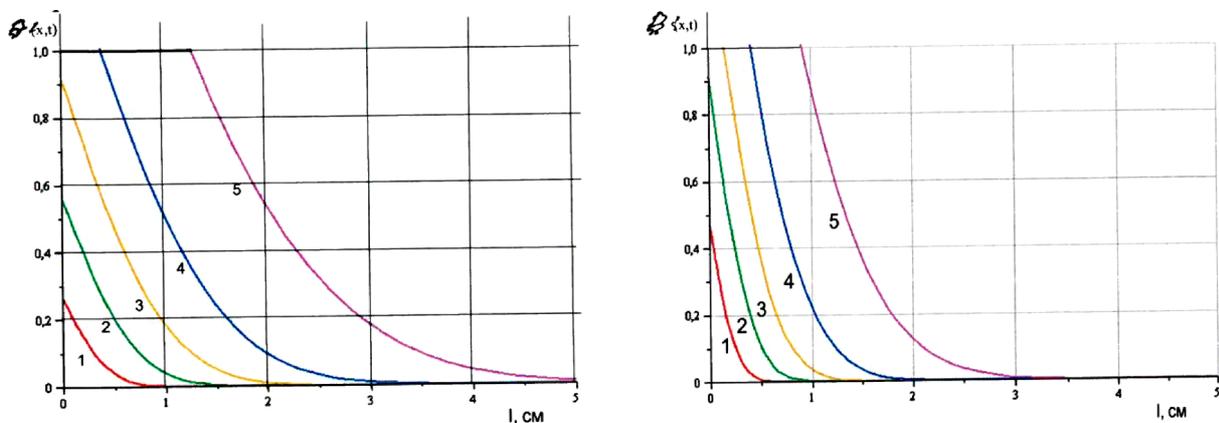
### 3. Анализ полученных результатов

Особенностью разработанной математической модели является учет в качестве исходных положений двойной системы пористости и кинетики физико-химических превращений. Указанное позволило получить в результате решения вспомогательной краевой задачи зависимость, характеризующую скорость связывания реагента. Принципиальное отличие от изотерм Ленгмюра и Фрейндлиха заключается в том, что в указанной зависимости представлены физически обоснованные характеристики, сведенные к двум обобщенным.

Важно также, что в ней в явной форме учитывается продолжительность процесса, который завершается в слое  $x = x_c$ , где  $\theta(x_c, t) = 1,0$ . Важно, что зависимость может использоваться самостоятельно.

Особый интерес представляет кинетика процесса связывания от обобщенных параметров  $D_1$  и  $\alpha$ .

На рисунках 5, 6 показаны результаты численного моделирования, устанавливающие зависимость величины  $\theta(x, t)$  от параметров процесса. Указанное особенно важно потому, что в ранее разработанных моделях данная величина непосредственно не определялась



а) 1-  $t = 2$  года; 2-  $t = 5$  лет; 3-  $t = 10$  лет; 4-  $t = 20$  лет; 5-  $t = 50$  лет

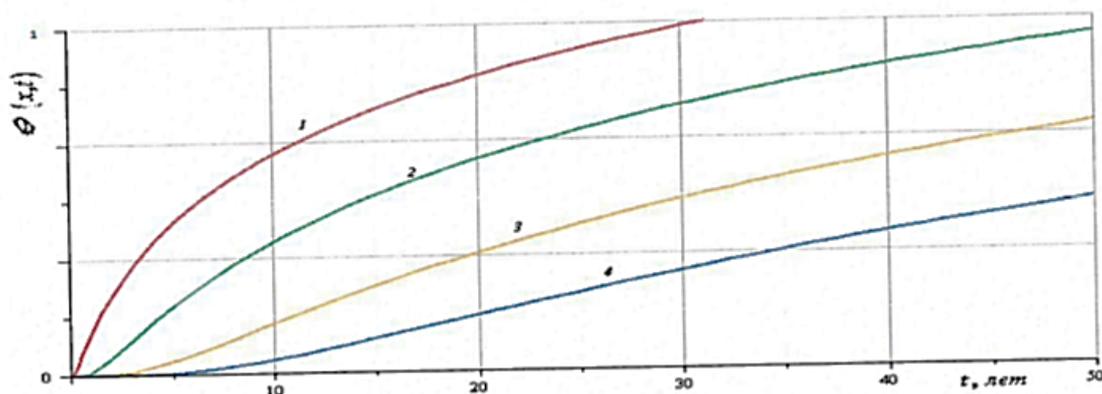
$$D_1=0,03 \text{ см}^2/\text{ГОД} \quad \alpha=0,15 \text{ 1}/\text{ГОД}$$

б) 1-  $t = 2$  года; 2-  $t = 5$  лет; 3-  $t = 10$  лет; 4-  $t = 20$  лет; 5-  $t = 50$  лет

$$D_1=0,01 \text{ см}^2/\text{ГОД} \quad \alpha=0,3 \text{ 1}/\text{ГОД}$$

**Рисунок 5 – Распределение степени нейтрализации бетона от параметров процесса**

Из результатов анализа следует, что степень нейтрализации на начальном интервале времени в точке  $x = 0$  изменяется от 0 до 1, а глубина переходной зоны зависит преимущественно от величины эффективного коэффициента диффузии. Она резко снижается с уменьшением  $D_1$ . Скорость увеличения  $\theta(x, t)$  определяется преимущественно параметром  $\alpha$ .



1 -  $h = 0,5 \text{ см}$   $D = 0,42 \text{ см}^2/\text{год}$   $\alpha = 0,8 \text{ 1/год}$  2 -  $h = 1,0 \text{ см}$   $D = 0,42 \text{ см}^2/\text{год}$   $\alpha = 0,8 \text{ 1/год}$   
 3 -  $h = 2,0 \text{ см}$   $D = 0,42 \text{ см}^2/\text{год}$   $\alpha = 0,8 \text{ 1/год}$  4 -  $h = 3 \text{ см}$   $D = 0,42 \text{ см}^2/\text{год}$   $\alpha = 0,8 \text{ 1/год}$

**Рисунок 6 – Зависимость степени нейтрализации бетона от параметров процесса**

Из сравнительного анализа экспериментальных и теоретических зависимостей для описания процессов хлоридной коррозии, представленных в публикациях, и зависимостей, приведенных в статье, следует [1-11]:

- в них совпадают условия подобия концентраций  $C_t$ ;  $C_f$ ;  $C_b$ ;
- также совпадают приведенные соотношения отдельных видов концентраций при фиксированном значении продолжительности процесса.

Однако аналога зависимости (16) в публикациях нет. Правильность логарифмической зависимости подтверждается данными статистической обработки результатов многолетних наблюдений и измерением глубины нейтрализованного слоя [13].

### **Заключение**

На основании накопленного опыта разработки математических моделей процессов коррозии бетона, установлено, что их совершенствование связано с уточнением структуры порового пространства и полным учетом физико-химических превращений. Наличие фазовых превращений означает, что описание процессов коррозии связано с использованием задач типа Стефана с подвижными границами.

В частности, без учета сформулированных положений, построение функции скорости связывания математические модели сульфатной коррозии и др. невозможны [12-18].

В предлагаемой методике предусмотрено использование в качестве исходных данных результатов статистической обработки распределения концентраций агрессивного вещества по глубине слоя бетона. Такой подход позволяет без использования поправочных коэффициентов получить надежные результаты с учетом всех возможных особенностей эксплуатации конструкций.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Wen-Hu Tsao, Min-Te Liang and Ta-Peng Chang. Chloride – binding isotherms in concrete Submitted to Non-steady-state Diffusion Migration Model// Journal of Marine Science and Technology. Vol.24, No 4. P.822-831 (2016).
2. Angst U.M., Bosheman C., Wagner M., Elsener B. Experimental Protocol to Determine the Chloride Threshold Value for Corrosion in Samples Taken from Reinforced Concrete Structures. 1 Vis.org. (126). E56229,doi:10.3391/5229(2017).
3. Yigiang Xiang, Dongmei Guo. Revised Model of Chloride Diffusion in Concrete Bridge by Considering Complex Action of Load and Chloride Binding Capacity. 4 International Conference on the Durability of Concrete Structure. 24-26 July 2014. Purdue University, West Lafayette, In, USA.

4. *Tang Luping, Lars Olof Nilsson and P.A.M. Basheer*. Resistance of Concrete to Chloride Ingress. Testing and Modelling // Spoon Press an imprint of Taylor in Francis. London and New York, 2012, p.239.
5. *M.Thomas*. The durability of Concrete for marine construction.// Marine Concrete Structures. 2016.
6. *L.Tang, P.Utgenamet, D.Boubitsas*. Durability and Service Life Prediction of Reinforced Concrete Structures.// Journal of the Chinese Ceramic Society. Vol. 43. №10. October 2015. Pp 1408 – 1419.
7. *Jun Lin et. al*. Chloride transport and microstructure of Concrete with without.// Construction and Building Materials. Vol.146 (2017), 493 – 501.
8. *Iun Lin et. al*. Surface Chloride Concentration of Concrete under Shallow Immersion Conditions.// Materials 2014, 7, 5620 – 6631.
9. *Phu Tho Ngueng, Emilio Bastilas-Arteaga, Guali Amiri et.al*. An efficient chloride ingress model for long-term lifetime assessment of reinforce concrete structures under realistic climate and exposure conditions// International Journal of Concrete Structures and Materials, Springer, 2017, 11(2), pp 199-213.
10. *Xiao-mei Wan et.al*. Chloride content and pH value in the pure solution of concrete under carbonation.// Journal of Zhejiang University SCIENCEA January 2013, Volume 14, Issue 1, pp 71-78.
11. *Wen-Hu Tsao and Ming-Te Liang*. Time/depth dependent diffusion-convection Model of Chloride with Transportation in Concrete Structures with chloride-binding isotherms.// Journal of Marine Science and Technologic, Vol.23, №5, pp 659-668 (2015).
12. *Гусев Б.В., Файвусович А.С.* Математическая модель процессов атмосферной коррозии бетонов с учетом фазовых переходов. // Вестник Волгоградского университета. Серия: Строительство и архитектура.-2013. Выпуск 31(50) ч.2. Строительные науки, с.308-325.
13. *Гусев Б.В., Файвусович А.С.* Построение инженерной методики прогнозирования деградации железобетонных конструкций в условиях атмосферной коррозии // Промышленное и гражданское строительство. 2017 №10 с. 28-38.
14. *Гусев Б.В., Файвусович А.С.* Прогнозирование долговечности бетона при выщелачивании. //Научный мир. М.: 2014. – с.112.
15. *Гусев Б.В., Файвусович А.С.* Математическая теория коррозии бетона и железобетона // Инф. научно-технич. журнал. Технология бетонов. М. 2014 №10 с. 35-39.
16. *Гусев Б.В., Файвусович А.С.* Построение математической теории процессов коррозии бетона // Строительные материалы №3, 2008. с. 38-41.
17. *Гусев Б.В., Файвусович А.С.* Математическая модель процесса сульфатной коррозии бетона с учетом физико-химических превращений// Инновации и инвестиции. Строительство и архитектура М., №11, 2018. с. 240-255.
18. *Гусев Б.В., Файвусович А.С., Левадная С.И.* Закономерности процессов выщелачивания бетона при фильтрации. // Промышленное и гражданское строительство. М., №12, 2013. с.31-36.

УДК 677.072

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРЯЖИ С ВЛОЖЕНИЕМ  
ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ВОЛОКОН  
SIMULATION OF YARN STRUCTURE INCLUDED ELECTRICALLY  
CONDUCTIVE FIBERS**

**Дмитрий Борисович Рыклин, Виталий Викторович Давидюк  
Dmitry B. Ryklin, Vitaliy V. Davidyuk**

*Витебский государственный технологический университет, Беларусь, Витебск  
Vitebsk State Technological University, Belarus, Vitebsk  
(e-mail: ryklin-db@mail.ru, dav68.by@gmail.com)*

*Аннотация:* Разработана модель одиночной пряжи, в состав которой входят электропроводящие волокна. Определено влияние линейной плотности пряжи и процентного содержания электропроводящих волокон, а также миграции волокон на среднее количество контактов, возникающих между ними в моделируемых сечениях пряжи.

*Abstract:* A model of single yarn has been developed which consists of blends included electrically conductive fibers. The influence of the yarn linear density, the percentage of electrically conductive fibers and their migration on the average number of contacts between them in the simulated cross-sections of yarn has been determined.

*Ключевые слова:* моделирование, пряжа, электропроводящие волокна, Bekinox.

*Keywords:* simulation, yarn, electrically conductive fibers, Bekinox.

Одним из путей повышения эффективности использования установленного оборудования является развитие ассортимента пряжи и комбинированных нитей для изготовления текстильных материалов специального назначения. Современный ассортимент волокон со специальными свойствами достаточно широк. Он включает высокопрочные, огнестойкие, электропроводные волокна, а также волокна с антибактериальными, терморегулирующими и другими свойствами.

Введение в структуру текстильного материала электропроводящих волокон и нитей позволяет достигнуть высокого антистатического эффекта, обеспечить экранирование электромагнитного излучения в широком частотном диапазоне, а также интегрировать различные элементы в одежду и другие изделия с целью придания им заданных функциональных свойств, то есть создавать образцы «умного текстиля» (smart textile). С учетом актуальности данного направления разработке и исследованию свойств электропроводящих текстильных материалов посвящено множество публикаций [1 – 4].

В настоящее время наиболее известным и распространенным волокном, используемым для создания антистатических тканей, является стальное волокно Bekinox, производимое компанией Bekaert (Бельгия).

Целью разработки имитационной модели структуры пряжи с вложением электропроводящих волокон является определение рационального состава пряжи, обеспечивающего стабильность ее электрических свойств. Под обеспечением стабильности свойств в данном случае понимается получение такой структуры нити, при которой возникает непрерывная последовательность контактов электропроводящих волокон от первого до последнего рассматриваемого сечения на отрезке заданной длины.

Несмотря на то, что пряжа является одномерным текстильным материалом, при решении поставленной задачи целесообразно ее рассматривать, как трехмерный объект, в котором конфигурация каждого волокна имеет сложную форму вследствие миграции в сечениях по всей длине волокна. Миграция волокон в разрабатываемой модели является существенно значимым явлением, определяющим возникновение контактов между волокнами.

Таким образом, оценка влияния миграции волокон на среднее количество контактов между ними, является одной из наиболее приоритетных задач.

При разработке модели было принято допущение о том, что в процессе формирования пряжи на кольцевой прядильной машине задний конец волокна обязательно образует ворсинку. Это допущение основано на представлении о том, что задний конец волокна, выходя из вытяжного прибора, попадает в треугольник кручения, часть волокон которого одновременно зажаты в пряже и в выпускной паре. В процессе кручения эти волокна стремятся переместиться к оси пряжи, что проявляется в их миграции.

Таким образом, построение модели существенно упрощается, если допустить, что все задние концы волокон находятся в наружном слое пряжи. При этом удобнее выбрать направление моделирование не от передних концов волокон к задним, а наоборот.

В разработанной модели моделирование осуществляется по следующему алгоритму:

1. В каждом сечении пряжи моделируется количество задних концов электропроводящих волокон, как случайная величина, распределенная по закону Пуассона, то есть считается, что вероятность появления ровно  $n$  задних концов волокон в интервале времени  $(t, t+\tau)$  находится по формуле (1), с учетом заранее введенных исходных данных.

$$P_n = \frac{(\lambda\tau)^n e^{-\lambda\tau}}{n!}, \quad (1)$$

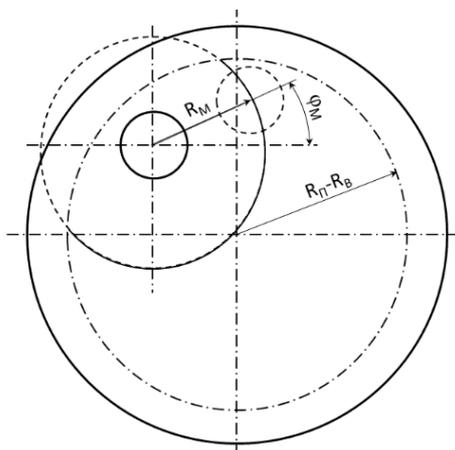
где  $\lambda$  – интенсивность потока волокон.

2. Для каждого появившегося конца волокна определяется его положение. В общем виде, положение волокна  $j$  в сечении  $i$  определяется в полярных координатах двумя параметрами: радиусом  $r_{ij}$ , то есть расстоянием от оси пряжи до оси волокна, и углом  $\varphi_{ij}$ . Полярный угол  $\varphi_{ij}$  определяется как случайная величина, которая имеет равномерный закон распределения в диапазоне от 0 до  $2\pi$ .

3. Также в каждое сечение пряжи, кроме первого, попадают участки волокон, мигрировавшие относительно своего первоначального положения (рисунок 1). Для описания процесса миграции вводятся следующие случайные величины:

- радиус миграции  $R_M$ , определяющий интенсивность данного процесса и имеющий нормальный закон распределения с заранее заданными параметрами;
- угол миграции  $\varphi_M$ , который определяет направление перемещения участка волокна в каждом последующем сечении. Данная величина распределена по равномерному закону в диапазоне от 0 до  $2\pi$ .

При моделировании миграции также осуществляется проверка нахождения сечения волокна внутри сечения пряжи. На рисунке 1 допустимое положение оси мигрирующего волокна показано сплошной дугой,  $R_{II}$  – радиус пряжи,  $R_B$  – радиус электропроводящего волокна.



**Рисунок 1 – Схема миграции волокон в сечении пряжи**

3. В связи с тем, что текстильные волокна имеют ограниченную длину, для каждого электропроводящего волокна определяется как первое сечение, в котором оно появляется, так и последнее, после которого оно исчезает. Можно считать, что все электропроводящие волокна имеют одинаковую длину  $l_B$ . Количество сечений, в котором каждое волокно присутствует, определяется как целая часть выражения  $\left(\frac{l_B}{\Delta}\right)$ , где  $\Delta$  – расстояние между рассматриваемыми сечениями пряжи.

Представленный алгоритм реализован в системе компьютерной алгебры Maple.

В качестве критерия оценки стабильности свойств пряжи было принято среднее количество контактов, возникающих между электропроводящими волокнами в рассматриваемых сечениях.

В связи со сложностью определения фактической миграции электропроводящих волокон было осуществлено моделирование структуры пряжи линейной плотности 40 текс с вложением 80 % хлопкового волокна и 20 % электропроводящих волокон Векінох линейной плотности 0,9 текс для оценки чувствительности разработанной модели к вариации параметров, характеризующих миграцию.

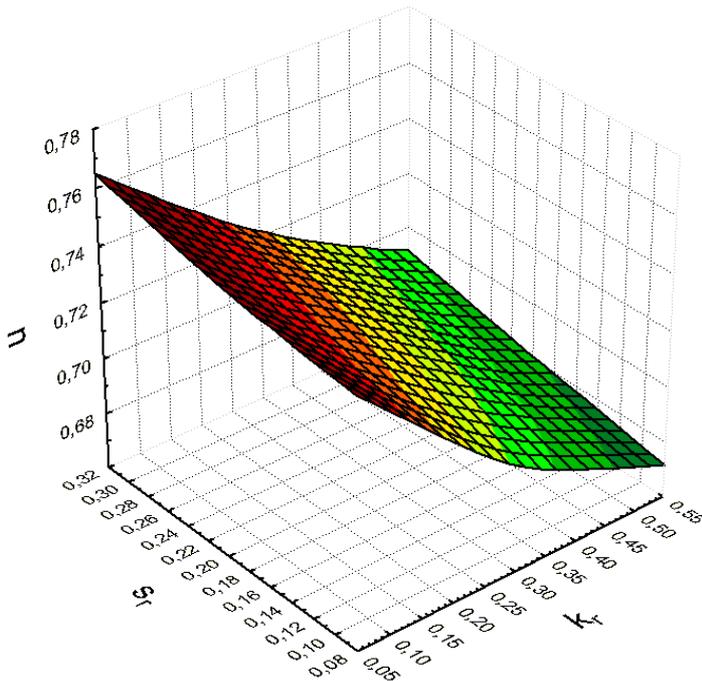
При моделировании средний радиус миграции и его среднее квадратическое отклонение рассчитывались по формулам:

$$R_M = k_r R_{\Pi} \text{ и } \sigma_M = s_r R_M,$$

в которых  $k_r$  и  $s_r$  – коэффициенты пропорциональности, варьируемые при моделировании в следующих диапазонах:

- $k_r$  – от 0,1 до 0,5;
- $s_r$  – от 0,1 до 0,3.

В результате моделирования определялось среднее количество  $n$  контактов, возникающих между электропроводящими волокнами в сечениях пряжи, находящихся на расстоянии 1 см друг от друга.

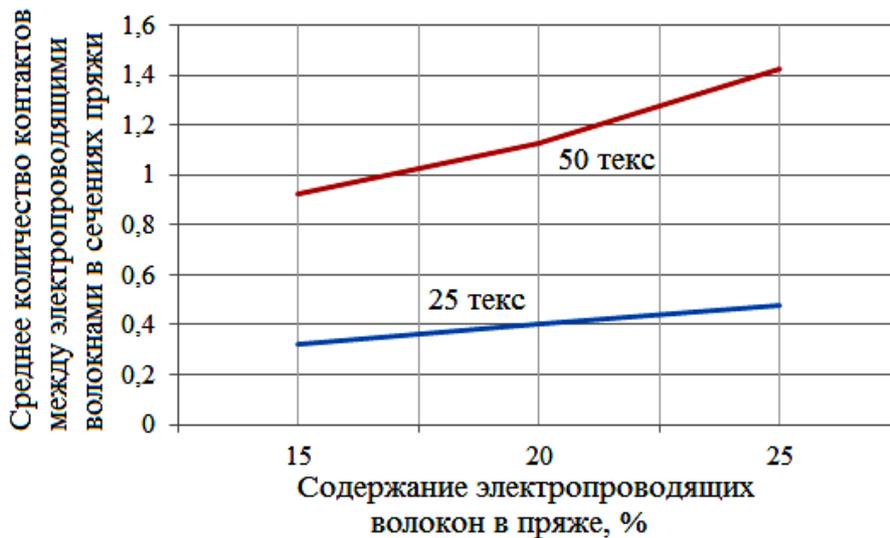


**Рисунок 2 – Влияние коэффициентов  $k_r$  и  $s_r$  на среднее количество контактов  $n$  между электропроводящими волокнами**

Анализируя результаты моделирования, полученные для участка пряжи длиной 50 м и представленные на рисунке 2, можно отметить, что интенсивность миграции, характеризующаяся коэффициентом  $k_r$ , оказывает достаточно существенное влияние на количество контактов между электропроводящими волокнами, что свидетельствует о необходимости экспериментальных исследований данного процесса на следующих этапах работы. При этом модель пряжи имеет малую чувствительность к неравномерности миграции, характеризующейся коэффициентом  $s_r$ .

На рисунке 3 представлено влияние процентного содержания электропроводящих волокон на среднее количество контактов между ними при коэффициентах пропорциональности  $k_r=0,5$  и  $s_r=0,3$ .

Можно отметить, что количество контактов между электропроводящими волокнами повышается с увеличением линейной плотности пряжи и увеличением процентного содержания электропроводящих волокон в пряже.



**Рисунок 3 – Влияние процентного содержания электропроводящих волокон на среднее количество контактов между ними**

Таким образом, разработанная модель является основой для проведения комплексных исследований по оценке влияния структуры и состава пряжи с вложением электропроводящих волокон на свойства пряжи.

Однако необходимо отметить, что чаще всего с вложением электропроводящих волокон производится не одиночная, а крученая пряжа, выработанная в несколько сложений. В связи с этим на следующем этапе будет разработана более сложная модель крученой пряжи. Можно предположить, что количество контактов между электропроводящими волокнами в крученой пряже должно быть больше, чем в одиночной пряже, в связи с тем, что количество контактирующих электропроводящих волокон увеличится в зоне соприкосновения двух скручиваемых стренг, так как эти волокна преобладают в наружном слое одиночной пряжи.

#### **Выводы.**

1. Разработана имитационная модель, позволяющая осуществлять оценку влияния параметров пряжи с вложением электропроводящих волокон на количество контактов, возникающих между ними.

2. Установлено, что количество контактов между электропроводящими волокнами повышается с увеличением их процентного содержания в пряже, линейной плотности пряжи, а также при уменьшении миграции волокон в ее сечениях.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Tao X. Wearable Electronics and photonics. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2005. 205 p.

2. Mattila, H.R. Intelligent textiles and clothing. Cambridge: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2006. 506 p.

3. Baurley, S. Interactive and experiential design in smart textile products and applications // Personal and Ubiquitous Computing, 2004. № 8(3). P. 274-281.

4. Ryklin, D., Medvetski S. Investigation of the technology of conductive yarns manufacturing // 17th World Textile Conference Autex 2017 "Materials Science and Engineering" Corfu: IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/254/7/072021/pdf>.

УДК 66.011

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ 3-D СТРУКТУР ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ВИХРЕВЫХ АППАРАТАХ MODELING 3-D STRUCTURES OF TURBULENT FLOWS IN VORTEX CHAMBERS**

**Александр Сергеевич Белоусов\*, Виктор Викторович Голованов\*,  
Юлия Александровна Геллер\*\*  
Alexander S. Belousov\*, Victor V. Golovanov\*,  
Julia A. Heller\*\***

*\*Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва*

*\*Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art), Russia, Moscow,*

*\*\*Национальный исследовательский университет "МЭИ", Россия, Москва*

*\*\*National research University "MEI", Russia, Moscow*

*(e-mail: as.belousov-2@yandex.ru)*

*Аннотация:* Исследовались поля скоростей и структура течений в вихревом аппарате со встречными закрученными потоками. Получены уравнения инженерной модели расчета эффективности. Установлено хорошее соответствие с экспериментом.

*Abstract:* The velocity field and the flows structure in vortex chamber with counter-swirling flows were studied. The equations of engineering model of calculation of efficiency are received. Good agreement with the experiment was established.

*Ключевые слова:* вихревой аппарат, закрученные потоки, турбулентные течения.

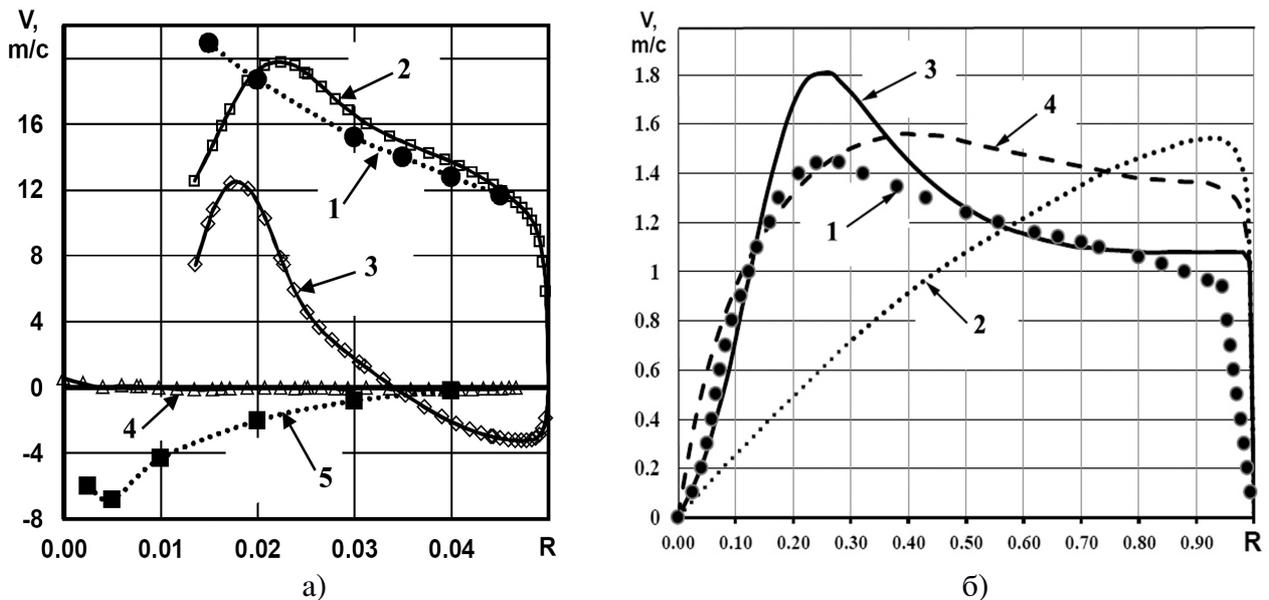
*Keywords:* vortex chamber, swirling flows, turbulent flows.

Технологические процессы, связанные с переработкой пылящих материалов широко применяются во многих отраслях промышленности. Как следствие, задача очистки характеризуется разнообразием пылегазовых выбросов и различными условиями. Это привело к созданию большой номенклатуры пылеочистного оборудования. Экономически наиболее выгодными являются аппараты центробежного разделения газозвесей, которые и являются наиболее распространенным пылеулавливающим оборудованием. В ходе совершенствования циклонов появился новый вид аппаратов защиты атмосферы – вихревые пылеуловители с двумя входами встречных закрученных потоков [1-4]. В первом типе этих аппаратов – вихревых пылеуловителях (ВПУ) второй поток подается сверху через сопла высокого давления. Второй тип этого аппарата называют пылеуловителями со встречными закрученными потоками (ВЗП), в них расход газа обеспечивается одним дутьевым устройством. Наибольшее распространение среди аппаратов ВЗП получила цилиндрическая модель с двумя тангенциальными вводами (ВЗП-2Т) [4], разработанная в МТИ им. А.Н. Косыгина (ныне РГУ им. А.Н. Косыгина).

Испытания аппарата ВЗП-2Т, диаметром 0,4 м. показали его определенные преимущества перед циклоном ЦН-15 [5], однако полноценной модели пространственной гидродинамики аппаратов ВЗП-2Т, с учетом тангенциальных вводов разработано не было. Были попытки создания моделей на основе линеаризованных уравнений Эйлера, однако, в работе [6] показано, что линеаризация не позволяет эффективно прогнозировать закрученные течения. Имеются эксперименты на лабораторной модели аппарата ВЗП-2Т, диаметром 0,1 м. [4], часть которых представлена на рис. 1а.

Вместе с тем, в некоторых работах отмечено, что данные по технологическим характеристикам вихревых пылеуловителей не полностью согласованы [1,7]. Данные по гидродинамике лабораторного эксперимента на модели ВЗП-2Т (диаметром 0,1 м.) также не совсем сходятся по материальному балансу потоков: на 65 % высоты рабочей области при радиусе  $r \approx 0,005$  м. радиальная скорость равна  $V_r \approx -7$  м/с (рисунок 1а). Это должно вызывать появление приосевого столба течения со скоростью порядка 100 м/с. Однако такие структуры не были замечены ни в этой, ни в других моделях вихревых аппаратов. Таким образом, актуальной является задача построения пространственной модели аппарата ВЗП с тангенциальными вводами, и уточнение с ее помощью структурных характеристик гидродинамики и инженерного метода расчета аппарата.

При построении модели закрученного течения важно правильно выбрать модель турбулентности [8-10]. Пакеты прикладных программ вычислительной гидродинамики частности, в частности, примененный в данной работе пакет ANSYS 19.2, предлагают достаточно широкий спектр моделей турбулентности, их вариантов и различных дополнительных функций, однако для конкретных промышленных применений они требуют дополнительной проверки. Рассматриваемая цилиндрическая модель ВЗП с тангенциальными вводами обладает средней степенью закрутки, поэтому для оценки и выбора модели турбулентности была выбрана соответствующая геометрическая модель средней закрутки потока из серии экспериментов лаборатории гидродинамики университета Делфта [11].



а) – аппарат ВЗП, диаметром 100 мм: 1- тангенциальная скорость, эксперимент; 2 – тангенциальная скорость, RSM – модель; 3 – осевая скорость, RSM – модель; 4 – радиальная скорость, RSM – модель; 5 – радиальная скорость, эксперимент.  
 б) – цилиндрический циклон, диаметром 290 мм. [11], распределения тангенциальных скоростей: 1- эксперимент; 2 –  $k$ - $\varepsilon$  модель; 3 – RSM – модель; 4 – RNG-S – модель.

### Рисунок 1 – Расчет радиальных распределений полей скоростей в вихревых аппаратах.

Из набора моделей пакета ANSYS 19.2 нами были исследованы три типа моделей: модель напряжений Рейнольдса (RSM); стандартная  $k$  –  $\varepsilon$  модель; модель ренормализованных групп с учетом вращения потока (RNG-S). Уравнения моделей RSM и  $k$  –  $\varepsilon$  приведены в [4, 8]. Уравнения модели RNG-S имеют вид:

$$\begin{cases} U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial k}{\partial y} \cdot \frac{v_t}{\sigma_k} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial k}{\partial z} \cdot \frac{v_t}{\sigma_k} \right) + G - \varepsilon \\ U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \cdot \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \cdot \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) + c_1 \cdot \varepsilon/k \cdot G - c_2 \cdot \varepsilon^2/k + R_\varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

где  $U$ ,  $V$ ,  $W$  – вектора осредненных скоростей сплошной среды;  $k$  – энергии пульсаций,  $\varepsilon$  – скорость диссипации энергии турбулентности;  $G$  – член, характеризующий генерацию энергии турбулентности под влиянием градиентов средних скоростей;  $R_\varepsilon$  – дополнительный член, учитывающий кривизну течения в RNG-S. Турбулентная вязкость в этой модели определяется из специального дифференциального уравнения [8].

Как следует из рисунка 1б модель RSM наиболее точно описывает эксперимент. Для использования в инженерной модели существенное значение имеет совпадение в расчете и эксперименте важнейшей структурной характеристики – точки максимума тангенциальной скорости. Модель RNG-S лишь качественно и приблизительно описывает эксперимент. Расчет по  $k$  –  $\varepsilon$  модели качественно отличается от экспериментальных данных, особенно положение точки максимума. В работе модель RNG-S использовалась для предварительных оценок, основные расчеты проводились с помощью RSM. На рисунке 1а показано, что расчет тангенциальной скорости для лабораторного аппарата достаточно хорошо совпадает с экспериментом. Такие же результаты получены в работах [9-10]. Вместе с тем, экспериментальные значения радиальной скорости значительно отличаются от расчетных значений. Поскольку расчетные данные радиальной скорости хорошо совпадают с экспериментами на больших аппаратах [12], то были выполнены дополнительные расчеты по проверке векторного трехмерного потока в нескольких сечениях лабораторного аппарата.

Расчетами установлено, что в ВЗП-2Т имеется некоторое смещение оси физического вихря от геометрической оси аппарата. Именно поэтому при экспериментах измеряется не истинная радиальная скорость, а смешанная скорость, содержащая часть компоненты тангенциальной скорости. Интересно, что данное явление можно обнаружить практически только расчетным путем. Уточнена также граница между нисходящим и восходящим потоком,  $\bar{R}_0 = R_0/R = 0,7$ .

Полученные данные о структуре и характеристиках течения были применены при построении инженерной модели расчета пылеулавливания в ВЗП. Общую эффективность улавливания аппарата выражаем в виде:

$$\eta_0 = (1 - K) \cdot \sum_{i=1}^N F_i \cdot \eta_{1,i} + K \cdot \sum_{i=1}^N F_i \cdot \eta_{2,i} \quad (2)$$

где  $F_i$  – фракционный состав пыли на входе;  $\eta_{1,2,i}$  – фракционные эффективности (ФЭУ) каналов,  $K$  – соотношение расходов потоков. Так как установлено, что ФЭУ каналов описываются логарифмически нормальным распределением, то получаем

$$\eta_0 = (1 - K) \cdot F(x_1) + K \cdot F(x_2) \quad (3)$$

где  $F$  – интеграл вероятности, а  $x_1, x_2, d_{1,\eta=50}, d_{2,\eta=50}$ , определяются как

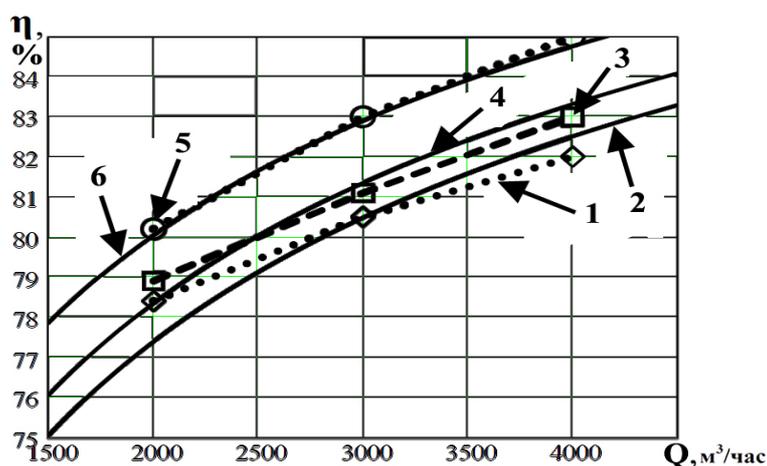
$$x_{1,2} = (\lg d_{50} - \lg d_{1,2,\eta=50}) / \sqrt{(\lg^2(\sigma) + \lg^2(\sigma_{1,2\eta}))} \quad (4)$$

$$d_{\eta_1=50} = \frac{3 \cdot (\bar{d}_1^2 - \bar{d}_2^2) \bar{R}_{in2}}{S_1} \cdot \sqrt{\frac{(1 - K) \ln(\bar{d}_2^2) / ((\bar{d}_1^2 + \bar{d}_2^2) / 2) \mu D}{((1 - k / 2) \bar{d}_0^2 \bar{H} + \bar{H}_1 (1 - k (\bar{d}_1^2 - \bar{d}_2^2))) \rho_m W_\varphi}} \quad (5)$$

$$d_{\eta_2=50} = \frac{0,375 \cdot (1 - \bar{d}_3^2)}{\bar{R}_{in2} S_2} \cdot \sqrt{\frac{(1 - \bar{d}_2^4) \mu D}{(1 - \bar{d}_0^2) \bar{H} K \rho_m W_\varphi}} \quad (6)$$

где  $d_{\eta_1=50}$  – диаметр частиц (мкм), улавливаемых с вероятностью 50%;  $\lg \sigma_{\eta_1}$  – стандартное отклонение функции распределения;  $d_{50}$  – медианный размер частиц пыли со стандартным отклонением  $\sigma$ ,  $\bar{R}_{in2}$  – радиус входа газа в завихритель,  $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3$  – диаметры завихрителя и выхлопной трубы,  $\bar{d}_0$  – диаметр границы раздела потоков,  $\bar{H}$  – высота сепарационной камеры,  $S$  – параметр крутки [9].

На рис.2 представлено сравнение расчетных данных по полученной модели и экспериментов [5]. Эксперименты проводились на кварцевой пыли  $d_{50} = 10$  мкм., при входной запыленности потока  $Z = 5$  г/м<sup>3</sup>. Испытывался пылеуловитель ВЗП-2Т, диаметром 0,4 м. Приведенные на рисунке 2 расходы соответствуют плановой скорости (в сечении цилиндрической части аппарата)  $W_0 = 4 \div 8,85$  м/с. Соотношение расходов потоков  $K = 0,8; 0,75; 0,7$ . Как видно из данных на рисунке 2 у аппаратов ВЗП-2Т очень широкий диапазон скоростей, в отличие от циклонов они не имеют ограничения по максимальной скорости.



1 –  $K=0,7$ ; эксперимент; 2 –  $K=0,7$ ; расчет; 3 –  $K=0,75$ ; эксперимент; 4 –  $K=0,75$ ; расчет;  
5 –  $K=0,8$ ; эксперимент; 6 –  $K=0,8$ ; расчет;

**Рисунок 2 – Зависимость эффективности очистки от расхода газа через аппарат.**

Сравнение с циклоном, диаметром 0,5 м. показало, что эффективность циклона при максимальной скорости  $W_0 = 4$  м/с составляет 81%. Аппарат ВЗП-2Т показывает данную эффективность при трех значениях скорости: 5,0; 6,5; и 7,5 м/с, то есть может обеспечить большую производительность. Как видно из рис.2 имеется также хорошее соответствие между расчетными данными по модели (2-6) и экспериментом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практическая экотехника: электрическая и механическая очистка газов /Под общ. ред. Чекалова Л.В. – Семибратово: «Кондор-Эко», 2008. – 98 с.
2. Hoffmann A.C., Stein L.E. Gas Cyclones and Swirl Tubes. – Berlin Heidelberg New York: Springer. 2008. – 422 P.
3. Сажин Б.С., Гудим Л.И. Вихревые пылеуловители. М.: Химия, 1995. – 144 с.
4. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Т. 1 – Калуга: Изд-во Н. Бочкарёвой, 2003. – 917 с.
5. Сажин Б.С., Гудим Л.И., Галич В.Н. и др. Результаты испытания пылеуловителя со встречными закрученными потоками и циклона ЦН-15 //Химическая промышленность. – 1984. – № 10. – С. 626-627.
6. Гольдштик М.А. Вариационная модель турбулентного вращающегося потока //Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1985. – №9. – с. 22–32.
7. Лазарев В.А. Циклоны и вихревые пылеуловители. Справочник. 2-е изд. перераб. и доп.– Нижний Новгород: Фирма ОЗОН-НН.– 2006.– 320 с.
8. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений.- СПб.: Балт. гос. Техн. ун-т, 2001. - 108 с.
9. Белоусов А.С., Сажин Б.С. Структура потоков в вихревых устройствах // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 5.–с.98-103.
10. Белоусов А.С., Сажин Б.С. Поля скоростей в вихревых аппаратах // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 2.– С. 100-105.
11. Hoekstra A.J., Derksen J.J., Van Den Akker, H. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones //Chemical Engineering Science - 1999, V. 54(13-14). - P. 2055-2065.
12. Белоусов А.С., Сажин Б.С.. Радиальный сток в центробежных пылеуловителях //Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006. – № 4. – С. 96–100.

УДК 66.011

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕАКТОРНОГО БЛОКА  
УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА  
MATHEMATICAL MODELING OF THE REACTOR BLOCK DIESEL FUEL  
HYDROTREATMENT UNIT**

**Наум Александрович Самойлов  
Naum A. Samoilov**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Уфа  
Ufa State Petroleum Technological University, Russia, Ufa  
(e-mail: naum.samoilov@yandex.ru)*

*Аннотация:* в статье приведено математическое моделирование трех обобщенных вариантов конструкции реакторного блока гидроочистки. Показано, что наличие в сырье компонентов органической серы с разными скоростями реакций гидрогенизации приводит в одностадийных схемах с рециркуляцией и без рециркуляции к необходимости использования больших количеств катализатора. Можно снизить загрузку катализатора в реакторный блок за счет предварительного разделения сырья на фракции, отдельно гидрированные в двух реакторах.

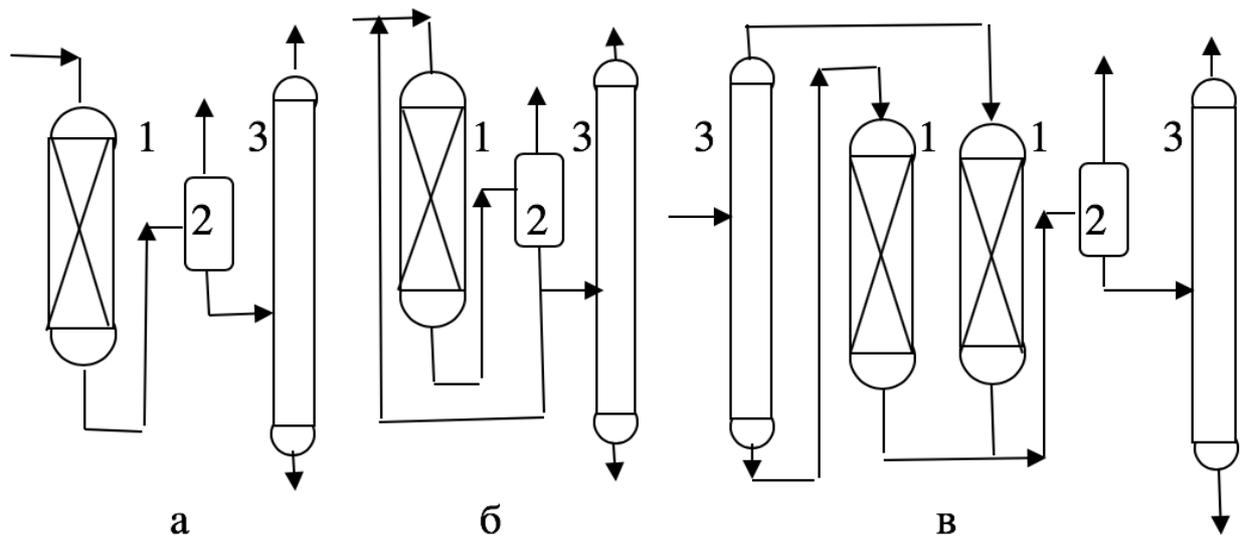
*Abstract:* The mathematical modeling of the three generalized options for the design of the reactor block Hydrotreating unit. It is shown that the presence in the feedstock of organic sulfur components with different velocities of the reactions of hydrogenization results in a one-pot schemes with recirculation and without recirculation to the necessity of using large amounts of catalyst. It is possible to reduce the catalyst loading into the reactor block due to the preliminary separation of raw materials into fractions separately hydrogenated in two reactors.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, гидроочистка, дизельное топливо, катализатор

*Keywords:* mathematical modeling, hydraulic cleaning, diesel fuel, catalyst

Гидроочистка дизельного топлива относится к наиболее крупнотоннажным процессам нефтехимии. Специфика процесса заключается в наличии в сырье – прямогонном дизельном топливе – содержится большое количество разнообразных сераорганических соединений, имеющих различные скорости гидродеобессеривания. Пока невысокие требования к качеству дизельного топлива обеспечивались в одном реакторе за счет снижения содержания общей серы в результате гидроочистки в 5-10 раз, то не играло особого значения то, что различные сераорганические компоненты сырья имеют различную скорость гидрирования, но введение все ужесточающихся нормативов на содержание серы в очищенном дизельном топливе по евростандартам ставит задачу формирования оптимальных по затратам на катализатор схем реакционных блоков гидроочистки.

Все многообразие систем реакционных блоков можно свести к трем принципиальным вариантам (рис. 1). Однореакторный блок является эквивалентом как собственно однореакторной установки, так и систем с последовательным и параллельным соединением реакторов, поскольку задача углубления сероочистки решается за счет увеличения времени реакции за счет большей загрузки катализатора. Однореакторный блок с вводом на рециркуляцию очищенного дизельного топлива предполагает сокращение времени реакции за счет снижения концентрации сераорганических соединений в реакционной зоне. Двухреакторные схемы реакционного блока предполагают раздельное гидрирование разных групп сераорганических компонентов в разных реакторах.



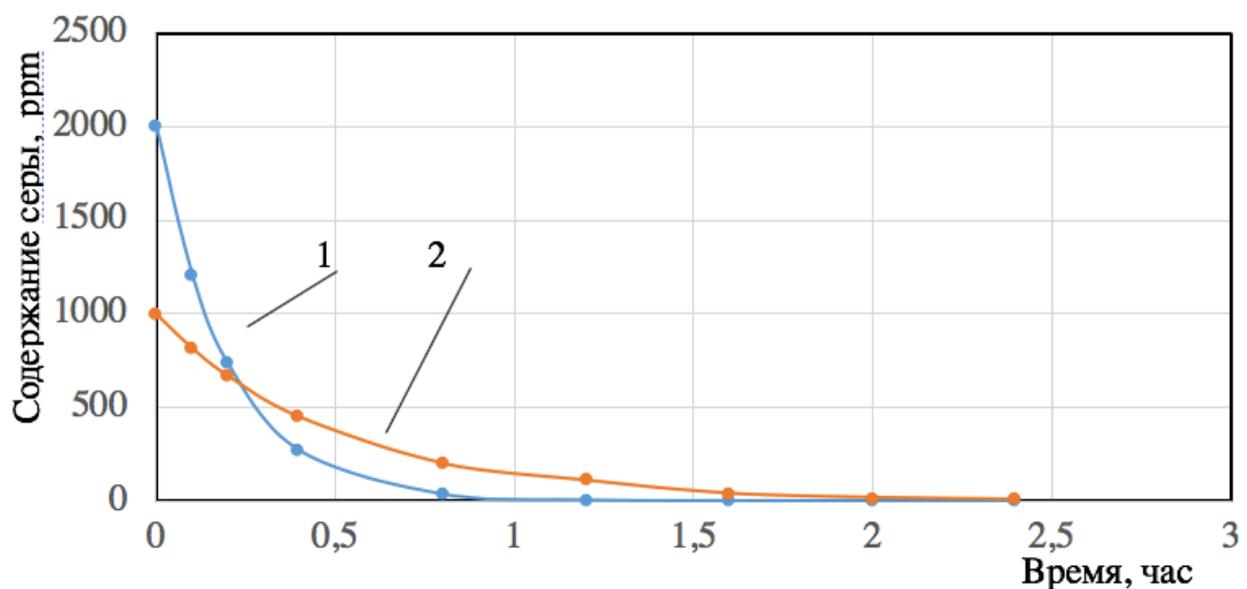
а-однореакторный блок, б- однореакторный блок с рециркуляцией,  
в-двухреакторный блок с разделенным сырьем  
1-реактор, 2-сепаратор, 3 – ректификационная колонна

**Рисунок 1 – Схемы реакторных блоков**

Было выполнено математическое моделирование трех вариантов реализации реакционных блоков при следующих одинаковых исходных данных и допущении квазигомогенности протекания реакций гидродеобессеривания:

- загрузка блока по сырью с содержанием общей серы 3000 ppm – 100 м<sup>3</sup> /ч;
- содержание общей серы в очищенном дизельном топливе 10 ppm ;
- в сырье содержатся две условные группы легко- и трудногидрируемых сераорганических компонентов с константами скоростей реакции соответственно 5 и 2 ч<sup>-1</sup>.

Математическое моделирование единичного реактора показало, что достижение конечной концентрации серы лимитируется прежде всего наличием трудногидрируемых компонентов (рис.2). По мере возрастания концентрации трудногидрируемого компонента в сырье от 0 до 2750 ppm необходимый объем катализатора увеличился с 120 до 290 м<sup>3</sup> .



**Рисунок 2 – Кинетика окисления легкогидрируемых (1) и трудногидрируемых (2) компонентов**

Моделирование одnoreакторной схемы с рециркуляцией очищенного до 10 ppm дизельного топлива показало, что любой вариант ввода рециркулята приводит к увеличению загрузки катализатора в реактор (таблица 1).

**Таблица 1 – Влияние ввода рециркулята на загрузку реактора при концентрации легкогидрируемых компонентов 2000 ppm и общей серы 3000 ppm.**

Объем рецикла, м <sup>3</sup> /ч	Объем катализатора, м <sup>3</sup>	Место ввода рецикла в реактор	Объем рецикла, м <sup>3</sup> /ч	Объем катализатора, м <sup>3</sup>	Место ввода рецикла в реактор
0	240	–	20	264	середина
50	320	верх	10	250	середина
30	284	Верх	50	295	низ
10	252,5	верх	40	279	низ
50	307,5	середина	30	269,5	низ
40	289	середина	20	259	низ
30	277	середина	10	247,5	низ

Оптимальным вариантом компоновки реакционного блока является двухреакторный блок с разделенным вводом сырья в виде концентратов легкогидрируемых и трудногидрируемых компонентов, получаемых предварительной ректификацией исходного дизельного топлива (таблица 2), позволяющий при прочих равных условиях загрузить катализатора в два реактора на 20-80 % меньше, чем в единичный реактор за счет обеспечения оптимальных условий гидроочистки каждой фракции с учетом количественного и качественного ее состава по сераорганическим компонентам.

**Таблица 2 – Загрузка катализатора в реакторы двухреакторной схемы.**

**(в легкой фракции группируются легкогидрируемые, а в тяжелой – трудногидрируемые компоненты)**

Загрузка легкой фракции, м <sup>3</sup> /ч	Сера в легкой фракции 2000 ppm, в тяжелой – 1000 ppm			Сера в легкой фракции 1500 ppm, в тяжелой – 1500 ppm			Сера в легкой фракции 1000 ppm, в тяжелой – 2000 ppm		
	Загрузка катализатора в реакторы, м <sup>3</sup>			Загрузка катализатора в реакторы, м <sup>3</sup>			Загрузка катализатора в реакторы, м <sup>3</sup>		
	первый	второй	в оба	первый	второй	в оба	первый	второй	в оба
20	28	196	224	27	213	240	25	224	249
40	50	156	206	48	168	216	46	177	223
60	72	112	184	69	120	189	63	126	189
80	92	63	155	84	67	151	80	70	150
	В единичном – 240 м <sup>3</sup>			В единичном – 260 м <sup>3</sup>			В единичном – 270 м <sup>3</sup>		

Сформированы принципы деления исходного сырья на две фракции, позволяющие минимизировать загрузку катализатора в два реактора в зависимости от состава сырья.

УДК 539.3:620.193:669

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОЛОГИХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК  
В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД  
DEFORMATION OF GENTLE SPHERICAL SHELLS IN AGGRESSIVE  
ENVIRONMENTS**

**Виолетта Олеговна Кузнецова  
Violetta O. Kuznetsova**

*Тулский государственный университет, Россия, Тула  
Tula State University, Russia, Tula  
(e-mail: kuznecova\_violetta@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрено воздействие агрессивной водородосодержащей среды на сферическую оболочку из титанового сплава. Наглядно показано действие наводороживания на напряжённо-деформированное состояние тонкой пологой сферической оболочки из титанового сплава, нагруженной равномерно-распределённой нагрузкой с использованием нелинейной модели, представленной в нормированных пространствах напряжений.

*Abstract:* The construction of a mathematical model describing the effect of flooding on the stress-strain state of a thin flat spherical shell of a titanium layer loaded with an equidistributed load using a nonlinear model is considered.

*Ключевые слова:* пологая сферическая оболочка, титановый сплав, метод последовательного возмущения параметров, конечные разности, нелинейное деформирование, изотропный материал, большие прогибы.

*Keywords:* flat shell, titanium alloy, finite differences, nonlinear characteristics, isotropic material, large deflections.

Всё чаще инженеры проектируют здания, сооружения, детали машин и аппаратов, которым до сегодняшнего момента не было аналогов. Детали ракет, космических станций и кораблей находятся в постоянном взаимодействии с водородосодержащими средами. В первом приближении такие детали принимаем за пологие сферические оболочки.

Выбранный мною поход к решению задачи о влиянии наводороживания на напряжённо-деформированное состояние пологой сферической оболочки из титановых сплавов представляет собой численный метод, основанный на замене производных разностными схемами. Для решения задачи, обладающей тройной нелинейностью принимаем двухшаговый метод последовательных возмущений параметров В.В. Петрова [6], с помощью которого возможно линеаризовать исходные уравнения.

Рассмотрим тонкие пологие сферические оболочки, у которых отношение стрелы подъема в центре  $f$  к меньшему размеру  $a$  (радиусу) в плане составляет:

$$\frac{f}{a} \leq \frac{1}{5},$$

а отношение толщины оболочки  $h$  к наименьшему радиусу кривизны

$$\frac{h}{R_{min}} \leq \frac{1}{20} \quad (1)$$

Рассматривается упругое равновесие пологой сферической оболочки толщиной  $h$  под действием поперечной осесимметричной равномерно-распределённой нагрузки  $q$  и водородосодержащей среды с концентрацией  $\lambda$ . Срединная поверхность оболочки является частью сферы, характеризуемой радиусом  $R$  (м). Оболочка имеет жесткую заделку по контуру.

Оболочку принимаем достаточно тонкой, такой, чтобы можно было считать справедливыми гипотезы Кирхгофа-Лява [1].

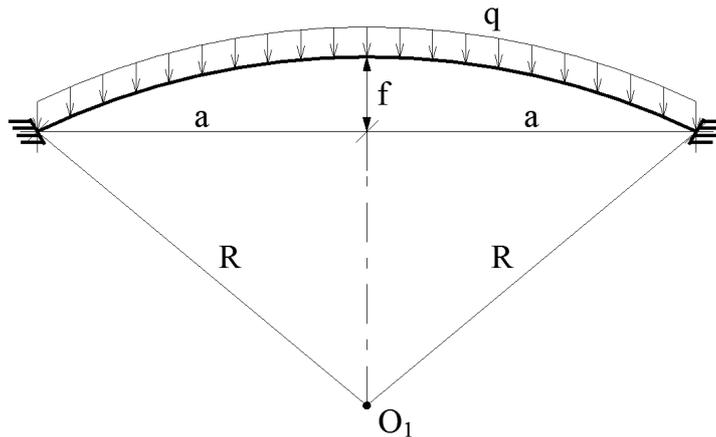


Рисунок 1 – Схема задачи

Рассмотрим оболочку в рамках теории пологих оболочек, в которой используются следующие зависимости:

а) компоненты деформации в срединной поверхности:

$$\varepsilon_r = u_{,r} - kw + 0,5\theta_\varphi^2; \quad \varepsilon_\varphi = \frac{u}{r} - kw \quad (2)$$

здесь  $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$  – радиальные и окружные относительные деформации в срединных поверхностях;  $u, w$  – радиальные перемещения и прогибы;  $k$  – главная кривизна;  $\theta_\varphi = -w_{,r}$  – поворот нормали к срединной поверхности,  $r$  – радиальная координата;

б) компоненты изгибной деформации (кривизны):

$$\chi_r = -w_{rr}; \quad \chi_\varphi = -\frac{w_{,r}}{r} \quad (3)$$

в) компоненты тензора деформаций через параметры деформации  $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$  и кривизны  $\chi_r, \chi_\varphi$  срединной поверхности:

$$e_r = \varepsilon_r + z\chi_r; \quad e_\varphi = \varepsilon_\varphi + z\chi_\varphi \quad (4)$$

где  $z$  – вертикальная координата, отсчитываемая от срединной поверхности оболочки, направленная к центру кривизны.

Подставляя зависимости (2) в (4), получим компоненты тензора деформаций через перемещения и прогибы:

$$\hat{a}_r = u_{,r} - kw + 0,5w_{,r}^2 - zw_{,rr}; \quad e_\varphi = \frac{u}{r} - kw - z\frac{w_{,r}}{r}$$

Усилия и моменты находим через напряжения традиционным способом:

$$N_r = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r dz; \quad N_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi dz;$$

$$M_r = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r z dz; \quad M_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi z dz;$$

Моменты и усилия запишутся следующим образом:

$$M_r = K_{11}\varepsilon_r + K_{12}\varepsilon_\varphi + D_{11}\chi_r + D_{12}\chi_\varphi,$$

$$M_\theta = K_{21}\varepsilon_r + K_{22}\varepsilon_\varphi + D_{21}\chi_r + D_{22}\chi_\varphi,$$

$$N_r = C_{11}\varepsilon_r + C_{12}\varepsilon_\varphi + K_{11}\chi_r + K_{12}\chi_\varphi ;$$

$$N_\theta = C_{21}\varepsilon_r + C_{22}\varepsilon_\varphi + K_{21}\chi_r + K_{22}\chi_\varphi, \quad (5)$$

где

$$\tilde{N}_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) dz; K_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z dz; D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z^2 dz;$$

Использование тех или иных определяющих соотношений не приводит к изменению уравнений статико-геометрической природы [2]. Внутренние усилия и моменты в срединной поверхности при  $z = 0$ , и условия  $zk \ll 1$  модифицируют уравнения равновесия для пологих сферических оболочек следующим образом:

$$\begin{aligned} M_{r,rr} - M_{\varphi,r}/r + 2M_{r,r}/r + k(N_r + N_{\varphi}) + N_r w_{,rr} &= -q; \\ N_{r,r} + (N_r - N_{\varphi})/r - k[M_{r,r} + (M_r - M_{\varphi})/r] &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Используя условия равновесия (6), а также выражения для усилий и моментов получим систему двух нелинейных дифференциальных уравнений относительно функций  $u$  и  $w$ .

Следуя двухшаговому методу последовательного возмущения параметров В.В. Петрова [6], запишем выражения для приращений деформаций срединной поверхности:

$$\delta \varepsilon_r = \delta u_{,r} - k \delta w + w_{,r} \delta w_{,r}; \quad \delta \varepsilon_{\varphi} = \frac{\delta u}{r} - k \delta w \quad (7)$$

Тогда приращения кривизн срединной поверхности примут вид:

$$\delta \chi_r = -\delta w_{,rr}; \quad \delta \chi_{\varphi} = -\frac{\delta w_{,r}}{r} \quad (8)$$

Используя формулы (7) – (8), получим выражения, связывающие приращения деформаций и перемещений с учётом изменения концентрации водорода во времени:

$$\delta e_r = \delta u_{,r} - k \delta w + w_{,r} \delta w_{,r} - z \delta w_{,rr} + \delta \lambda; \quad \delta e_{\varphi} = \frac{\delta u}{r} - k \delta w - z \frac{\delta w_{,r}}{r} + \delta \lambda \quad (9)$$

Уравнения связи деформаций с напряжениями приняты в линеаризованной форме, представленной через нормированные напряжения с учётом влияния водородосодержащей среды

$$\delta e_r = \frac{\delta e_r}{\delta \sigma_r} \delta \sigma_r + \frac{\delta e_r}{\delta \sigma_{\varphi}} \delta \sigma_{\varphi}; \quad \delta e_{\varphi} = \frac{\delta e_{\varphi}}{\delta \sigma_r} \delta \sigma_r + \frac{\delta e_{\varphi}}{\delta \sigma_{\varphi}} \delta \sigma_{\varphi}; \quad (10)$$

$$\delta N_r = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_r dz; \quad \delta N_{\varphi} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_{\varphi} dz; \quad (11)$$

$$\delta M_r = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_r z dz; \quad \delta M_{\varphi} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_{\varphi} z dz;$$

где  $\delta N_r, \delta N_{\varphi}$  – приращения усилий в срединной поверхности оболочки,  $\delta M_r, \delta M_{\varphi}$  – приращения моментов.

Получим зависимости приращений усилий и моментов от приращений перемещений:

$$\begin{aligned} \delta N_r &= C_{11}(u_{,r} - k \delta w + w_{,r} \delta w_{,r} - z \delta w_{,rr}) - \\ &- K_{11} \delta w_{,rr} + C_{12} \left( \frac{\delta u}{r} - k \delta w - z \frac{\delta w_{,r}}{r} \right) - K_{12} \frac{\delta w_{,r}}{r} \\ \delta N_{\varphi} &= C_{12}(u_{,r} - k \delta w + w_{,r} \delta w_{,r} - z \delta w_{,rr}) - \\ &- K_{12} \delta w_{,rr} + C_{22} \left( \frac{\delta u}{r} - k \delta w - z \frac{\delta w_{,r}}{r} \right) - K_{22} \frac{\delta w_{,r}}{r} \end{aligned} \quad (12)$$

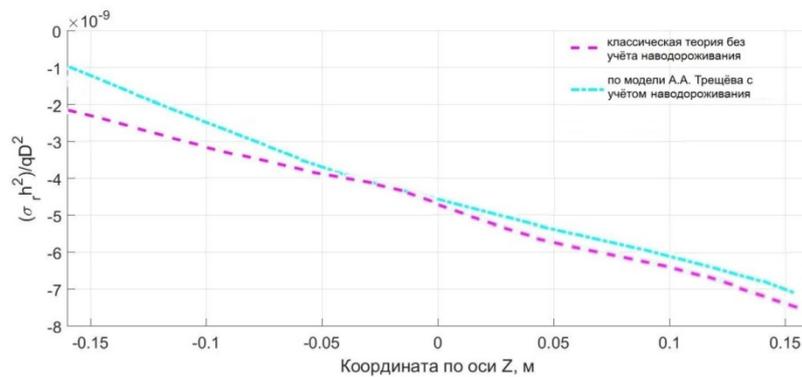
$$\begin{aligned} \delta M_r &= K_{11}(u_{,r} - k\delta w + w_{,r} \delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) - \\ &- D_{11} \frac{\delta w_{,r}}{r} + K_{11} \left( \frac{\delta u}{r} - k\delta w \right) - D_{12} \frac{\delta w_{,r}}{r} \\ \delta M_\varphi &= K_{12}(u_{,r} - k\delta w + w_{,r} \delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) - \\ &- D_{12} \delta w_{,rr} + K_{22} \left( \frac{\delta u}{r} - k\delta w \right) - D_{22} \frac{\delta w_{,r}}{r} \end{aligned} \quad (13)$$

Запишем в приращениях уравнения равновесия пологой сферической оболочки, воспринимающей нагрузку в виде равномерно распределённого давления, учитывая пренебрежения членами второго порядка малости и выше:

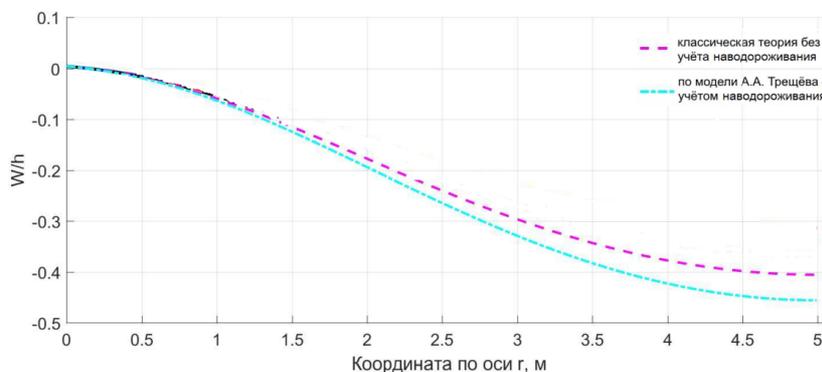
$$\begin{aligned} \delta M_{r,rr} - \delta M_{\varphi,r} / r + 2\delta M_{r,r} / r + k(\delta N_r + \delta N_\varphi) + \delta N_r w_{,rr} + N_r \delta w_{,rr} &= -\delta q \\ \delta N_{r,r} + (\delta N_r - \delta N_\varphi) / r - k[\delta M_{r,r} + (\delta M_r - \delta M_\varphi) / r] &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Сравним полученные результаты с результатами И.Г. Овчинникова и Л.А. Кирилловой [4], при получении которых использовались простейшие физические соотношения [8].

Сравнивая в программном комплексе MATLAB полученные решения по модели А.А. Трещёва [6-8] с результатами по теории И.Г. Овчинникова [4-5], можно провести следующий анализ:



**Рисунок 2 – Напряжения  $\sigma_r$  в точке 1/2 диаметра оболочки (по толщине)**



**Рисунок 3 – Прогибы в оболочке**

На рисунке 3 показано, что расхождение в значениях максимальных прогибов с учетом и без учета наводороживания значительное и составляет 16,5 %, напряжений – до 50%.

На основе проведённого исследования можно сделать вывод, что решение задач с применением классических теорий механики деформируемого твердого тела не позволяет обеспечить должную безопасность конструкций, выполненных из изотропных материалов. Учет зависимости деформационных и прочностных характеристик от степени насыщения водородом вносит значительные поправки в результаты определения напряжённо-деформированного состояния сферических оболочек из титановых сплавов, а поэтому необходим для получения достоверных результатов расчета.

Большинство известных методик расчета для материалов с приобретенной разнсопротивляемостью [6-8] имеют ряд недостатков: к ним относятся накладываемые ограничения на характеристики материалов и недостаточная точность аппроксимации экспериментальных данных при сложных видах напряженного состояния.

Учет воздействия водородосодержащей среды в данной работе был построен на основе нелинейных определяющих соотношений, учитывающих наведённую чувствительность к виду напряжённого состояния [8]. Произведено построение математической модели задачи о влиянии наводороживания на НДС пологой сферической оболочки и приведено численное решение задачи с иллюстрацией прогибов, перемещений и напряжений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амбарцумян, С.А. Основные уравнения теории упругости для материалов, разнсопротивляющихся растяжению и сжатию / С.А. Амбарцумян, А.А. Хачатрян // Инж. журнал МТТ. – 1966. – № 2. – С. 44-53.

2. Астафьев В.И., Ширяева Л.К. Накопление повреждённости и коррозионное растрескивание металлов под напряжением / В.И.Астафьев, Л.К.Ширяева. – Самара: Изд-во Самарский университет, 1998. 123 с.

4. Кириллова Л.А., Овчинников И.Г. О деформировании гибкой круглой пластины из материала, чувствительного к водородному воздействию / Саратов. политехн. ин-т. – Саратов, 1989. – 15 с. Рукопись деп. в ВИНТИ 7 февраля 1990, № 698 – В90.

5. Овчинников, И.И. Модифицированная модель деформирования и разрушения материала, подвергающегося облучению // Строительная механика и расчёт сооружений, 2014. №1 С. 29-35.

6. Петров, В.В. Теория наведенной неоднородности и ее приложения к проблеме устойчивости пластин и оболочек / В.В. Петров, В.К. Иноземцев, Н.Ф. Синева. - Саратов: Саратов. госуд. технич. ун - т, 1996. - 311с.

7. Трещев, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной и наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения: монография. - М.; Тула; РААСН; ТулГУ, 2016. - 236 с.

8. Трещев, А.А. Теория деформирования и прочности материалов, чувствительных к виду напряжённого состояния. Определяющие соотношения: Монография. — М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2008. — 264 с.

УДК 621.928.93

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ АЭРОДИНАМИКИ ИНЕРЦИОННЫХ  
ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА МЕТОДОМ  
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**  
**MODELING OF INTERNAL AERODYNAMICS OF INERTIAL DUST SEPARATORS  
FOR DEVICES OF LAYER-BASED SYNTHESIS BY THE METHOD OF SELECTIVE  
LASER MELTING**

**Олег Иванович Седляров, Елена Сергеевна Бородина, Анна Павловна Полиэфтова,  
Михаил Павлович Тюрин, Ольга Сергеевна Моргун**  
**Oleg I. Sedlyarov, Elena S. Borodina, Anna P. Polyeftova, Mihail P. Tyurin, Olga S. Morgun**

*Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва  
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow  
(e-mail: 7730719@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрены некоторые особенности современных установок послойного синтеза, использующих метод селективного лазерного плавления, приведены результаты моделирования внутренней аэродинамики инерционных пылеуловителей.

*Abstract:* Some features of modern devices of layer-based synthesis using the method of selective laser melting are considered, the results of modeling the internal aerodynamics of inertial dust separators are presented.

*Ключевые слова:* установки послойного синтеза, селективное лазерное плавление, пылеулавливание, инерционные пылеуловители.

*Keywords:* devices of layer-based synthesis, Selective Laser Melting (SLM), inertial dust separators.

Одним из базовых элементов Индустрии 4.0 является аддитивное производство. Как прогнозируют мировые промышленные лидеры и эксперты [1] к 2030 году более 60% всей изготавливаемой продукции в мире будет производиться с напечатанными комплектующими, а к 2030-2050 гг. в ряде производственных отраслей 3D печать позволит печатать полностью готовую продукцию. Пионерами рынка стали США, Япония, страны Западной Европы, включая Германию, Великобританию, Францию и ряд других стран. В каждой из них есть свои сложившиеся лидеры - производители 3D-принтеров. Значительную активность проявляют Южная Корея, Израиль и Китай, который своей скоростью освоения новых технологий вызывает опасение традиционного лидера высокотехнологичных направлений в мире – США [1].

В России существуют организации, занимающиеся проектированием и производством промышленных металлопорошковых установок, работающих по технологиям селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting – SLM). SLM-технологии являются одними из самых перспективных, обеспечивающих высокую точность и повторяемость, характеристик изделий, напечатанных на 3D-принтере. Сравнимой технологией может быть литьё, сокращающее массы изделия и экономию материала.

Обеспечение высокого качества готовых изделий связано, в том числе, с качеством инертной газовой среды, циркулирующей в рабочей камере принтера. Как правило, в качестве инертной газовой среды используются азот или аргон. Инертная среда обеспечивает удаление из рабочей камеры частичек порошков и продуктов их взаимодействия с лазерным излучением. Для поддержания качества инертной среды необходимо осуществлять очистку циркулирующей газовой смеси от твердых частиц.

Для очистки газов от твердых включений широкое применение находят пылеулавливающие аппараты инерционного типа, например циклоны. Для подбора и расчета конкретного циклона необходимо знать расход газа, подлежащего очистке; его плотность, температуру и динамическую вязкость в рабочих условиях; плотность пыли, ее дисперсный состав, а также исходную запыленность газа и требуемую степень очистки.

Проведя анализ исходных данных для подбора и расчета циклона для установок послыйного синтеза, использующих метод селективного лазерного плавления можно отметить следующее:

- возможно использование различных металлических порошков. В современных установках используется около двадцати материалов различной плотности, включая нержавеющие стали, инструментальные сплавы, никелевые, алюминиевые, титановые сплавы, цветные металлы и другие.

- металлические порошки имеют разный размер сферических гранул (от 4 до 80 мкм) и дисперсный состав;

- расход газа может меняться плавно или ступенчато в определенном диапазоне;

- печать происходит при высокой температуре и избыточном давлении в рабочей камере.

Дополнительные ограничения накладываются на геометрические размеры пылеулавливающего аппарата и место его расположения в установке.

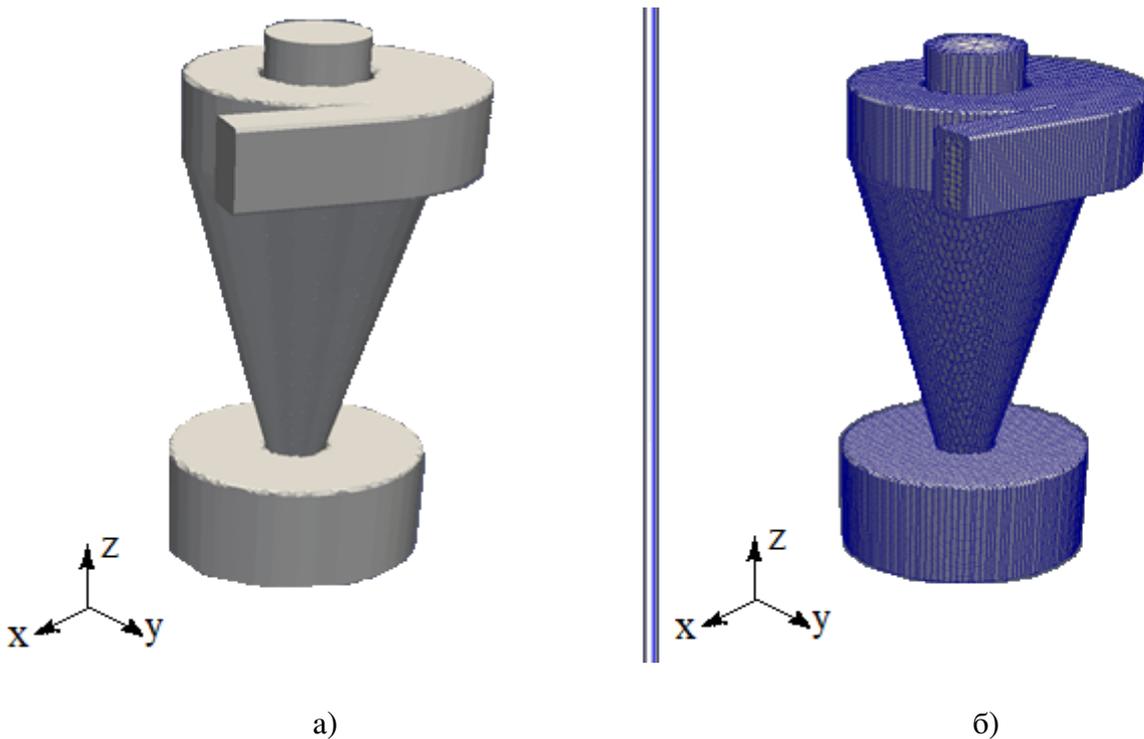
Сейчас не существует методик, обеспечивающих расчет и подбор инерционных пылеуловителей (циклонов) в соответствии с указанными требованиями. Разработка такой методики является актуальной научной задачей, имеющей практическую значимость.

На начальном этапе исследования были проведены оценочные расчеты для определения минимального размера частиц, улавливаемых аппаратом циклонного типа, обеспечивающего улавливание пыли различной плотности (от 2,7 до 8,6 г/см<sup>3</sup>), соответствующей плотности металлических порошков сплавов алюминия, никеля, титана и железа и размера сферических гранул (от 10 до 60 мкм) при различных расходах и температуре инертной газовой смеси. В результате расчетов полученные значения минимального размера частиц, улавливаемых циклоном, составят от 2,9 до 7,6 мкм при различных режимах эксплуатации установки.

На следующем этапе исследований была разработана 3D модель и расчетная сетка, представленные на рисунке 1. Для создания геометрической модели была использована CAD платформа Salome [2], а для расчетной сетки программа SnappyHexMesh [3].

Основная задача данного этапа исследований состояла в изучении внутренней аэродинамики инерционного пылеуловителя, для чего решалась система нестационарных дифференциальных уравнений, включающая в себя уравнение состояния, уравнения сохранения массы и количества движения (импульса), уравнения переноса, определяемые соответствующими физическими моделями (например, моделями турбулентности и другими) с соответствующими начальными и граничными условиями, позволяющими однозначно определить условия задачи.

В настоящее время для численного решения систем дифференциальных уравнений в частных производных широко применяются три основных метода: метод конечных разностей, метод конечных (контрольных) объемов и метод конечных элементов. Первый из них метод конечных разностей (Finite Difference Method – FDM), основанный на замене производных конечными разностями.



а) объемная геометрическая модель; б) расчетная конечно-объемная сетка.

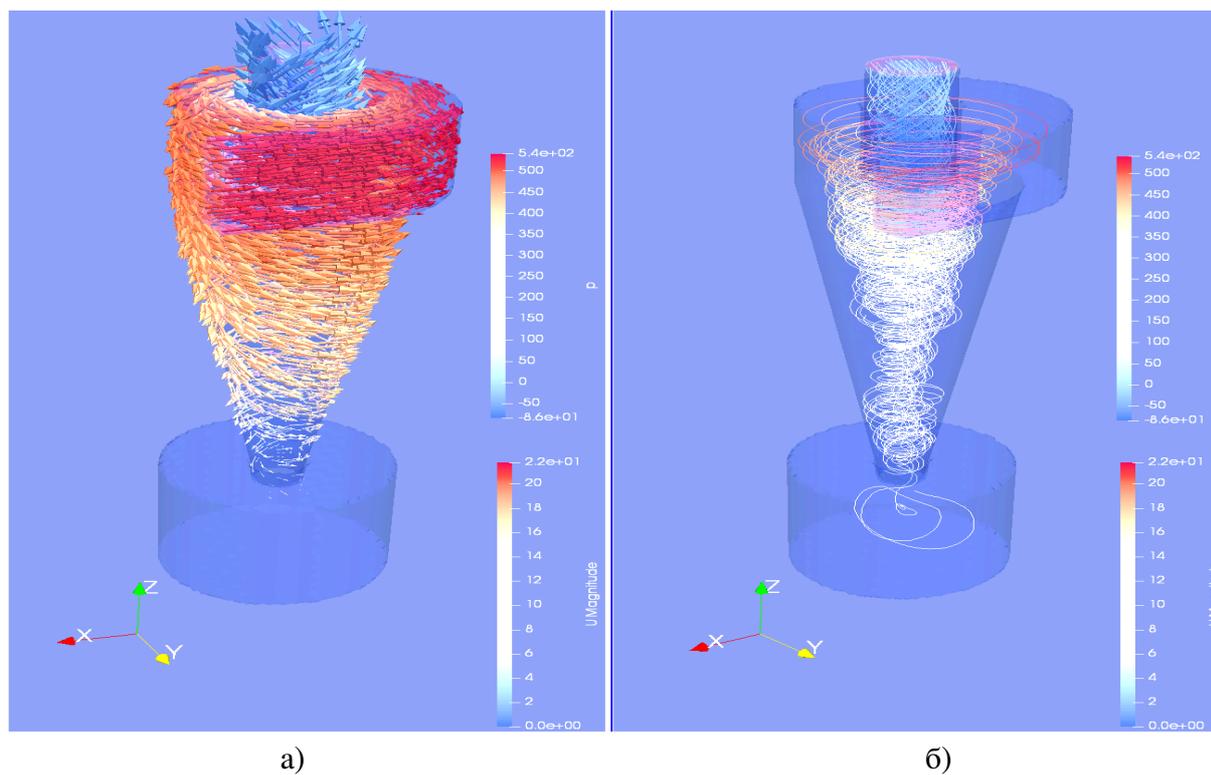
**Рисунок 1 – Модель инерционного пылеуловителя.**

Второй метод – метод конечных или контрольных объемов (Finite Volume Method – FVM) состоит в разбиении исследуемой области расчетной сеткой на совокупность замкнутых объемов. Для каждого из таких объемов должны выполняться вышеперечисленные законы сохранения. Все изменения в контрольном объеме происходят только за счет потоков через поверхности, ограничивающие данный контрольный объем или за счет их генерации внутри этого объема. Решение уравнений переноса ищется в узлах, которые расположены, как правило, в центрах контрольных объемов. Третий метод – метод конечных элементов (Finite Element Method – FEM) состоит в разбиении расчетной области на конечное число подобластей (конечных элементов) и заданием аппроксимирующей функции внутри каждого элемента. Коэффициенты аппроксимирующих функций выражаются через значение функций в узлах элементов. Таким образом, получается система алгебраических уравнений в которой число неизвестных равно количеству уравнений [4].

Для решения поставленной задачи был использован программный пакет OpenFOAM [5, 6], представляющий собой свободно распространяемый инструментальный, предназначенный для решения задач вычислительной гидродинамики [4].

Анализ, обработка и визуализация результатов расчетов, а именно скоростей движения газового потока внутри аппарата, изменений давления и характеристик турбулентности осуществлялись в программе Paraview [7]. На рисунке 2 представлены некоторые возможности современных систем визуализации научных данных.

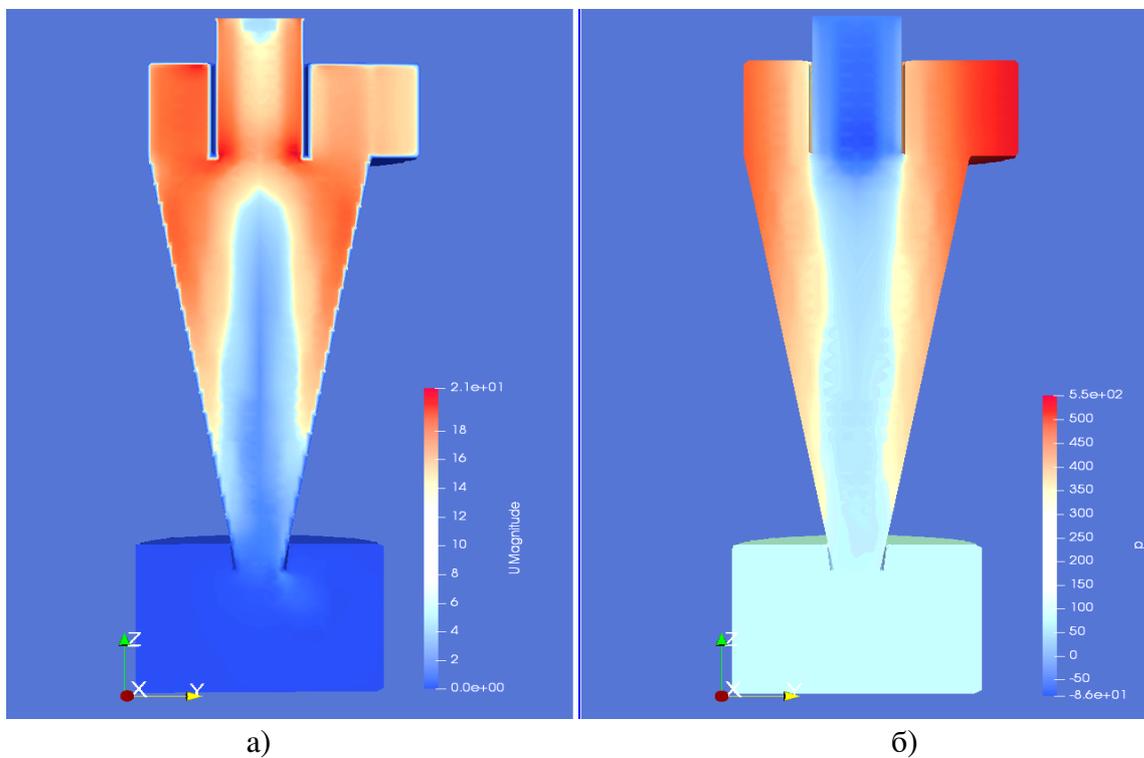
На рисунке 2 а) длина вектора характеризует модуль скорости течения, направление вектора – направление течения, а цвет – давление в соответствующей точке аппарата, а на рисунке 2 б) показаны линии тока, а цвет характеризует давление.



а) векторное поле; б) линии тока

**Рисунок 2 – Характеристики поля течения внутри аппарата.**

На рисунке 3 представлены характеристики течения (скорость и давление) в вертикальном сечении аппарата.



а) скорость; б) давление

**Рисунок 3 – Характеристики поля течения внутри аппарата**

В результате данного исследования был осуществлен полный цикл моделирования внутренней аэродинамики сухих инерционных пылеуловителей. Данный подход был реализован с использованием свободного программного обеспечения, начиная от использования операционной системы (Linux Ubuntu) и заканчивая прикладным программным обеспечением: Salome для создания 3D модели аппарата; snappyHexMesh для создания расчетной сетки; OpenFOAM для проведения расчетов и Paraview для анализа, обработки и визуализации результатов.

За рамками данного исследования был оставлен наиболее важный процесс – процессы пылеулавливания. Учитывая, что в современных установках, работающих по технологиям селективного лазерного плавления, может быть использовано около двадцати видов материалов различной плотности, включая нержавеющие стали, инструментальные сплавы, никелевые, алюминиевые, титановые сплавы, цветные металлы и другие со сферическими гранулами размером от 4 до 80 мкм и разным дисперсным составом, результатам исследования процесса пылеосаждения планируется посвятить отдельную статью.

Другим важным вопросом, не рассмотренным в данном исследовании, является вопрос оптимизации конструкции аппарата и режимов течения для обеспечения максимальной эффективности процесса пылеулавливания при значительном изменении широкого спектра параметров, характеризующих процессы в современных и перспективных установках послыйного синтеза методом селективного лазерного плавления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитический отчет J'son & Partners Consulting «Рынок 3D печати в России и мире (Аддитивное Производство, АП / Additive Manufacturing, AM), 2018» [http://json.tv/ict\\_telecom\\_analytics\\_view/rynok-3d-pechati-v-rossii-i-mire-additivnoe-proizvodstvo-ap-additive-manufacturing-am-2018-g-20190117060056](http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/rynok-3d-pechati-v-rossii-i-mire-additivnoe-proizvodstvo-ap-additive-manufacturing-am-2018-g-20190117060056)
2. Salome: // [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.salome-platform.org/>
3. SnappyHexMesh: [Электронный ресурс]. // URL: <https://openfoamwiki.net/index.php/SnappyHexMesh>
4. Седяров О.И., Гуторова Н.В, Куранова С.В., Моргун О.С., Барабаш А.В., Полиэфтова А.П. Численное моделирование процессов пылеулавливания в сухих гравитационных и инерционных пылеуловителях с использованием свободного программного обеспечения [Текст] // Дизайн и технологии. – 2018. – №67 (109). – С.81-87.
5. OpenFOAM : [Электронный ресурс]. // URL: <https://www.openfoam.com/>
6. The OpenFOAM Foundation: OpenFOAM: // [Электронный ресурс]. - URL: <https://openfoam.org/>
7. ParaView: // [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.paraview.org/>

УДК 628.54:66.011

**МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД  
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ  
QUALITY MANAGEMENT METHODS OF WASTEWATER TREATMENT OF  
INDUSTRIAL COMPANY**

**Альбина Гизяровна Валеева, Маргарита Юрьевна Вождяева  
Albina G. Valeeva, Margarita Yu. Vozhdaeva**

*\*Уфимский государственный нефтяной технический университет –УГНТУ,  
Россия, Уфа*

*\* Ufa State Petroleum Technological University – USPTU, Russia, Ufa  
(e-mail: albina.valeeva.1995@mail.ru, vozhdaeva@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрены технологии по очистке сточных вод, применяемые в настоящее время. Приведены примеры технологий, вошедших в список наилучших доступных технологий, и критерии их отбора. Выделены основные подходы для управления качеством очистки сточных вод промышленного предприятия.

*Abstract:* The technologies of wastewater treatment used at the present time are considered. Examples of technologies included in the list of the best available technologies and criteria for their selection are given. The main approaches for quality management of industrial wastewater treatment are identified.

*Ключевые слова:* сточные воды, технология, очистка, математическое моделирование, нейронные сети

*Keywords:* wastewater, technology, purification, mathematical modeling, neural networks

Образование сточных вод характерно для подавляющего большинства технологических процессов, используемых в промышленности. Степени очистки сточных вод в последнее время уделяется большое внимание, особенно в свете ужесточения нормативов, определяющих их качество. Устаревшие технологии водоочистки не всегда справляются с нагрузкой, оказываемой на них производствами. Решением проблемы является внедрение современных технологий или повышение эффективности имеющихся за счет частичной модернизации технологии, более точного подбора технологических режимов, введения процессов предочистки и др.

С целью обобщения эффективных, доступных и опробованных технологий для очистки сточных вод Директивой Европейского Совета «О комплексном контроле и предотвращении загрязнения» сформулировано и введено понятие «наилучшие доступные технологии» (НДТ) [5]. НДТ – это наиболее передовые, современные и эффективные разработки, обуславливающие целесообразность применения конкретных технологий с целью минимизации или предотвращения пагубного воздействия на окружающую среду [5]. В России разработаны информационно-технические справочники (ИТС), представляющие собой документ национальной системы стандартизации, утвержденный федеральным органом исполнительной власти в сфере стандартизации (Росстандартом). Справочники, освещающие НДТ и рекомендуемые их к использованию в различных отраслях, включают описание методов, технологий, подпроцессов, оборудования, эколого-экономической эффективности использования технологии, производственного экологического контроля, процессно-интегрированные решения и иные данные.

Предпочтение отдается решениям, интегрированным в технологический процесс, позволяющим более полное удаление загрязняющих веществ в ходе реализации основной стадии очистки, например, удаление азота и фосфора в аэротенках (и им подобных методов), по сравнению с доочисткой воды. Применение доочистки должно рассматриваться как НДТ только в ограниченных ситуациях строгой охраны водных объектов. Во всех других

ситуациях использование в проекте подпроцессов доочистки эквивалентно нанесению ущерба водным объектам в результате нехватки средств, неэффективно потраченных на данном объекте, для получения базового эффекта на другом объекте.

В работе представлен обзор методов, направленных на повышение эффективности технологии очистки сточных вод промышленного предприятия.

Методом, включенным в список НДТ, является очистка сточной воды от неэмульгированных нефтепродуктов в нефтеловушках с последующей тонкой очисткой на коалесцентных фильтрах, сорберах. Имеется технология с анаэробной биологической очисткой воды в биореакторах с удержанием биомассы и очисткой в биореакторах-смесителях [6].

Разработана технология по обработке сточных вод импульсным электромагнитным полем. При воздействии электрического поля с частотой 2 кГц и напряженностью электрического поля 35-50 кВ/см, происходит разрушение мембран биологических клеток микроорганизмов в сточной воде, что ускоряет предварительную очистку и обеззараживание воды, а также позволяет избежать применения химических обеззараживающих агентов, например, хлорсодержащих [4]. В работе Белевцева А.Н. [2] предложена технология с применением молотого брусита – минерала, представляющего собой природный гидрооксид магния, который обладая щелочными свойствами, может быть использован для нейтрализации кислых сточных вод. В работе показано, что молотый брусит является эффективным реагентом также для удаления из воды ионов тяжелых металлов, включая цинк, железо и медь. Достоинством предложенного подхода является стабилизация величины рН, даже в случае передозировки реагента, что говорит о значительном преимуществе молотого брусита над традиционными агентами (известь, доломит, алюмосиликаты).

В ряде случаев эффективность используемых промышленных технологий можно повысить путем оптимизации режимов и вводимых доз реагентов. Для этих целей могут быть использованы методы математической статистики и моделирования, которые с их широким охватом являются актуальным инструментом для управления и прогнозирования. Преимуществом использования методов математического моделирования является возможность учета взаимодействия между различными факторами, отражающими качество обрабатываемой воды, что позволяет делать прогнозы и оптимизировать технологию в нужном направлении. Так, автором [1] для оценки и прогнозирования состояния активного ила, осуществляющего очистку сложных сточных вод, предложен экспресс-метод контроля качества обрабатываемой воды, который базируется на сочетании химического, биологического и регрессионного анализа. Оценку состояния активного ила проводили в момент смешения с водой и после 19 часов аэрации, при условии индивидуального и совокупного воздействия на биомассу контрольных поллютантов и химического потребления кислорода (ХПК). После ряда исследований, включающих гидробиологический анализ активного ила, определение основных нормативных показателей сточных вод и активного ила (содержание фенолов и этиленгликоля, биологическое потребление кислорода, определение мутности, дозы ила, рН), была проведена статистическая обработка результатов исследования. В качестве математической модели использовано уравнение регрессии в виде полиномиальной зависимости второго порядка функции нескольких переменных, которая обеспечивает качественную интерполяцию широкого набора различных данных:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{i=j+1}^k b_{ji} x_j x_i + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2$$

где  $y$  – количественная оценка состояния активного ила, баллы;  $x_i$  – исходное состояние биоагента, баллы;  $x_j x_i$  – концентрации приоритетных экофакторов, мг/дм<sup>3</sup>;  $x_j$  – продолжительность аэрации, ч.,  $b_0$  – свободный член,  $b_i, b_{ji}, b_{jj}$  – параметры данного полинома.

Учитывая возможность проявления эффекта синергизма, в работе проведена математическая обработка обобщенных данных по биодиагностике активного ила при одновременном проявлении возмущающего воздействия двух контрольных экофакторов (ХПК/неиногенные поверхностно-активные вещества (нСПАВ), фенол/ХПК, фенол/нСПАВ), что позволило оценивать восстановительный потенциал активного ила.

В работе [3] предложен аппаратный комплекс, в которой рассчитываются данные сформированной математической модели процесса биологической очистки воды. При этом данные измерений дают возможность не только идентифицировать математическую модель биологической очистки и произвести ее настройку, но и осуществлять полноценный мониторинг очистки сточных вод предприятий. Идентифицированная математическая модель позволяет рассчитывать сценарные варианты влияния солей металлов на жизнеспособность бактерий в процессе биологической очистки.

Примеры использования регрессионного анализа в управлении качеством очистки сточных вод свидетельствуют о возможности применения и нейросетевого моделирования, позволяющего выявить множество нелинейных связей между компонентами сложной системы, которой являются сточные воды предприятия. На сегодняшний день это является перспективным направлением, так как появляется возможность самоанализа поступающей информации и выявления в ней различных зависимостей. Нейронная сеть (НС) – математическая модель, построенная по принципу организации биологических нейронных сетей. Каждый нейрон НС имеет дело с сигналами, которые получает, и сигналами, которые он посылает другим нейронам. Соединенные в большую сеть с управляемым воздействием, НС способны выполнять довольно сложные задачи. Авторами [7] рассматривается проблема перелива воды через плотину и ее размыва в связи с метеорологическими условиями. Входящими параметрами являлись – среднемесячные осадки, уровень испарения и уровень воды в водохранилище. Выходная переменная – уровень воды в другом водохранилище. НС с архитектурой 3-10-10-1 показала оптимальные результаты. В последующем, чтобы проверить и подтвердить качество данной архитектуры построено две НС на различных временных сериях. По данным с 1992 года по 2002 год объем обучающей выборки составил 60 образцов, а объем тестовой выборки – 5 образцов. Используя данный метод, авторы сделали прогноз уровня воды в водохранилище с точностью на период равный 5 месяцам и вывод об эффективности использования НС при планировании мер по защите качества окружающей среды и прогнозировании экстремальных ситуаций. Аналогичная проблема решается в работе [10]. Входящим параметром был назначен уровень воды в реке Томь со сдвижкой во времени 2 и 3 суток, выходящим – уровень воды реки Обь. В ходе обучения и работы НС было установлено время добегания от створа одной реки до замыкающего створа другой. НС позволила выполнить прогноз среднесуточных уровней воды в половодье с заблаговременностью 2 суток. В работе В. Н. Штепа [8] для управления комбинированными системами водоочистки и улучшения быстроты реагирования на изменения поведения объектов управления рассматривается использование сценария управления на основе когнитивно-сценарных моделей и алгоритмов с применением интеллектуальных механизмов – создание нейросетевого блока оптимизации функционирования нечетких когнитивных карт (НKK). Сперва создается структура НKK для определения сценариев работы оборудования исходя из экспериментальных исследований и анализа предприятий. После выбора элементов матрицы взаимовлияния НKK дается оценка типовым и возможным значениям параметров качества воды, происходит их группирование и формируется адекватная НС для расчета значений параметров НKK систем водоочистки с последующим использованием самоорганизационных карт Кохонена, выполняющих сжатие данных. С помощью прикладных программ происходит синтез НС Кохонена, адекватность которой подтверждается оценкой относительной среднеквадратичной ошибки. После расчета значений весовых коэффициентов НKK с использованием вероятностных НС решается задача выбора данных коэффициентов в режиме реального времени. Используемые НС позволяют повысить функциональную эффективность НKK комбинированных систем водоочистки за счет адаптации в режиме

реального времени в зависимости от влияния различных факторов. В работе [9] решается задача, связанная с процессом очистки питьевой воды от геосмина. Разработка математической модели базируется также на построении НС. Входными параметрами являлись параметры, влияющие на органолептические свойства воды, а в качестве выходного – концентрация геосмина в питьевой воде. После нескольких итераций с отбрасыванием показателей, имеющих наименьшую значимость, было выделено 6 наиболее значимых параметров и создана двухслойная НС. В результате обучения НС и регрессионного анализа получена формула нейрорегрессии:

$$y = 3,314 + 0,875x_1 - 0,101x_2 + 0,064x_3 - 0,650x_4 + 1,520x_5 + 0,010x_6,$$

где  $y$  – концентрация геосмина в питьевой воде;  $x_1$  – марка активированного угля;  $x_2$  – мутность, мг/дм<sup>3</sup>;  $x_3$  – цветность, град.;  $x_4$  – концентрация хлоридов, мг/дм<sup>3</sup>;  $x_5$  – биологическое потребление кислорода, мгО/дм<sup>3</sup>;  $x_6$  – концентрация сине-зеленых водорослей, тыс.кл/см<sup>3</sup>.

Достоверность разработанной модели подтверждена с помощью критерия Фишера. Показано, что значения уравнения регрессии на основе НС точно описывают изменение концентрации геосмина в объекте и в дальнейшем могут быть использованы для прогнозирования и подбора оптимальных параметров для очистки воды. Предложенный алгоритм является примером успешного применения математического моделирования для решения задач повышения эффективности очистки воды от индивидуальных загрязнителей.

### Выводы

Методы управления качеством очистки сточных вод промышленного предприятия разнообразны и развиваются в трех основных направлениях: внедрение технических решений, направленных на оптимизацию отдельных стадий процесса; повышение точности и экспрессности контроля; математическое моделирование процесса, устанавливающее взаимосвязи между компонентами системы и позволяющее прогнозировать эффективность процесса. Для успешной реализации последнего подхода необходимым условием является наличие статистического материала, собираемого в ходе проведения долгосрочного мониторинга в различные периоды времени и при разных условиях реализации технологии водоочистки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балымова Е.С. Экспресс-метод контроля для управления процессом биологической очистки сточных вод нефтехимического комплекса: на примере ОАО «Казаньоргсинтез»: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2015. 18 с.
2. Белевцев А.Н., Байкова С.А., Жаворонкова В.И. Оценка эффективности применения молотого брусита «Аквимаг» в технологиях очистки воды // Энергосбережение и водоподготовка. 2008. № 1. С. 34-35.
3. Кудрявцев В.А. Современный аппаратный комплекс для получения информации о чистоте воды // Сборник трудов десятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности. 2010. С. 179-186.
4. Кузнецов Ю. Н. Новая технология очистки промышленных сточных вод // Энергия: экономика, техника, экология. 2008. №1. С. 52-62.
5. Council Directive 96/61/EC of 24 September 1996 concerning integrated pollution prevention and control URL: <http://www.eur-lex.europa.eu>. (дата обращения 18.03.2019).
6. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 47-2017 «Системы обработки (обращения) со сточными водами и отходящими газами в химической промышленности» URL: [https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/NDT/sprav\\_NDT\\_2017](https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/NDT/sprav_NDT_2017) (дата обращения 24.03.2019).

7. Коробицын Б.А. Якшина Н.В. Нейросетевое моделирование динамики изменения уровня воды в водоеме-хранилище радиоактивных отходов // Вестник Южно-Уральского Государственного университета. 2006. № 7. С. 260-263.

8. Штепа В.Н. Оптимизация функционирования нечетких когнитивных карт с использованием нейронных сетей (на примере управления процессами водоочистки) // Вестник гомельского государственного технического университета им. П.О. 2016. №4. С. 97-105.

9. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Математическая модель определения концентрации геосмина в питьевой воде // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. №1. С. 59-60.

10. Земцов В. А. Применение нейронных сетей для прогнозирования среднесуточных уровней воды в реках (на примере рек Обь и Томь) // Современные проблемы географии и геологии. 2017. Т. 1. С. 368-370.

УДК 658.513.1

**БЛОКЧЕЙН КАК РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ  
В ОТРАСЛЕВЫХ ПРОЕКТАХ (СТРОИТЕЛЬСТВО)  
THE BLOCKCHAIN AS RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY  
IN INDUSTRY PROJECTS (CONSTRUCTION)**

**Сергей Николаевич Буликов\*, Ярослав Эдуардович Тендер\*\*  
Sergey N. Bulikov\*, Yaroslav Ed. Tender\*\***

*\*Ярославский государственный технический университет, Россия, Ярославль*

*\*Yaroslavl state technical University, Russia, Yaroslavl  
(e-mail: sbulikov@ya.ru)*

*\*\*Ярославский дом науки и техники, Россия, Ярославль*

*\*\*Yaroslavl house of science and technology, Russia, Yaroslavl  
(e-mail: dnit\_yar@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрена возможность применения технологии блокчейн (ТБЧ) в строительстве, как современного средства контроля выполнения плана и устранения нецелевых затрат ресурсов. В таком аспекте ТБЧ является гарантом криптографической адекватности плановых и фактических показателей проекта. Выявлен ряд барьеров этому процессу. Предложены пути возможного снижения некоторых из этих барьеров.

*Abstract:* The possibility of using blockchain technology (TBC) in construction as a modern means of controlling the implementation of the plan and eliminating non-target costs of resources is Considered. In this aspect, TBC is the guarantor of the cryptographic adequacy of the planned and actual indicators of the project. A number of barriers to this process have been identified. The ways of possible reduction of some of these barriers are offered.

*Ключевые слова:* адекватность плановых и фактических показателей строительства, технология блокчейн как инструментарий ресурсосбережения, унифицированное наименование и компьютерное кодирование частных строительных потоков.

*Key words:* adequacy of planned and actual performance of construction, the blockchain technology as the instrumentation of resource-saving, unified name and computer coding of elemental construction flows.

Строительство, как отрасль экономики, требует особенно пристального внимания к соответствию плановых и фактических календарных, стоимостных и финансовых показателей отраслевых проектов. Такая постановка проблемы обусловлена масштабами строительства, объемами его информационного обеспечения и сопровождения, особенностями строительной продукции, организации строительного производства и отраслевого ценообразования. Невозможность успешного решения названной проблемы

соответствия приводит к плачевным результатам. Приведем здесь лишь некоторые. Так, стадион «Зенит-Арена» (г. С-Петербург); строительство велось в течение 11 лет (2006 – 2017 г.г.); плановая стоимость работ возрасла в 5,85 раза, с 6,7 до 39,2 млрд.руб.; доказанные хищения - более 700 млн.руб. Стадион «Арена Балтика» (г. Калининград); срок строительства 2015-2018 г.г.; плановая стоимость работ возрасла в 1,57 раза, с 11,0 до 17,3 млрд.руб.; доказанные хищения составляют более 752 млн.руб. Космодром «Восточный» (Амурская обл.); срок строительства 2011-2016 г.г.; на май м-ц 2016 г. освоено 84 млрд.руб.; с 2014 г. возбуждено более 140 уголовных дел; доказанные хищения составляют более 10 млрд.руб. Московская обл., г. Реутов, мкр «Новокосино-2» к.16; долевое строительство; 2011 г. – начало продаж квартир; 2016 г. – остановка работ; нецелевое расходование средств дольщиков – 3 млрд.руб.; застройщик находится в процедуре банкротства [1]. Подобные примеры по субъектам РФ находятся повсеместно. Обманутым дольщикам требуются госбюджетные компенсации.

Данное положение сложилось ввиду некачественного информационного обеспечения и сопровождения строительных проектов, предоставляющих в этой связи широкие возможности безнаказанного хищения денежных средств и материальных ценностей в строительном производстве – таблица 1.

**Таблица 1 - Широко распространенные способы хищений в строительстве**

Хищения денежных средств	Хищения материальных ценностей
1 Искусственное методическое завышение в проектно-сметной документации (ПСД) и актах приемки объемов и стоимости работ (норм расхода ресурсов; единичных расценок, прямых затрат, накладных расходов и прибыли)	1 Завышение норм расхода и неправильное определение реально требуемых объемов материалов
2 Включение в ПСД дополнительных работ, осуществление которых не требуется	2 Завышенное списание потерь материалов при их приемке и хранении
3 Указание в ПСД более тяжелых условий выполнения работ, ведущих к их удорожанию	3 Пересортица и завышение цен материалов
4 Искусственное разделение комплексных работ на составные части. Дублирование работ в отчетах	4 Неправильное определение объема материала при пересчете в разных измерителях. Обман получателей.
5 Неверное указание в ПСД частных признаков работ, ведущих к их удорожанию	5 Завышение количества материалов на временные здания и сооружения
6 Неправильное применение различных удорожающих коэффициентов и ценовых индексов	6 Неприходование материалов
7 Использование фиктивных документов на оплату труда и создание теневых ФОТ	7 Завышения объема материалов в объемах готовой продукции
8 Незаконные манипуляции с наличными подотчетными суммами	8 Списание материалов по завышенным нормам
9 Двойная бухгалтерия и незаконное премирование	9 Соккрытие не использованных и возвратных материалов с их последующей реализацией
	10 Прямые хищения материалов

Приведенные способы хищений, наряду с соответствующими коррупционными рычагами, обуславливают перманентное расхождение плановых и фактических календарных, стоимостных и финансовых показателей в строительстве, ввиду низкокачественного информационного сопровождения строительного производства. Так, среди действующих в

отрасли форм первичной учетной и отчетной документации только «Общий журнал работ» (ф.КС-6) и «Журнал учета выполненных работ» (ф.КС-6а) отражают фактическое движение денежных средств. Фактическое движение материальных ценностей отражает «Отчет о расходе материалов в строительстве» (ф.М-29), который является основанием для списания материалов на себестоимость продукции и сопоставления плановых (сметных) и фактических материальных затрат, а также «Материальный отчет» (ф.М-19), содержащий сведения по фактам поступлений и отпусков материалов на производство.

Названные формы КС-6, КС-6а, М-29 и М-19 не являются смарт-документами, заполняются «вручную» и всемерно связаны с низким качеством пообъектной проектно-сметной документации (ПСД). Очевидно, что повышение качества информационного обеспечения (ПСД и договорная работа), а также информационного сопровождения (учет и отчетность) строительного производства, занимают лидирующее место в решении проблемы соответствия плана и факта в отрасли. Текущее состояние этой проблемы, на примере ярославского узла сосредоточенного строительства, отражают наши данные, представленные в таблицах 2 и 3.

**Таблица 2 – Календарные показатели строительства (Ярославль, 2007-2016 г.г.)**

Направления строительства	Кредитный позитив		Кредитный негатив	Форс-мажор
	Соответствие плановых и фактических сроков (факт = план) %	Сокращение плановых сроков (факт < план) %	Превышение плановых сроков (факт > план) %	Проблемные объекты («долгострой») %
Жилища	18	нет	66	16
Спорт. объекты	30	9	50	11
Дошкольные учреждения	нет	нет	67	33
Мед. учреждения	нет	нет	25	75
Образование, отдых, развлечения	30	нет	40	30
Объекты нефтехимии	50	25	25	нет

**Таблица 3 – Текущие ценовые показатели строительства**

Показатели (наименование статей затрат)	Удельный вес (доля) показателей, %			
	В плановой цене			В фактической цене
	Базисно-индексной	Ресурсной	Твердой договорной	
Сметная стоимость, всего	77,83	95,02	103,00	100,00
Сметная себестоимость	71,61	88,39	93,89	91,32
Сметная прибыль	6,22	6,63	9,11	8,68
Накладные расходы	12,49	12,90	16,94	19,18
Прямые затраты	59,11	75,49	73,95	72,15
Основная з/плата	9,38	10,15	10,09	10,06
Эксплуатация машин/механизмов с ФОТ механизаторов	7,06	6,47	7,94	6,83
Материалы, всего	42,67	58,87	55,92	55,26

Таблица 2 показывает, что плановые и фактические сроки строительства совпадают довольно редко. Таблица 3 констатирует наличие в отрасли множества методов расчета и различие стоимостных и ценовых параметров продукции. В целом, таблицы 1, 2 и 3 констатируют противоречие сложившейся строительной практики развитию механизмов отраслевого кредитования. Таблицы также раскрывают низкую привлекательность строительства для частных инвесторов. При этом низкое качество информационного обеспечения и сопровождения отраслевых проектов занимает немаловажное место.

Учитывая слабость информационной составляющей социально-экономических проектов, Президент РФ своим Указом от 9 мая 2017 г. N 203 утвердил Государственную Стратегию развития информационного общества на 2017- 2030 годы. Правительство РФ своим Распоряжением от 28.07.2017 N 1632-р утвердило государственную программу "Цифровая экономика Российской Федерации» на период 2017 – 2024 г.г. С 1 июля 2019 г. вступает в действие N 214-ФЗ от 30.12.2004, предусматривающий отказ от долевого финансирования в пользу банковского, с использованием банковских эскроу-счетов. Изучение названных документов показывает, что важнейшей целью цифровой экономики является соответствие плановых и фактических показателей отраслевых проектов. Существующая невозможность такого соответствия мощно тормозит экономическое развитие и конкурентоспособность РФ.

В этой ситуации следует обратить внимание на новый программный продукт - электронную технологию блокчейн (ТБЧ), специально созданную для ЗАЩИТЫ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ (ЦИФРОВЫХ ДОКУМЕНТОВ) от несанкционированного доступа и воздействий (различных злонамеренных изменений, искажений, добавлений, удалений). Такую возможность ТБЧ предоставляет посредством форм своего существования и оригинального инструментария. ТБЧ существует как одноранговая (peer-to-peer) цепь (chain) информационных блоков (block); эластичная сеть параллельных вычислительных систем - майнеров в интернете; распределенная программная платформа майнинга; распределенный реестр транзакций; база данных (big data); публичная и криптографически достоверная история («единный файл») транзакций. Инструментарий ТБЧ - хеширование, асимметричное и гибридное шифрование, электронно-цифровая подпись (ЭЦП), метка времени и метка токена транзакций, а также тотальная проверка транзакций эластичной сетью параллельных вычислительных систем - участников блокчейн [2]. Отраслевое использование ТБЧ способствует устранению хищений в строительстве посредством криптографически достоверного соответствия плановых и отчетных (фактических) транзакций, благодаря повышению качества информационного обеспечения и сопровождения строительного производства.

Однако, отраслевому применению ТБЧ сегодня препятствует целый ряд разнородных барьеров (см. таблицу 4). Проблема их устранения может быть разрешена только комплексно, силами соответствующего ряда заинтересованных организаций и специалистов, при поддержке структур властной вертикали. Не целостный, «половинчатый» подход не решит проблему, но дискредитирует гениальную идею блокчейн.

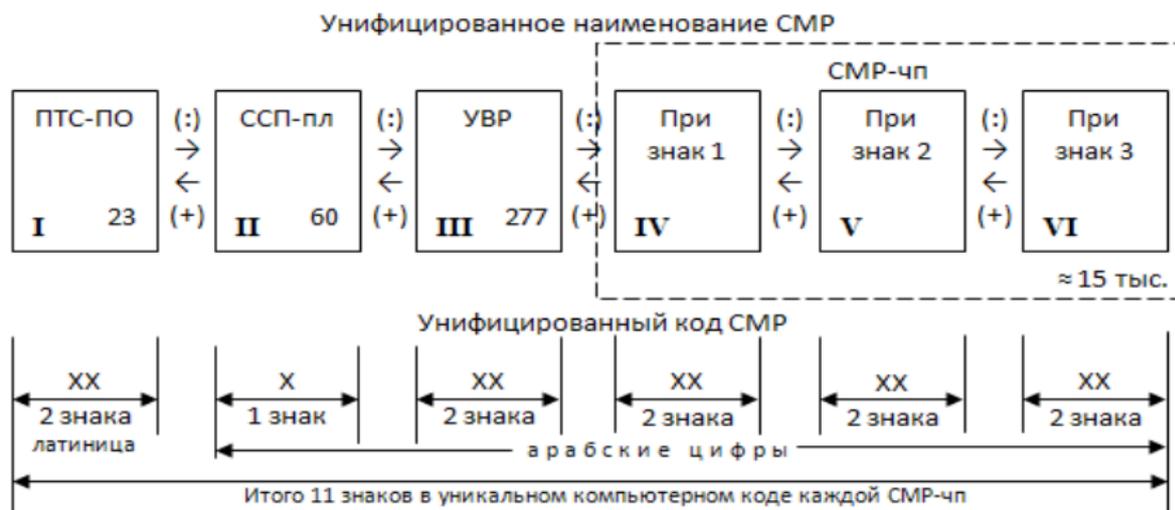
Среди существующих, самым сложным препятствием отраслевому применению ТБЧ выступают «императивные» барьеры, как эффект дистрибутивной (распределительной) модели экономического развития с ее гиперцентрализованным и монополизированным хозяйственным механизмом. Детальная гибридность и доминирование силовых и политических методов управления такого хозмеханизма с его необходимыми всеобъемлющими приписками, обуславливает недоступность и недостоверность любой информации. Дистрибутивный хозмеханизм изначально непримиримо антагонистичен соответствию плана и факта.

**Таблица 4 – Существующие барьеры отраслевому применению ТБЧ**

Природа барьеров	Виды проявления	Возможные пути снижения
Информационные барьеры	Слабость организационно-технологической подготовки производства	Унификация наименования и компьютерного кодирования производственных процессов
	Низкая обоснованность заданных (плановых, договорных) показателей	Целенаправленная модернизация отраслевой нормативной базы и ценообразования
	Перманентные корректировки, изменения, искажения заданных показателей на практике	Внедрение смарт-документации
Организационные барьеры	Линейно-функциональная организация объектных подрядных строительных комплексов (ОПСК)	Матричная (проектная) организация ОПСК
Правовые барьеры	Нецелевое использование и мнимый дефицит ресурсов, в т.ч. финансовых, обманутые дольщики	Банковское финансирование проектов. Эскроу-счета
	Обычное несоответствие плана и факта в отраслевых проектах	Институт фьючерсных сделок и смарт-контрактов
	Тотальные хищения и коррупция в управлении проектами	Отказ от базисно-индексного метода определения ценовых параметров строительства
	Низкая исполнительная дисциплина подрядчиков	Институт финансового поручительства участников проекта
Трудовые барьеры	Недостаточная компьютерная грамотность исполнителей	Образовательные программы и материальная база учебных заведений
Технические барьеры	Слабое программное обеспечение управления	Распространение отраслевых блокчейн

Соотношение элементов дистрибутивной и генеративной (созидательной) модели экономического развития с ее децентрализованным и кооперированным хозмеханизмом требует отдельного исследования. Однако представляется, что такие атрибуты генеративного хозмеханизма как детальная однородность, публичность и криптографическая достоверность информации, наряду с доминированием экономических методов управления, дают широкие возможности реального соответствия плана и факта. Поэтому конструирование генеративной модели развития строительной отрасли вполне достойно постоянного пристального внимания ученых и практиков.

В сферу научных интересов авторов входят информационные и организационные барьеры отраслевому применению ТБЧ. Предложенные в свое время а) схема унификации наименования и компьютерного кодирования производственных процессов; б) соответствующая модернизация отраслевой нормативной базы и строительного ценообразования; в) матричная (проектная) организация объектных подрядных стройкомплексов [3], [4] особенно актуальны в эпоху цифровой экономики и ТБЧ. Предлагаемая схема добавляет к частным признакам СМР-чп, имеющимся в отраслевой нормативной базе (информационные блоки IV-VI), необходимые организационные атрибуты этого частного стройпоточка: ПТС-ПО; бригада (звено)-исполнитель; ведущая машина/механизм или «профилирующий» материал (информационные блоки I-III) – см. рисунок 1 и таблицу 5.



ПТС-ПО – профиль технологической специализации низовой подрядной организации;  
 ССП-пл – специализированный строительный поток – «поточная линия»; УВР – укрупненный вид работ; СМР-чп – строительно-монтажная работа – частный строительный поток;  
 I – IV – информационные блоки

**Рисунок 1 – Схема унификации наименования и компьютерного кодирования строительно-монтажных работ**

**Таблица 5 - Пример компьютерного кодирования частных строительных потоков (СМР-чп)**

Требующие освоения фронта работ	ПТС-ПО	Бригада (звено)-исполнитель	Шифр ГЭСН, ФЕР	Код и наименование СМР-чп	Содержание кода СМР-чп
Заполнение каркаса здания стенами	<b>GO -</b> общестроительные работы	<b>GO2 –</b> Возведение коробки бескаркасных зданий, устройство стен и перегородок каркасных зданий	08-01-001-08	<b>GO201030101-</b> Кладка стен с облицовкой кирпичом с одной стороны и проемов при высоте этажа до 4 м	GO201- кладка стен GO20103 – с облицовкой кирпичом с одной стороны GO2010301 – стен и проемов GO201030101- при высоте этажа до 4 м

**Вывод.** ТБЧ, при условии ее отраслевого применения, можно рассматривать как энергоресурсоэффективный инструмент в аспекте снижения нецелевых затрат ресурсов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кого судили за хищения при строительстве "Зенит-Арены". Досье // Дело "Зенит-Арены" // <https://tass.ru/info/3788531>; Стадион стоит, а дело его идет. Газета "Коммерсантъ" №116 от 05.07.2018, стр. 5; При строительстве космодрома Восточный украли еще 7,6 миллиона рублей// <https://ria.ru/20180118/1512852430.html>; Обманутые дольщики #214ФЗ #обманутыедольщики // <https://www.facebook.com/pg/16korpusNK2/posts/>

2. *Тапскотт Д.* Технология блокчейн: то, что движет финансовой революцией сегодня /Дон Тапскотт, Алекс Тапскотт; [пер.с англ. К.Шашковой, Е.Ряхиной]. М.: Эксмо, 2018. 448с.
3. *Буликов С.Н.* Методология совершенствования системы управления инвестиционно-строительными проектам. Дис. ... докт. экон. наук. СПб.: ГИЭУ, 2005. 232 с.
4. *Буликов С.Н.* Развитие механизмов кооперирования и кредитования в строительстве: Монография / С.Н.Буликов, М.В.Лысанова, В.Д.Сухов. Ярославль: ЯГТУ, 2011. 224 с.

УДК 658.5.011

**ПОВЫШЕНИЕ РОЛИ МАРКЕТИНГА В ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТАХ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ  
IMPROVING THE ROLE OF MARKETING IN INVESTMENT PROJECTS OF  
INDUSTRIAL ENTERPRISES**

**Ирода Ньматиллоевна Хамроева\*, Хамробек Ражаббоевич Худойкулиев\*\*  
Iroda N. Khamroeva\*, Khamrobek R. Khudoykuliev\*\***

*\*АО "O'ZLITINEFTGAZ", Узбекистан, Ташкент*

*\*JSC "O'ZLITINEFTGAZ", Uzbekistan, Tashkent*

*\*\*Банковско-финансовая академия Республики Узбекистан, Узбекистан, Ташкент*

*\*\*The Banking and Finance Academy of the Republic of Uzbekistan, Uzbekistan, Tashkent  
(e-mail: irish\_bs@mail.ru)*

*Аннотация.* В статье рассматриваются аспекты исследования маркетинговой деятельности в области управления инвестиционными проектами предприятий АО «Узбекитон темир йуллари». Авторами раскрыта сущность инвестиционного маркетинга, представлены элементы маркетингового комплекса применительно к предприятиям, ставившим для себя целью привлечение инвесторов и эффективно управлять инвестиционными проектами. Представлены наиболее привлекательные отрасли железных дорог для привлечения инвестиций, обсуждаются возможности применения маркетинговых технологии в условиях реализации инвестиционных проектов при формировании финансово экономической политики предприятий АО «Узбекитон темир йуллари» на современном этапе. Определены основные направления разработки и оценки маркетингового потенциала инвестиций для создания новых сфер производства и сфер обслуживания, реконструкции и обновлении имеющихся отраслей железнодорожного транспорта.

*Abstract:* The article discusses aspects of the study of marketing activities in the field of investment project management of enterprises of Uzbekiton Temir Yollari JSC. The authors disclosed the essence of investment marketing, presented the elements of the marketing complex in relation to enterprises that set themselves the goal of attracting investors and effectively managing investment projects. The most attractive branches of the railways for attracting investments are presented, the possibilities of applying marketing technologies in the context of implementing investment projects when forming the financial and economic policies of enterprises of Uzbekiton Temir Yollari JSC at the present stage are discussed. The main directions of development and assessment of the marketing potential of investments for the creation of new areas of production and services, reconstruction and updating of existing railway transport sectors are identified.

*Ключевые слова:* инвестиционный маркетинг, инвестиции, маркетинговые технологии, инвестиционная стратегия, методы управления инвестиционными проектами.

*Keywords:* investment marketing, investments, marketing technologies, investment strategy, investment project management methods.

Благоприятный инвестиционный климат является необходимым условием для осуществления стабильно высокого развития экономики, привлечения инвестиций в регионы и отрасли, активизации предпринимательской деятельности. Он способствует инвестициям в

важные производственные и социальные проекты, расширяет возможности осуществления инноваций, повышает качество экономического и социального развития.

Формирование и развитие инвестиционного рынка в Узбекистане позволяет выдвинуть предположение о возможности и необходимости использования принципов маркетинга на данном рынке. В таких условиях глобализации существующие проблемы развития финансово-экономического потенциала организаций предполагают возникновение и внедрение новых технологий в маркетинговой деятельности компаний. Нестандартные подходы к получению наиболее достоверной и надежной информации о динамике и структуре спроса, предпочтениях частных и корпоративных инвесторов, а также перспективах той или иной инвестиционной деятельности создают предпосылки к развитию и более широкому применению такого направления, как инвестиционный маркетинг.

Инвестиционный маркетинг – относительно новое направление, несколько обособленное от маркетинга в его классическом понимании о свободных рыночных отношениях в условиях глобализации экономики. Предметом инвестиционного маркетинга является анализ инвестиционной деятельности, раскрытие потенциала каждого инвестиционного направления, четкое обоснование принятия решений при разработке и реализации инвестиционных проектов и программ. Инвестиционный маркетинг способен более глубоко изучать процесс формирования портфельных инвестиций и их использование в инвестиционном процессе, например при финансировании недвижимости, ипотеке.

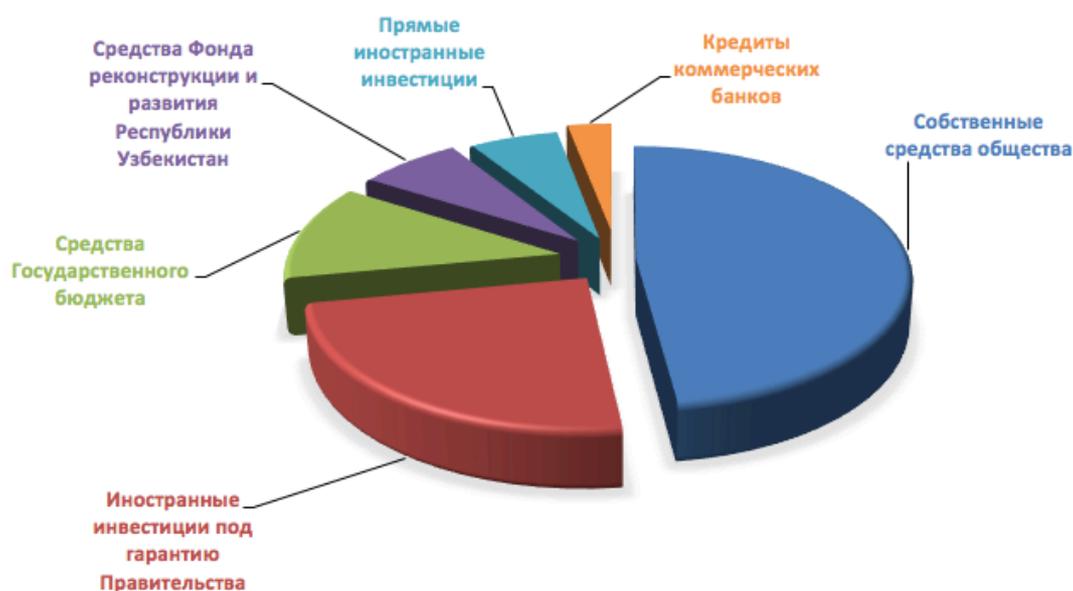
Современные маркетинговые стратегии в мировой экономике рассматриваются как важнейшее условие для повышения финансовой эффективности различных сфер деятельности. Вопросы, связанные с изучением влияния проводимой маркетинговой политики, рыночной капитализации, прибыльности предприятий, рентабельности оказываемых услуг, являются в настоящее время одними из наиболее актуальных для руководителей компаний.

В настоящее время большинство компаний Узбекистана осуществляют инвестиционную деятельность, в том числе АО «Узбекистон темир йуллари». В основном эти действия направлены на формирование привлекательной инвестиционной среды для привлечения потенциальных инвесторов, однако, не все эти решения соответствуют реальным потребностям конечных потребителей.

В Узбекистане наиболее известны два вида инвестиционного маркетинга: – инвестиционный маркетинг бизнеса и инвестиционный маркетинг территории. В таком раскладе акцентировать внимание на таких проблемах как постоянное повышение расходов компаний на маркетинг и отсутствие контроля результатов инвестиционного процесса, а также сложность интеграции между различными предприятиями и регионами на фоне усложнения маркетинговой деятельности. Также в настоящее время в Узбекистане развит такой инструмент, как маркетинг территории: создание свободных экономических зон, строительства новых и реконструкция имеющихся железных и автомобильных дорог, престиж территории, привлекательности территории к инвестициям.

В 2018 году по АО «Узбекистон темир йуллари» реализовано 50 инвестиционных проектов и освоено 527,32 млн. долларов, в том числе за счет: – собственных средств общества – 251,40 млн. долларов.

- средств Государственного бюджета – 61,64 млн. долларов;
- кредитов коммерческих банков – 17,41 млн. долларов;
- средств Фонда реконструкции и развития Республики Узбекистан – 40,23 млн. долларов;
- иностранных инвестиций под гарантию Правительства Республики Узбекистан – 126,86 млн. долларов;
- прямые иностранные инвестиции – 29,78 млн. долларов (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Структура освоенных инвестиций АО «Узбекистон темир йуллари»**  
(Составлено автором на основе анализированных данных АО «Узбекистон темир йуллари» за 2018 год)

Результаты анализа данных показывает, что в структуре привлеченных инвестиций самую большую долю занимают собственные средства компании (48%), а самую малую занимают кредиты банков (3%). Иностранные инвестиции под гарантией правительства 24%. Это ситуация говорит о недостатках инвестиционной политики и инвестиционного маркетинга АО «Узбекистон темир йуллари». Возникает естественный вопрос, как поднять уровень привлекаемых инвестиций в железнодорожную отрасль Узбекистана.

В первую очередь надо пересмотреть инвестиционную стратегию общества с точки зрения инвестиционного маркетинга и определить виды инвестиций как объект маркетинга.

Цель инвестиционного маркетинга - вооружить специалистов по инвестициям передовыми научными, инновационными и рыночно-практическими знаниями в области инвестиций и, как следствие, всемерно способствовать активизации инвестиционного процесса, подъему конкурентоспособного производственного потенциала страны и выводу России на передовые позиции лидера глобального инвестиционного рынка. Целями инвестиционного маркетинга могут выступать максимизация прибыли, объем инвестиций, увеличение рыночной доли.

Разработанные мероприятия инвестиционного маркетинга предприятий АО «Узбекистон темир йуллари» имеют горизонт от одного месяца до нескольких лет в зависимости от целей, стоящих перед собственниками, главная из которых – повышение стоимости бизнеса с помощью привлечения инвестиций, оптимизации системы управления, реструктуризации, разработки проектов развития, повышения маркетинговой активности.

Безусловно, необходимо обратить внимание и на оценку эффективности инвестиционного маркетинга, которая обусловлена реализацией нескольких основных принципов и функций.

Если исходить из прикладного значения инвестиционного маркетинга, то основные задачи его изучения заключаются в раскрытии следующих вопросов:

- принятие научно обоснованных решений в области инвестиций;
- определение инвестиционных рисков, их оценка, определение путей предотвращения или снижения;
- изучения источников финансирования и определения методов выбора наиболее выгодных и надежных источников;
- формирование оптимального портфеля инвестиций;

- экономическое обоснования капитальных вложений;
- планирование инвестиций.

Функции и принципы инвестиционного маркетинга, его отдельные виды и направления, обособившиеся от классического маркетинга в результате инвестиционной специализации, выглядят следующим образом (таблица 1).

**Таблица 1 – Классификация маркетинга**

Функции	Принципы
Мониторинг (анализ) глобального инвестиционного рынка, изучение его состояния, тенденций и динамики	Необходимость постоянного изучения состояния и динамики глобального инвестиционного рынка
Сегментирование рынка инвестиционных проектов	Инвестиционную адаптацию к его условиям
Позиционирование инвестиционных проектов и программ	Активное воздействие на узбекские и международные инвестиционные рынки
Анализ (мониторинг) деятельности конкурентов	
Прогнозирование инвестиционной конъюнктуры рынка	Обеспечение согласованности целей предприятия и использования различных ресурсов для достижения результативности проектов
Разработка наиболее эффективных инвестиционных проектов	
Маркетинговый контроль	Формирование инвестиционных продуктов в наиболее прибыльных секторах экономики
Планирование инвестиционно-маркетинговой деятельности	Контроль со стороны соответствующих отделов компании и руководства

В настоящий момент существует множество инструментов маркетинговых коммуникаций, таких как реклама, стимулирование сбыта, PR (Public Relations), личная продажа, прямой маркетинг, пропаганда, Интернет-маркетинг, но не все подходят для продвижения инвестиционного продукта. Рассмотрим более подробно PR, так как именно данный инструмент является одним из основных при продвижении инвестиционного проекта [5].

PR (связи с общественностью) – комплекс скоординированных действий организации, направленных на общественность с целью изменить в свою пользу мнения и поведение людей.

Одной из функциональной составляющих PR является Investor relations (взаимоотношение с инвесторами). Данное направление является практически всеобъемлющим. Методика PR здесь заключается в (Рисунок 2.):

- определении потенциальных инвесторов и лиц, непосредственно принимающих решения;
- формировании базового пакета информации для инвесторов (описание отрасли в целом, стратегии компании, сведения об управлении компанией, анализ конкурентной среды и т. д.);
- выработке и донесении ключевых посланий до целевых аудиторий;
- обеспечении и контроле исходящего информационного потока (годовой отчет, обзоры, публикации в специализированных и общественно-политических изданиях, выступления и заявления официальных лиц);
- организации и сопровождении встреч потенциальных инвесторов.



**Рисунок 2 – Методы улучшения PR (разработано авторами на основании работ Ашимханова З.)**

Конечно, нельзя забывать и о других инструментах маркетинговых коммуникаций, которые в совокупности с мероприятиями PR создают некий синергетический эффект, формируя единый благоприятный образ в глазах потенциальных инвесторов путем скоординированных между собой коммуникационных посланий разными средствами.

Итак, маркетинг инвестиционных проектов – это определенная методика работы на инвестиционном рынке, включающая ряд этапов: определение содержания проекта и присущих ему рисков, подготовка бизнес-плана; исследование рынка инвестиций с целью определения «целевого сегмента» – потенциальных инвесторов и возможных форм инвестирования, продвижение проектов на рынок. Доработка проекта происходит в соответствии с требованиями конкретного инвестора. С точки зрения практических действий, маркетинг инвестиционных проектов можно определить как процесс, призванный помочь потенциальным инвесторам оценить и выбрать продвигаемые предприятиями проекты. В методическом плане ключевыми понятиями в маркетинге инвестиционных проектов являются целевой рынок и система продвижения проектов на рынок.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ашимханова С. З. Роль инвестиционных брендов. 2013. URL: <http://www.be5.biz/ekonomika1/r2013/1035.htm>
2. Гулькова, Е. Л. Влияние маркетинговой политики на результаты финансовой деятельности предприятия / Е. Л. Гулькова, А. Д. Волкова // Вестник университета. 2015. № 5. С. 100–105.
3. Кочкина, Н. В. Эффективность методов управления проектами [Электронный ресурс] / Н. В. Кочкина // Экономика и менеджмент инновационных технологий. - 2015. - № 4. – Режим доступа : <http://ekonomika.snauka.ru/2015/04/8283> (дата обращения : 23.02.2019).
4. Мидлер, Е. А. Маркетинг территорий в управлении пространственным развитием регионов: состояние, конкурентный подход, инструменты [Электронный ресурс] / Е. А. Мидлер, Н. М. Ованесян // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. - 2015. - № 3. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34111590> (дата обращения : 29.02.2019).
5. Романов А. А. Синяева И. М., Поляков В. А. Маркетинговые коммуникации. М., 2011
6. Шелест А. П. Организация интегрированного маркетинга в гостиничном бизнесе // Вестник Тамбовского университета. Серия Гуманитарные науки. Тамбов, 2011. № 3. С. 49-54.

УДК 536.241

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВОЛНИСТЫЕ  
ПОВЕРХНОСТИ**  
**MODELING OF THERMAL RESISTANCE THROUGH THE WAVY SURFACE**

**Ольга Роальдовна Дорняк, Виктор Михайлович Попов, Наталья Анатольевна Анашкина**  
**Olga Roaldovna Dornyak, Victor Mikhaylovich Popov, Natal'ya Anatol'yevna Anashkina**

*Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.Морозова,  
Россия, Воронеж*  
*Voronezh state forestry engineering University named after G. F. Morozov, Russia, Voronezh*  
*(e-mail: etgvglta@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрен результат применения математической модели теплообмена в малонагруженных контактных парах, поверхности которых могут иметь дефекты в виде волнистости. Показано, что прогнозируемые на основе модели значения термического сопротивления удовлетворительно совпадают с данными натурального эксперимента.

*Abstract:* The result of application of the mathematical model of heat transfer in low-loaded contact pairs whose surfaces may have defects in the form of waviness is considered. It is shown that the values of thermal resistance predicted on the basis of the model satisfactorily coincide with the data of the full-scale experiment.

*Ключевые слова:* теплопроводность, термическое сопротивление, волнистые поверхности, многофазные системы.

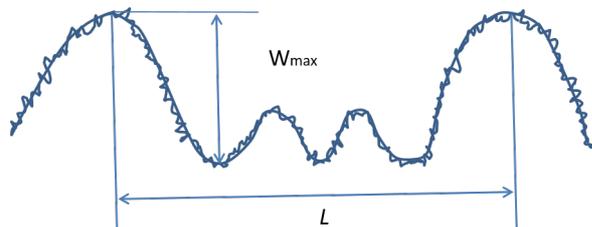
*Keywords:* thermal conductivity, thermal resistance, wavy surfaces, multiphase systems.

Проектирование составных теплонагруженных конструкций для таких отраслей промышленности как машиностроение, приборостроение требует определения значения термического сопротивления в контактных парах в условиях их эксплуатации. Реальные поверхности элементов конструкций имеют дефекты, зависящие от способа обработки – полирования, шлифования, фрезерования, точения, строгания [1-2]. Дефекты в виде шероховатости, волнистости, макро-отклонения от идеальной формы наряду с режимными параметрами определяют сопротивление теплопередачи в контактных парах [1-4].

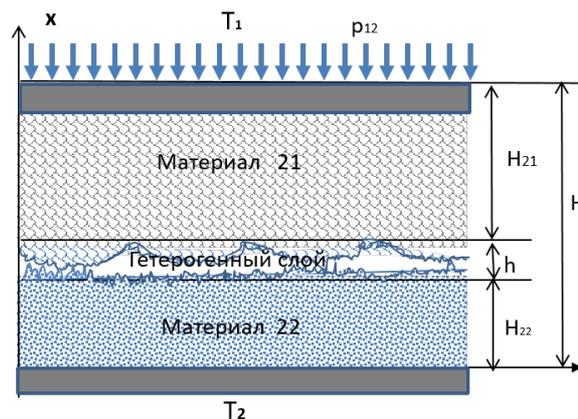
Для расчета термического сопротивления предложена математическая модель [5-6], сформулированная на основе положений механики многофазных систем [7]. Адекватность этой математической модели доказана для контактных пар, обладающих шероховатыми поверхностями. В данной работе представлены результаты вычислительного эксперимента для поверхностей, имеющих рельеф волнистости с шероховатостью - рис. 1. Волнистость может быть не обязательно регулярной. Математическая модель [5] предназначена для описания теплового поведения элементов контактной пары, которое зависит от ее напряженно-деформированного состояния. На рис. 2 схематично представлена расчетная схема модели. Два образца 21 и 22 имеют плоские поверхности соприкосновения. Образцы могут быть изготовлены из разных материалов, при этом они могут быть как гомогенными, так и гетерогенными, в то время как выделенный слой межконтактного пространства всегда гетерогенный, и, как правило, многокомпонентный. Границы слоя проводятся таким образом, чтобы отделить от основного объема образцов все поверхностные дефекты (рис.2). В гетерогенном слое толщиной  $h$  содержатся включения материала 21, материала 22 и газ.

Математическая модель включает уравнения сохранения массы, количества движения и энергии в двух фазах – твердой и газообразной. Все уравнения записаны, следуя [7], для микроскопических переменных, усредненных по объему каждой из фаз. Реологическое поведение твердой фазы гетерогенном слое определено с учетом деформаций материала «зёрен», с одной стороны, и деформаций «структурного каркаса», образованного «зёрнами»

твердой фазы из материала обоих образцов, с другой стороны. Оба типа деформирования считаются упругими, деформации линейными.



**Рисунок 1 – Схематичный вид поверхности с волнистостью и шероховатостью. Шаг волны равен  $L$ . Высота волны  $W_{\max}$ .**



**Рисунок 2 – Расчетная схема.**

В рассматриваемом случае предполагается, что образцы выполнены из однородного материала – металла или сплава. Образец 21 изготовлен из сплава Д1, образец 22 – из стали 45. Контактная пара находится сжимается под давлением  $p_{12}$ . В результате толщина слоя  $h$  уменьшается. Новое значение  $h$ , а также изменившиеся текстурные характеристики гетерогенного слоя определяются до решения температурной задачи. Ниже приведены значения входных параметров математической модели, соответствующих условиям натурального эксперимента [1].

Геометрические параметры. Толщина пластин  $H_{21}=H_{22}=0.04$  м. Образец 21 имеет волнистость, которая относится к классу V, а также шероховатость класса 7а. При этом высота волны составляет  $W_{\max}=12$  мкм, а максимальная высота микронеровностей (расстояние между линией выступов и линией впадин)  $R_{\max}=6$  мкм. Обработка поверхности образца 22 обеспечивает значение  $R_{\max}=1.9$  мкм (чистота обработки соответствует классу 8в), волнистость отсутствует.

Теплофизические параметры: коэффициенты теплопроводности  $\lambda_1=0.0248$  Вт/(мК);  $\lambda_{21}=171$  Вт/(мК),  $\lambda_{22}=47$  Вт/(мК). Коэффициенты теплоотдачи на межфазных поверхностях  $\alpha_{1,21}^{\Sigma} = \alpha_{21,1}^{\Sigma} = 2$  Вт/(м<sup>2</sup>К);  $\alpha_{1,22}^{\Sigma} = \alpha_{22,1}^{\Sigma} = 5$  Вт/(м<sup>2</sup>К);  $\alpha_{21,22}^{\Sigma} = \alpha_{22,22}^{\Sigma} = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>К);  $\alpha_{22,21}^{\Sigma} = 5 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>К).

Температура на внешних границах  $T_{22}|_{x=0} = T_2 = 293$  К;  $T_{21}|_{x=H} = T_1 = 458$  К. Давление на поверхности контактной пары  $p_{12}$  изменялось в диапазоне от 0.1 до 1 МПа.

Для проведения вычислительного эксперимента необходимо задать распределение объемного содержания металлических включений в гетерогенном слое  $\alpha_{21}$  и  $\alpha_{22}$  до приложения нагрузки. Такое распределение для безразмерных координат идентично уравнению опорной кривой, получаемой на основе профилограммы. В [2] обосновано выражение для опорной кривой волнистой шероховатой поверхности в виде бета-функции, которое аналогично уравнению опорной кривой для чисто шероховатой поверхности:

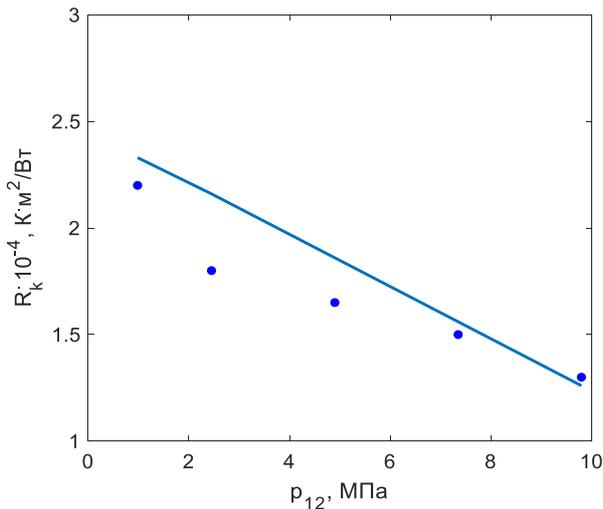
$$\alpha_2(e_m) = t_p(e_m) = \frac{\Gamma(m+n)}{\Gamma(m)\Gamma(n)} \int_0^{e_m} x^{m-1}(1-x)^{n-1} dx \quad (1)$$

где  $e_m=z/R_{\max}$ ,  $z$  – поперечная координата, отсчитываемая от линии выступов;  $m$  и  $n$  – параметры. Отличие уравнений для опорных кривых волнистых и шероховатых поверхностей состоит только в значениях параметров  $m$  и  $n$ , которые определяют степень заполнения материалом зоны дефектов. Для шероховатой поверхности опорная кривая имеет «островершинный» характер, а для волнистой поверхности – «плосковершинный».

Объемное содержание воздуха  $\alpha_1$  в гетерогенном слое вычисляется по формуле  $\alpha_1 = 1 - \alpha_{21} - \alpha_{22}$ . Для параметров бета-распределения микронеровностей по высоте приняты значения  $m=3, n=2$  (для поверхности образца 22) и  $m=1, n=5$  (для поверхности образца 21).

Начальные значения удельной поверхности раздела компонент твердой фазы и газообразной фазы в гетерогенном слое должны определяться экспериментально. В расчетах принято  $s_{1_i} = (1 - \alpha_i(x_1))s_{1_i}, i = 21, 22, s_{1_{21}} = s_{1_{22}} = 2,5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}; s_{21_{22}}=2.57 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ .

Реологические параметры. Модули упругости и коэффициенты Пуассона для материала и структурного каркаса  $E_{s21}=6 \cdot 10^{10} \text{ Па}; E_{s22}=1.9 \cdot 10^{11} \text{ Па}; E_{f21}=E_{f22}=10^7 \text{ Па}; \nu_{s21}=\nu_{s22}=\nu_{f21}=\nu_{f22}=0.26$ .



**Рисунок 3 – Термическое сопротивление теплопередачи для контактной пары сплав Д1-сталь 45 (V/7a – 8в) в зависимости от интенсивности нагружения. Непрерывные кривые – расчет, маркер - эксперимент [1].**

На рисунке 3 показана зависимость термического сопротивления контактной пары в пограничной зоне от величины давления. Сравнение зависимостей, полученных в рамках вычислительного и натурального эксперимента [2] позволяет сделать вывод об их удовлетворительном совпадении. С ростом интенсивности сжимающей нагрузки величина термосопротивления контактирующих поверхностей, имеющих волнистость и шероховатость, снижается, что связано с уменьшением результирующей толщины гетерогенного слоя и, как следствие увеличением площади фактического контакта образцов.

**Вывод.** Математическая модель контактного теплообмена может быть использована для прогнозного расчета термического сопротивления в малонагруженных контактных парах с волнистыми поверхностями.

*Список обозначений:*  $R_k$  – термическое сопротивление теплопередачи,  $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ ;  $s_{i_j}$  – удельная поверхность раздела фаз  $i$  и  $j$ ,  $\text{м}^{-1}$ ;  $p$  – давление,  $\text{Па}$ ;  $T$  – температура,  $\text{К}$ ;  $q$  – плотность теплового потока,  $\text{Вт} / \text{м}^2$ ;  $\alpha$  – объемное содержание фазы;  $\alpha_{i_j}^{\Sigma}$  – коэффициент теплоотдачи между фазами  $i$  и  $j$ ,  $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ .

*Нижние индексы* относятся: 1, 2 – к газообразной и твердой фазам, 21 и 22 – компоненты твердой фазы для двух пластин;  $\Sigma_{ij}$  – к границам раздела фаз  $i$  и  $j$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. Москва: Энергия, 1971. 216 с.
2. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. - Москва: Наука, 1970. 227 с.
3. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. Москва: Энергия, 1977. 328 с.
4. Меснянкин С.Ю., Викулов А.Г., Викулов Д.Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 9. С. 945-970.
5. Дорняк О.Р., Попов В.М., Анашкина Н.А. Математическое моделирование термического сопротивления в контактных парах из гомогенных и гетерогенных материалов // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 1. С. 24-33.

6. Дорняк, О.Р., Попов В.М., Анашкина Н.А. Математическая модель термодинамического взаимодействия двух капиллярно-пористых образцов // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского. - М.: 2016. Т. 2. С. 127-130.

7. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.

УДК 658.5.011

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ИННОВАЦИОННОГО  
РАЗВИТИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ УЗБЕКИСТАНА  
FORMATION OF STRATEGIC DIRECTIONS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF  
THE OIL AND GAS INDUSTRY OF UZBEKISTAN**

**Ирина Эрнстовна Ивонина\*, Ирода Неъматиллоевна Хамроева\*, Мухаммад Кахрамон  
угли Каримов \*\*, Феруза Зокиржоновна Юсупходжаева\*  
Irina E. Ivonina\*, Iroda N. Khamroeva\*, Muhammad K. ugli Karimov \*\*,  
Feruza Z. Yusuphodzhaeva\***

*\*АО "O'ZLITINEFTGAZ", Узбекистан, Ташкент*

*\*JSC "O'ZLITINEFTGAZ", Uzbekistan, Tashkent*

*\*\* Узбекистанское научно-инженерное общество нефтяной и газовой промышленности  
«УзНИОНГП», Узбекистан, Ташкент*

*\*\* Uzbekistan scientific and engineering society of oil and gas industry "UzNIONGP",  
Uzbekistan, Tashkent  
(e-mail: irish\_bs@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассматриваются основные стратегические направления инновационного развития нефтегазовой отрасли Узбекистана, вопросы формирования рынка инновационного капитала, стимулирования внедрения инновационных разработок. Приводится модель повышения эффективности использования инновационного потенциала на предприятиях нефтегазовой отрасли. Рассматриваются вопросы перехода на современные формы и механизмы финансирования науки и поддержки инновационной деятельности, в том числе в сфере высшего образования.

*Ключевые слова:* Инновация, инновационная система, инновационный капитал, инновационный потенциал, эффективности использования инновационного потенциала (капитала), критерия оценки эффективности,

*Abstract:* The main strategic directions of innovative development of the oil and gas industry of Uzbekistan, the formation of an innovative capital market, and the promotion of innovative developments are considered. A model of increasing the efficiency of using innovative potential at oil and gas enterprises is presented. The issues of transition to modern forms and mechanisms of financing science and supporting innovative activities, including in the field of higher education, are considered.

*Keywords:* Innovation, innovation system, innovative capital, innovative potential, the effectiveness of the use of innovative potential (capital), performance evaluation criteria,

Инновационная система нефтегазовой отрасли как бы в миниатюре повторяет практически все те же недостатки, присущие Национальной инновационной системе в целом:

- её функционирование направлено на решение отдельных конкретных задач, которые не подчинены общей цели инновационного развития;

- отсутствует единая целенаправленная инновационная политика, оформленная в виде программного документа на среднесрочную и долгосрочную перспективу. Существующие программы предприятий предусматривают модернизацию, повышение технического уровня

производства и требуют обеспечение выпуска конкурентоспособной продукции, ориентированной на экспорт и замещение импортной продукции. Однако эти программы не предусматривают сопутствующих мер по стимулированию развития местного научного потенциала, подготовки и переподготовки кадров, созданию структур поддержки и внедрения нововведений в производство;

- недостаток финансовых ресурсов.

Диагностика состояния и эффективности формирования и использования инновационного капитала на основе анализа данных статистической отчётности за 2016 и 2017 годы по формам «1 - innovatsiya shakli» и «1-fan shakliga ilova» позволяют сделать вывод о том, что практически на всех предприятиях инновационная деятельность осуществляется недостаточно активно.

В 2016 году в общем объёме выпущенной продукции инновационные разработки составили лишь 6,8 %, в реализованной – 6,7%, и за пределы республики реализовано 17,5% от общего объёма реализации. За счёт использованных впервые в отчётном году инноваций произведено и реализовано продукции на сумму 3,5 млрд.сум, За счёт освоенных в 2014-2015 годах разработок, произведено продукции на 1875,9 млрд.сум, реализовано – на 1908,6 млрд.сум, из них за пределы республики – 986 млрд.сум. кроме того было подвержено совершенствованию за 2014-2016 годы произведено и реализовано на 13,2 млрд.сум. При этом более 98% инновационной продукции произведено и реализовано ООО СП «UZ-KOR GAS CHEMICAL».

В 2017 году несколько увеличилась в объёме выпущенной продукции доля инновационных разработок и составила 10,4%, а в реализации за пределы республики достигла 19,7%. В целом отмечен рост инновационной продукции в 2 раза и объём её составил 1949 млрд.сум. Однако, как и в предыдущем году, почти 100% инновационной продукции произведено и реализовано ООО СП «UZ-KOR GAS CHEMICAL».

За 2016 год затраты на все виды инновационной деятельности составили 118,6 млрд.сум, в том числе осуществлённые за счёт собственных средств – 26,5 млрд.сум. Все затраты были направлены на технологические инновации, из которых 115,7 млрд.сум или почти 98% составляли процессные инновации. Для осуществления технологических инвестиций были приобретены за счёт собственных средств машины и оборудование на 24,8 млрд.сум и новые технологии на 0,2 млрд.сум. За счёт привлечения заёмных средств было приобретено новых технологий на 1,5 млрд.сум. Часть затрат за счёт собственных средств были направлены на исследования и разработки новых продуктов, услуг, методов, процессов (0,7 млрд.сум).

В 2017 году затраты по видам инновационной деятельности составили лишь 24,8 млрд.сум, то есть снизились на 93,8 млрд.сум и осуществлялись только за счёт собственных средств, размер которых также снижен в сравнении с 2016 годом на 1,7 млрд.сум.

Если в 2016 году из всех затрат на все виды инновационной деятельности было направлено на приобретение машин для технологических инноваций 24,7 млрд.сум или 93,2% собственных средств, то в 2017 году на эти цели было направлено 23,6 млрд.сум – 95,2% собственных средств.

За 2016 год в целом по нефтегазовой отрасли было внедрено 86 инноваций, из которых 70 – собственными силами и 18 –при участии других организаций (НИИ).

Наибольшую активность в отчётном году проявил Бухарский механический завод, которым внедрено собственными силами 32 технологических (продуктовых) инноваций, что составляет более 36% от общего числа внедрённых мероприятий, ДП «Ургенчтрансгаз» (7 мероприятий) и АО «ИГИРНИГМ» (6 мероприятий).

В 2017 году число внедрённых мероприятий в сравнении с предыдущим годом снизилось до 46 или почти на 50%. При этом в отчётном году не отчитались по внедрённым мероприятиям АО «ИГИРНИГМ», ООО «Карбонам» и АО «Нефтегазхиммаш».

На предприятиях отрасли в 2016 году было создано 12 и приобретено 18 новых технологий, а в 2017 году – лишь 7 технологий.

*Несколько иную картину, при сохранении общих тенденций показывают данные отчетности по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам.*

За 2016 год предприятиями нефтегазовой отрасли Узбекистана из общего объема работ, собственными силами выполнено на 2154,3 млрд.сум. В этом числе научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки составили лишь 62,7 млрд.сум или лишь 2,9% из которых научно-исследовательских разработок – на 28,5 млрд.сум. В этом числе наиболее значимый вклад приходится на АО «УзЛИТИнефтьгаз» (соответственно, 30,5 млрд.сум и 4,2 млрд.сум) и АО «ИГИРНИГМ» (19,6 млрд.сум – всё это научно-исследовательские разработки).

Фундаментальными исследованиями занимались лишь АО «ИГИРНИГМ» (1,5 млрд.сум) и АО «NEFTGAZTADQIQOT» (0,8 млрд.сум), что составляет лишь 8% от объема научно-исследовательских разработок. Еще меньший размер (1,2 млрд.сум) занимают проектно-конструкторские и технологические работы, которые были выполнены лишь Кокандским механическим заводом. Проектные работы для строительства выполнялись лишь АО «УзЛИТИнефтьгаз» (23 млрд.сум или 86,8% от объема научно-исследовательских разработок).

Научно-технические услуги в отчетном году оказывались АО «Нефтегазмеёр» - 6,8 млрд.сум и АО «УзЛИТИнефтьгаз» - 3,1 млрд.сум. Большая же часть работ, выполняемых предприятиями отрасли - услуги ненаучного характера (10282,5 млрд сум или более 90%).

Среднегодовая стоимость основных средств, используемых для осуществления научно-исследовательских и проектно-конструкторских разработок на конец 2016 года составляла 21,9 млрд.сум, в том числе у АО «Нефтегазмеёр» (0,6 млрд.сум), АО «ИГИРНИГМ» (5,9 млрд.сум), АО «Нефтегазисследования» (3,9 млрд.сум) и у АО «УзЛИТИнефтьгаз» (11,5 млрд.сум). Доля машин и оборудования в числе основных средств составляет 31,5%, в том числе у АО «Нефтегазмеёр» (83,3%), АО «ИГИРНИГМ» (79,7%), АО «Нефтегазисследования» (10,3%) и у АО «УзЛИТИнефтьгаз» (11,3%).

В 2017 году доля научно-исследовательских и проектно-конструкторских разработок, выполненных за счёт собственных средств, снизилась до 1,5%, оставшись по стоимости практически на уровне 2016 года. И в этом году наибольший объем приходится на АО «УзЛИТИнефтьгаз» (32,9 млрд.сум, в том числе научные исследования - 5,3 млрд.сум) и АО «ИГИРНИГМ» (23,5 млрд.сум – всё это научно-исследовательские разработки – фундаментальные исследования).

Проектные работы для строительства проводились лишь в АО «УзЛИТИнефтьгаз» (24,8 млрд.сум).

Среднегодовая стоимость основных средств, используемых для осуществления научно-исследовательских и проектно-конструкторских разработок на конец 2017 года увеличилась до 26,6 млрд.сум, в том числе у АО «Нефтегазмеёр» (6,9 млрд.сум), АО «ИГИРНИГМ» (7,6 млрд.сум) и у АО «УзЛИТИнефтьгаз» (12,1 млрд.сум). Доля машин и оборудования в числе основных средств снизилась до 25,2%, и составила у АО «Нефтегазмеёр» (7,2%), АО «ИГИРНИГМ» (31,6%) и у АО «УзЛИТИнефтьгаз» (32,2%).

В 2016 году затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки составили 47,1 млрд.сум или 75 сум на 1 сум выполненных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Наибольшая доля текущих затрат приходится на научно-технические разработки (75,8%). Затраты на прикладные исследования составляли 9,6%, а на фундаментальные – 8,4%.

В 2017 году затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки составили 50,1 млрд.сум или 74 сум на 1 сум выполненных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. При этом 89 % текущих затрат приходится на научно-технические разработки и 11 % на прикладные исследования составляли, а фундаментальные разработки в 2017 году не осуществлялись.

Источниками финансирования затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки, выполненные собственными силами, в основном являлись средства заказчика. Кроме того привлекались собственные средства, иностранные инвестиции и в 2016 году - средства республиканского бюджета

В 2016 году основным источником финансирования указанных затрат являлись средства заказчиков (69%) и собственные средства (6,8%). При этом, собственные средства использовались для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок только АО «Нефтегазмеёр» - 98,5% от всех использованных собственных средств по АО «Узбекнефтегаз». Средства заказчиков на выполнение указанных работ использовались АО «УзЛИТИнефтьгаз» (72,7%), АО «ИГИРНИГМ» (14,9%) и АО «Нефтегазтаджикот» (12,4%). Средства бюджета поступили лишь АО «ИГИРНИГМ» - 4,8 млрд. сум или 100% от поступления бюджетных средств.

В 2017 году средства заказчиков составляли 56,7% всех источников и собственные средства 38,5%. Собственные средства использовались для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок АО «Нефтегазмеёр» - 39,3% от всех использованных собственных средств по АО «Узбекнефтегаз», соответственно, АО «ИГИРНИГМ» - 60,2% и АО «Кокандский механический завод» - 0,5%. Средства заказчиков и иностранные инвестиции на выполнение указанных работ использовались лишь АО «УзЛИТИнефтьгаз».

В 2016 году 702 человека или 70% в численности работников, занимающихся научными исследованиями – это специалисты – исследователи, а остальные - техники, вспомогательный и прочий персонал. Из общей численности работающих в области научных исследований высшее образование имеют 806 человек или 76,3%. В числе специалистов-исследователей высшее образование имеют 648 человек или 92,3%, в том числе все 9 докторов наук, все 42 кандидата наук и 468 магистров или более 85% их общего числа.

В 2017 году 654 человека или 71% – это специалисты – исследователи, а остальные - техники, вспомогательный и прочий персонал. Из общей численности работающих в области научных исследований высшее образование имеют 806 человек или 87,5%. В числе специалистов-исследователей высшее образование имеют 648 человек или 80,4%, в том числе все 8 докторов наук, все 32 кандидата наук и 361 магистр или почти 89% их общего числа.

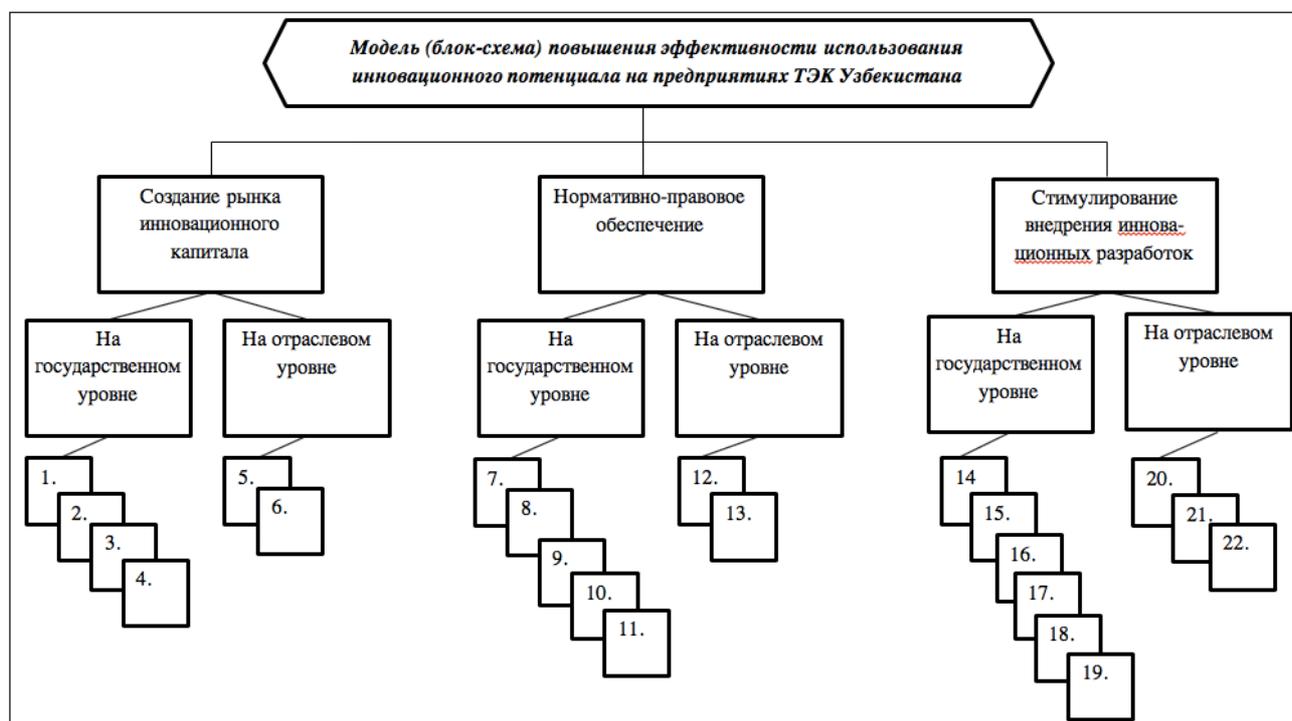
Для разработки мер по повышению эффективности использования инновационного потенциала следует использовать модель-схему повышения эффективности его использования на предприятиях ТЭК, в т.ч. нефтегазовой отрасли Узбекистана (рисунок 1). При этом, основное внимание на уровне нефтегазовой отрасли, как видно из приведенной схемы, должно уделяться:

- для **формирования рынка инновационного капитала** - формированию перечня необходимых для отрасли, обеспеченных спросом, инновационных разработок и мониторингу своевременных разработок и внедрение инновационных разработок;
- для **создания нормативно-правовой базы** - разработка регламентов систематического проведения аттестации научных и научно-производственных кадров и на этой основе активизация процесса омоложения научных кадров;
- для **стимулирование внедрения инновационных разработок** - переход от управления затратами к управлению результатами инновационной деятельности, увеличение финансирования инновационных исследований, совершенствование системы стимулирования создания и внедрения инновационных разработок.

Отраслевой инновационный капитал и инновационный капитал предприятий в ряде случаев остаётся невостребованным, в основном, из-за несовершенной конкуренции. Поэтому необходима разработка специальной отраслевой стратегической программы по развитию конкуренции и созданию условий для расширения ёмкости рынка отраслевого инновационного капитала. Она должна охватывать в первую очередь вопросы создания необходимой нормативной базы инновационной деятельности, должна предусматривать

решение актуальных вопросов стимулирования производства в вопросах коммерциализации и внедрения новой техники и технологий, выпуска современной наукоёмкой конкурентоспособной продукции, развития экспорта.

В процессе формирования системы инновационного сотрудничества науки и производства, повышение ёмкости рынка инновационного капитала имеет первостепенное значение и связано с оптимальным сочетанием инвестирования в освоение новых для данного производства технологий других предприятий с вложением капитала в разработку и внедрение собственных инноваций. Необходимо осуществлять меры по развитию наукоёмких производств, модернизации, техническому и технологическому перевооружению производства. Научные учреждения, как показывают результаты ежегодных ярмарок инновационных идей, технологий и проектов, обладают достаточным потенциалом для предложения современных инновационных разработок по различным направлениям техники и технологии.



**Рисунок 1 – Модель (блок-схема) повышения эффективности использования инновационного потенциала на предприятиях нефтегазовой отрасли Узбекистана**

Условные обозначения к рисунку 1:

1. Принятие специальной программы развития конкуренции на рынке инновационного капитала; 2. Формирование тематики актуальных (приоритетных) инновационных разработок; 3. Постоянный мониторинг выполнения намеченных целей; 4. Планомерное обеспечение сбалансированного спроса и предложений инновационных разработок; 5. Формирование перечня необходимых для отрасли, обеспеченных спросом, инновационных разработок; 6. Мониторинг своевременных разработок и внедрение инновационных разработок; 7. Нормативно-правовое обеспечение инновационной системы Узбекистана; 8. Принятие законодательства об охране интеллектуальной собственности, результатов инновационных разработок от их использования; 9. Совершенствование кадровой политики; 10. Переход от управления затратами к управлению результатами от внедрения инновационных разработок; 11. Увеличение объёмов финансирования инновационных разработок; 12. Регламенты систематического проведения аттестации научных и научно-производственных кадров; 13. Активизировать процесс омоложения научных кадров; 14. Внедрение стандартов по оценке интеллектуальной собственности и результатов внедрения инновационных разработок; 15.

Создание системы долевого финансирования инновационной деятельности; 16. Создание организации по охране интеллектуальной собственности, результатов инновационных разработок от их использования; 17. Снижение налогового бремени и законодательное закрепление налоговых льгот при внедрении собственных инновационных разработок; 18. Обеспечение доступа к кредитным ресурсам; 19. Стимулирование экспорта; 20. Переход от управления затратами к управлению результатами инновационной деятельности; 21. Увеличение финансирования инновационных исследований; 22. Система стимулирования создания и внедрения инновационных разработок.

В связи с этим, необходим переход на современные формы и механизмы финансирования науки и поддержки инновационной деятельности, которые должны предусматривать реализацию следующих мер с целью инновационного развития.

**Во-первых**, поэтапное увеличение объемов бюджетного финансирования расходов на научные исследования и поддержку инноваций с учетом введения критериев их эффективного использования.

**Во-вторых**, концентрация средств на финансировании особо важных фундаментальных и прикладных исследований, осуществляемых научными коллективами.

**В-третьих**, в сфере отраслевого высшего образования необходимо обеспечить концентрацию грантовых ресурсов для реализации образовательных программ в рамках приоритетных направлений развития науки, техники и технологий, необходимых отрасли, осуществлять грантовое финансирование физических лиц (исследователей) по новым важным направлениям развития науки, а также для оформления патентов на результаты НИОКР.

В условиях низкой инновационной активности, наряду с инструментами косвенного стимулирования, должны включаться механизмы прямого партнерства с частным капиталом.

Необходима разработка фискальных инструментов, предоставляющих существенные льготы при осуществлении НИОКР, финансировании начальных этапов инновационных проектов. Важным шагом может стать долгосрочное финансирование на возвратной основе под низкую процентную ставку, страхование инвестиционных проектов. Таким образом, отрасль через соответствующий институт разделит с предпринимателем и частным инвестором риски, присущие инновационным проектам.

Важно развитие международного сотрудничества в области использования стратегии «заимствования» инновационных технологий, путем институционального его укрепления, создания СП.

И еще очень важный аспект обеспечения инновационного развития предприятий нефтегазовой отрасли – снижение налогового бремени в целях создания финансовых ресурсов, обеспечивающих создание и внедрение инновационных разработок. Это особенно важно для добывающих предприятий нефтегазовой отрасли Узбекистана.

УДК 66.011:[66.048.625+547.315.2]

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЭТАПНОГО МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ  
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ  
ДЕКОМПОЗИЦИОННОГО ПОДХОДА ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ИЗОПРЕНА  
INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF A STEP-BY-STEP METHOD OF  
OPTIMIZING A CHEMICAL TECHNOLOGY SYSTEM BASED ON A  
DECOMPOSITION METHOD IN THE ALLOCATION OF ISOPRENE**

**Владимир Петрович Кривошеев, Александр Вячеславович Ануфриев  
Vladimir P. Krivosheev, Alexandr V. Anufriev**

*Дальневосточный федеральный университет, Россия, Владивосток  
Far Eastern Federal University, Russia, Vladivostok  
(e-mail: krivosheev.vp@dvfu.ru, anufriev.av@dvfu.ru)*

*Аннотация:* По разработанному авторами декомпозиционному методу решена задача минимизации удельных энергетических затрат на многоколонной ректификационной установке, предназначенной для выделения изопрена, и установлена значительная эффективность первого этапа оптимизации.

*Abstract:* According to the decomposition method developed by the authors, the problem of minimizing specific energy costs on a multi-column distillation unit designed to allocation of isoprene was solved and the significant efficiency of the first optimization stage was established.

*Ключевые слова:* выделение изопрена, декомпозиционный метод, статическая оптимизация, удельные энергетические затраты.

*Keywords:* allocation of isoprene, decomposition method, static optimization, specific energy costs.

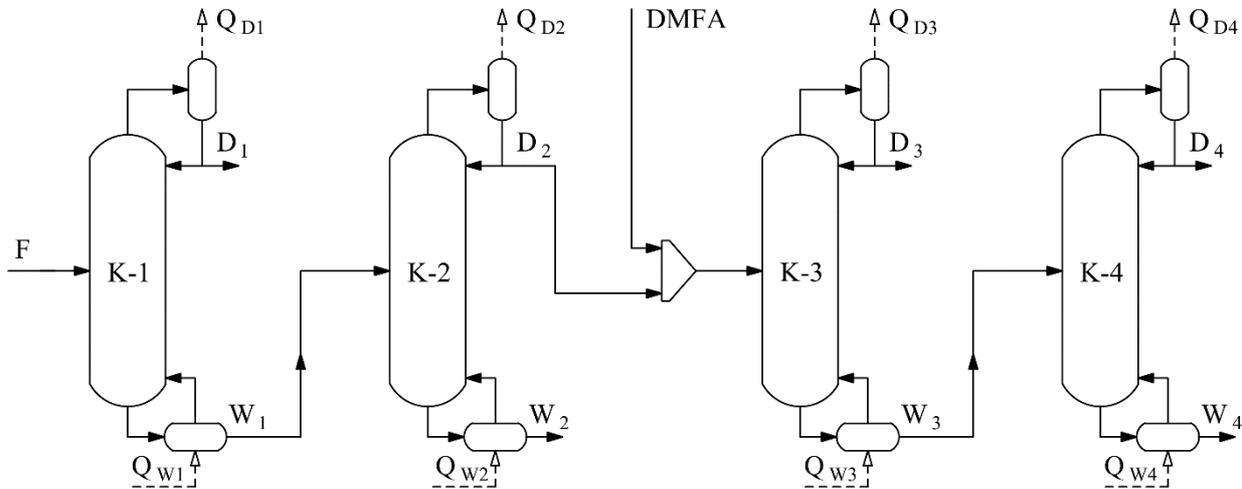
В классической постановке задачи статической оптимизации технологической системы имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} C(F_0, \mathbf{Z}_0, \mathbf{U}) \rightarrow \min_{\mathbf{U} \in \Omega} (\max); \\ F_j = \psi_j(F_{j-1}, \mathbf{Z}_{j-1}, \mathbf{U}_j); \\ z_{ji} = f_{ji}(F_{j-1}, \mathbf{Z}_{j-1}, \mathbf{U}_j); \\ z_{jk} \geq z_{jk}^3; \\ z_{jl} \leq z_{jl}^3; \\ u_{j\mu}^{\min} \leq u_{j\mu} \leq u_{j\mu}^{\max}; \\ j = 1, \dots, N; i = 1, \dots, m; \mu = 1, \dots, r, \end{array} \right. \quad (1)$$

где,  $F_0$  – расход питания системы;  $\mathbf{Z}_0 = (z_{01}, \dots, z_{0m})$  – вектор состава питания системы;  $\mathbf{U} = (\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_N)$  – вектор управляющих воздействий, где  $\mathbf{U}_j = (u_{j1}, \dots, u_{jr})$ ;  $\Omega$  – область допустимых значений управляющих переменных;  $m$  – число компонентов питания;  $N$  – число элементов системы;  $r$  – число управляющих воздействий на элемент системы;  $F_j$  – расход продуктового потока элемента  $j$ ;  $z_{ji}$  – доля компонента  $i$  в продуктивном потоке элемента  $j$ ;  $z_{jk}^3$  и  $z_{jl}^3$  – заданные доли компонентов  $k$  и  $l$  в продуктивном потоке элемента  $j$ , на которые наложены ограничения;  $u_{j\mu}^{\min}$  и  $u_{j\mu}^{\max}$  – минимальное и максимальное значение управляющей переменной  $\mu$  элемента  $j$ .

При выделении изопрена заданного качества в установке [1], состоящей из четырёх последовательно соединённых аппаратов (рис. 1), одним из главных показателей её функционирования являются удельные энергетические затраты. Эти затраты, в основном, можно оценить по количеству тепла, подводимого к ректификационным колоннам, в которых протекает рассматриваемый процесс. Основные технологические параметры установки

приведены в таблицах 1 и 2. Товарный изопрен отбирается с расходом 3380 кг/ч и чистотой 99,77 %. Моделирование процессов проводилось в среде Honeywell Unisim Design [2] с использованием модели активности UNIQUAC.



К-1, К-2, К-4 – колонны ректификации; К-3 – колонна экстрактивной ректификации;  
F – фракция C<sub>5</sub>; D<sub>i</sub> – дистиллят колонны j; W<sub>i</sub> – кубовый продукт колонны j;  
Q<sub>Di</sub> – тепловой поток, отводимый от дефлегматора колонны j;  
Q<sub>wi</sub> – тепловой поток, подводимый в куб колонны j

**Рисунок 1 – Технологическая схема выделения изопрена из фракции C<sub>5</sub> пиролиза**

Статическая оптимизация выполнена с использованием декомпозиционного двухэтапного метода [3]. Этот метод предполагает декомпозицию технологической системы на элементы, выполняющие определённые функции и участвующие в формировании критерия оптимальности технологической системы. На первом этапе выполняется оптимизация каждого из элементов по частным критериям оптимальности с учетом общего критерия для системы в целом. На втором этапе выполняется поиск оптимального режима системы по общему критерию оптимальности с использованием традиционных методов.

В общем случае для каждого элемента схемы выбирается частная задача. Для ректификационных колонн рассматриваемого процесса частными задачами являются задачи максимизации отбора дистиллята или кубового продукта заданного качества. В частности, для колонн К-1 и К-3 ставилась задача максимизации отбора кубового продукта требуемого качества, а для колонн К-2 и К-4 ставилась задача максимизации отбора дистиллята требуемого качества.

В данной работе решается задача минимизации удельных технологических затрат на производство изопрена:

$$C^T(F_0, Z_0, U) = \frac{Z^T(F_0, Z_0, U)}{D_4(F_0, Z_0, U)} \rightarrow \min_{U \in \Omega} \quad (2)$$

где, C<sup>T</sup> – удельные технологические затраты на производство 1 кг изопрена, кДж/кг; Z<sup>T</sup> – технологические затраты; D<sub>4</sub> – поток товарного изопрена, кг/ч.

В данной работе в качестве технологических затрат Z<sup>T</sup> рассматривались только потоки теплоты, подводимые к системе V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub>, V<sub>4</sub>:

$$Z^T(V_1, V_2, V_3, V_4) = \sum_{j=1}^4 Q_{Wj} \quad (3)$$

где, Q<sub>wj</sub> – тепловой поток, подводимый в куб колонны, МДж/ч.

На первом этапе для каждого  $j$ -го элемента схемы ХТС с последовательно соединёнными элементами вводится понятие удельного отбора продукта [3]:

$$\eta_j = \frac{F_j z_j}{F_{j-1} z_N^3} \quad (4)$$

где,  $z_j$  – массовая доля целевого компонента в продуктивном потоке;  $z_N^3$  – заданная массовая доля целевого компонента в конечном потоке.

Используя (4) для перехода от первой колонны к последней колонне, представим  $D_4$  в виде:

$$D_4 = F_0 \prod_{j=1}^N \left( \eta_j \frac{z_N^3}{z_j} \right) \quad (5)$$

С учётом (1) подставим (5) в (2) и запишем задачу минимизации удельных технологических затрат в виде:

$$C^T(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4) = \frac{Z^T}{F_0 \prod_{j=1}^N \left( \eta_j \frac{z_N^3}{z_j} \right)} \rightarrow \min_{u \in \Omega} \quad (6)$$

Необходимое условие экстремума критерия оптимальности при этом:

$$\frac{\partial C^T(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4)}{\partial u_{ji}} = \frac{\partial C^T(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4)}{\partial \eta_j} \frac{\partial \eta_j}{\partial u_{ji}} = 0 \quad (7)$$

Можно показать [3], что для критерия оптимальности (6) при закреплённых концентрациях целевого компонента в целевых потоках условие (7) при допущении, что вариация управлений  $u_{ji}$   $j$ -го элемента не влияет на управления остальных элементов технологической системы, имеет вид:

$$\frac{\partial \eta_j(u_{ji})}{\partial Z^T(u_{ji})} - \frac{\eta_j(u_{ji})}{Z^T(u_{ji})} = 0 \quad (8)$$

Введем обозначение:

$$\varphi_{ji}(u_{ji}) = \frac{\partial \eta_j(u_{ji})}{\partial Z^T(u_{ji})} - \frac{\eta_j(u_{ji})}{Z^T(u_{ji})} \quad (9)$$

С учётом условия (8) при заданных концентрациях целевого компонента в выходящих из колонн потоках на первом этапе оптимизации система имеет одну степень свободы, которую следует отнести к возможности варьирования подачей растворителя в колонну К-3 в виде изменения параметра  $\lambda$  (коэффициента соотношения расходов ДМФА и сырья).

В качестве управляющих воздействий на первом этапе оптимизации выбраны паровые потоки в колонны и расход растворителя в колонну К-3. На первом этапе оптимизации последовательно варьировался паровой поток колонн при условии выполнения требований на качество продуктового отбора выбранной  $j$ -й колонны. При этом проверялось выполнение необходимого условия оптимальности общего критерия оптимальности для всей системы по признаку:

$$\varphi_{ji}(u_{ji}) = 0 \quad (10)$$

Для колонны экстрактивной ректификации К-3 выполнение условий на качество кубового продукта и (10) достигалось варьированием парового потока и расходом растворителя. Результаты первого этапа оптимизации представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Параметры управляющих воздействий после первого этапа оптимизации**

Параметр	Колонна разделения			
	К-1	К-2	К-3	К-4
Паровой поток внизу колонны, м <sup>3</sup> /ч	2460	31250	9500	4100
Соотношение ДМФА к сырью	–	–	8,9:1	–

Критерий оптимальности  $C^T$  по сравнению с базовым режимом снизился с 31271 кДж/кг до 20117 кДж/кг. Результатом первого шага оптимизации стало снижение главного критерия оптимальности на 35,7 %.

На втором этапе оптимизации полученный статический режим технологической системы принимается в качестве исходного режима. Если для класса решаемых задач в окрестности полученного режима чувствительность общего критерия к некоторым варьируемым переменным не является существенно нелинейной, то можно установить минимальные значения чувствительности, при удовлетворении которых эти переменные принимаются как оптимальные. Для варьирования остальных переменных выбирается метод поиска экстремума общего критерия оптимальности.

В данной работе после первого этапа оптимизации выполнялся поиск экстремума общего критерия оптимальности методом сканирования с постоянным шагом [4] путем варьирования 5 переменных. Варьирование переменных производилось в диапазоне значений  $\pm 30\%$  от оптимального значения, достигнутого на первом этапе. Результат поиска экстремума представлен в таблице 2.

**Таблица 2 – Параметры управляющих воздействий после второго этапа оптимизации**

Параметр	Колонна разделения			
	К-1	К-2	К-3	К-4
Паровой поток внизу колонны, м <sup>3</sup> /ч	2460	30560	7830	3460
Соотношение ДМФА к сырью	–	–	7,6:1	–

Значение глобального критерия оптимизации составило 19443 кДж/кг. При выполнении второго этапа оптимизации снижение критерия оптимальности составило 3,4 % по сравнению с режимом, полученным на первом этапе оптимизации, и 37,8 % по сравнению с базовым режимом до оптимизации. Основная доля эффекта получена на первом этапе оптимизации и составляет 94,3 % от общего эффекта от оптимизации. Сравнение варьируемых переменных по результатам первого (таблица 1) и второго (таблица 2) этапов оптимизации показало незначительное относительное изменение варьируемых переменных колонн К-1, К-2 и К-4. Значительная доля снижения затрат на втором этапе оптимизации достигнута на колонне экстрактивной ректификации К-3.

### **Выводы**

Применение декомпозиционного двухэтапного метода статической оптимизации для системы выделения изопрена из  $C_5$ -фракции пиролиза позволило снизить критерий оптимальности на 37,8 % по сравнению с базовым режимом функционирования. При этом основная доля эффекта достигается на первом этапе оптимизации.

Для повышения эффективности поэтапного декомпозиционного метода оптимизации целесообразно выполнять оценку чувствительности общего критерия оптимальности системы к варьируемым параметрам по показателям, установленным в решаемой задаче с учётом погрешности измерений и установки управляющих воздействий.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Кривошеев В.П., Ануфриев А.В., Реутов В.А., Филимонцев Е.А., Пугачева Н.В.* Моделирование и оптимизация системы выделения изопрена из фракции углеводородов  $C_5$  пиролиза // *Фундаментальные исследования*. 2018. № 12-1. С. 25-30.

2. UniSim Design Suite – Free Trial of Simulation Software Now Available // 2019. <https://www.honeywellprocess.com/en-US/explore/products/advanced-applications/unisim/Pages/unisim-design-suite.aspx>.

3. Кривошеев В.П. Декомпозиционный метод статической оптимизации химико-технологических систем // Теоретические основы химической технологии. 1984. Т. XVIII, № 3. С. 354 – 361.

4. Кочегурова Е.А. Теория и методы оптимизации : учеб. пособие для академического бакалавриата. М.: Издательство Юрайт, 2017. 133 с.

УДК 677.017:004

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОНФЕКЦИОНИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ COMPUTER TECHNOLOGY IN PACKAGING MATERIALS

Надежда Анатольевна Смирнова\*, Валерий Савельевич Белгородский\*\*,  
Елена Георгиевна Андреева\*\*, Вероника Владимировна Замышляева\*,  
Николай Александрович Балакирев\*\*\*, Марина Анатольевна Гусева\*\*,  
Андрей Валентинович Разбродин\*\*\*\*  
Nadezhda A. Smirnova\*, Valery S. Belgorodsky\*\*, Elena G. Andreeva\*\*,  
Veronika V. Zamyshlyayeva\*, Nikolai A. Balakirev\*\*\*, Marina A. Guseva\*\*,  
Andrey V. Razbrodin\*\*\*\*

\*Костромской государственный университет, Россия, Кострома

\*Kostroma State University, Russia, Kostroma

(e-mail: nadejda.smirnova.a@yandex.ru)

\*\*Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина

(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва

\*\*The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow

(e-mail: elenwise@mail.ru)

\*\*\*Московская государственная академия ветеринарной медицины

и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина, Россия, Москва

\*\*\*Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology –

MVA by K.I. Skryabin, Russia, Moscow

(e-mail: kafedra.zverovodstva@yandex.ru)

\*\*\*\*Российский союз предпринимателей текстильной

и легкой промышленности (Союзлегпром), Россия, Москва

\*\*\*\*Russian Union of Textile and Light Industry Entrepreneurs (Soyuzlegprom), Russia, Moscow

(e-mail: info@souzlegprom.ru)

**Аннотация:** Предложены варианты технологий, обеспечивающих цифровизацию конфекционирования материалов: теоретическое и экспериментальное определение новых показателей технологических и потребительских свойств материалов с использованием автоматизированного измерительного комплекса.

**Abstract:** Variants of technologies have been proposed that ensure the digitization of the selection of materials: the theoretical and experimental determination of new indicators of the technological and consumer properties of materials using an automated measuring complex.

**Ключевые слова:** конфекционирование, цифровизация, компьютерные технологии, моделирование, прогнозирование.

**Keywords:** selection of materials, digitalization, computer technology, modeling, forecasting.

Автоматизация деятельности промышленных предприятий была главной тенденцией развития промышленного производства на протяжении последних десятков лет. Если на

начальном этапе это было связано с новыми возможностями информационных технологий и развитием микропроцессорной техники, то после 2000-х это обусловлено изменением экономических условий. При этом процесс проектирования швейных изделий, а именно, этап конфекционирования материалов, обеспечивающий заданные потребительские свойства изделий, до сих пор остаётся слабо автоматизированным. Существующие методы оценки свойств по стандартам предназначены для приемки и сдачи продукции, а не для оценки функциональных характеристик текстиля. Комплекс показателей, рекомендуемых ГОСТами, дает ограниченную информацию о материалах, не позволяют реализовать графическую запись процессов, например, процессов изгиба и восстановления. Стандартные методы определения трения полотен и способности ткани к сдвигу нитей отсутствуют. Это затрудняет научно обоснованное проектирование изделий легкой промышленности и прогнозирование изменений свойств материалов в условиях производства и эксплуатации [1-3]. Недостаток исследований выше указанных деформаций полотен приводит к тому, что не всегда материалы при изготовлении изделий используются рационально.

Необходимы компьютерные технологии в конфекционировании (рисунок 1).

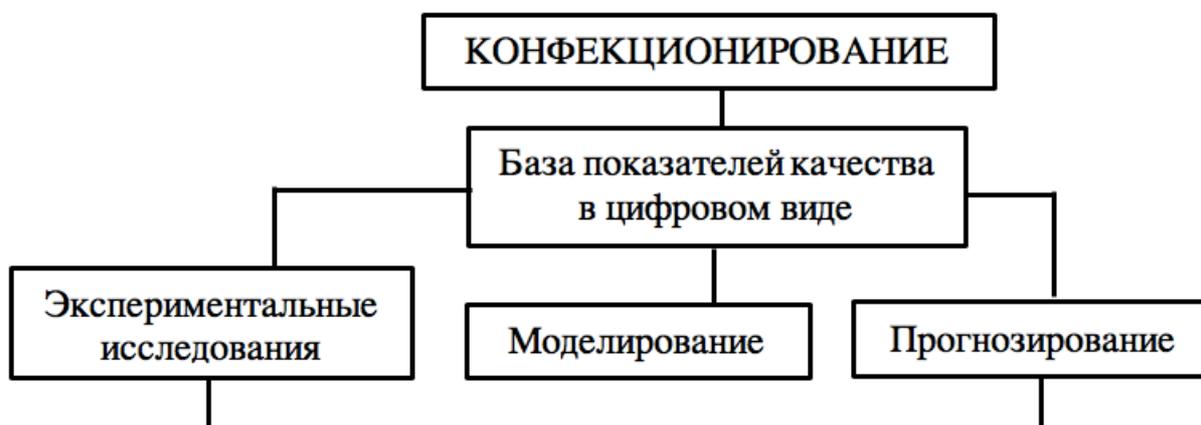


Рисунок 1 – Технологии в конфекционировании

Компьютерные методы определения деформационных и релаксационных свойств исследуемых материалов с учетом их кинетики, реализующие получение новых характеристик, приведенных в таблице 1, являются основой новых цифровых технологий и способствуют переходу к цифровому производству в легкой промышленности [4-7]. Внедрение компьютерных технологий в конфекционировании реализуется с помощью инструментального комплекса определения технологических и потребительских свойств материалов.

Зарубежный измерительный комплекс «Кавабата» дорогой и недоступный для предприятий, поэтому необходимо серийное производство отечественных автоматизированных комплексов для экспериментальных исследований технологических и потребительских свойств материалов, позволяющих формировать базу данных по характеристикам свойств материалов в цифровом виде. База оцифрованных данных по мало изученным свойствам: изгиб, сдвиг нитей в ткани, растяжение в динамических условиях, трение, термомеханический анализ, которые определяют назначение материалов, позволяет осуществлять рациональное конфекционирование материалов и дает возможность прогнозировать свойства и их изменения под влиянием внешних воздействий.

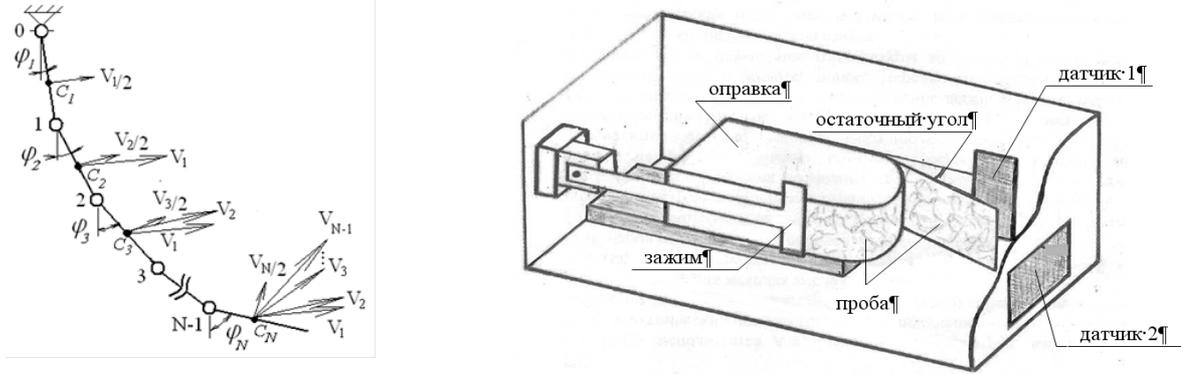
Таблица 1 – Сведения о ряде методов разработанного измерительного комплекса

Название метода	Характеристики свойств		Правовая защита
	общепринятые	новые	
Метод определения свойств материалов текстильной и легкой промышленности при изгибе	Жесткость при изгибе – $R_{изг}$ , сН; Упругость – $U$ , %	Работа изгиба – $A_{изг}$ , мкДж	Патент РФ на изобретение № 2267784 10.01.2006
Метод определения релаксационных свойств материалов при изгибе	Жесткость при изгибе – $R_{изг}$ , сН; Упругость – $U$ , % Работа изгиба – $A_{изг}$ , мкДж	Работа восстановления после изгиба – $A_{визг}$ ; Разность работ при изгибе – $\Delta A_{изг}$ , мкДж Релаксация усилий при изгибе – $\Delta P_{изг}$ , сН; Коэффициент формоустойчивости при изгибе – $K_{изг}$	Патент РФ на изобретение № 2422822 27.06.2011
Метод определения релаксационных характеристик текстильных материалов после изгиба		Коэффициент жесткости – $C$ , Н/м; Упругость – $\tau$ , сек Остаточная деформация – $\alpha$ , град	Патент РФ на изобретение № 2217747 27.11.2003
Метод определения эксплуатационных свойств текстильных материалов после изгиба	Коэффициент жесткости – $C$ , Н/м; Упругость – $\tau$ , сек; Остаточная деформация – $\alpha$ , град	Скорость восстановления после изгиба – $v$ , м/с; Вынужденная эластичность – $\alpha^*$ , град; Пластичность – $\alpha'_{ост}$ , град	Патент РФ на изобретение № 2410688 27.01.2011
Метод определения релаксационных свойств материалов при сдвиге		Жесткость при сдвиге – $R_{сдв}$ , сН; Коэффициент формуемости – $\alpha_p$ Падение усилия при сдвиге – $\Delta P_{сдв}$ , %; Работа сдвига – $A_{сдв}$ , мкДж; Работа восстановления после сдвига – $A_{всдв}$ ; Разность работ при сдвиге – $\Delta A_{сдв}$ , мкДж Коэффициент формоустойчивости при сдвиге – $K_{сдв}$	Патент РФ на изобретение № 2549497 27.04.2015
Методика термомеханических исследований материалов и систем материалов	Температура стеклования, $T_c$	Температурные пределы работоспособности (по серии ТМК, снятых при разных напряжениях)	Патент РФ на полезную модель № 48070 10.09.2005

Другой вариант применения компьютерных технологий в конфекционировании – моделирование и прогнозирование характеристик технологических и потребительских свойств. В качестве примера рассмотрен расчетный метод, дающий возможность прогнозирования динамических свойств материалов в процессе их восстановления после

изгиба, в котором осуществлено моделирование процесса восстановления ткани после изгиба (рисунок 2) [8].

Для решения поставленной задачи проба (полоска ткани) массы ( $m$ ) и длины ( $l$ ) представлена как совокупность ( $N$ ) прямолинейных жёстких стержней с равномерно распределенной массой, соединённых шарнирами и упругими элементами (спиральными пружинами), препятствующими их повороту относительно друг друга.



**Рисунок 2 – Модель пробы и схема устройства для проведения испытаний на изгиб в динамическом режиме**

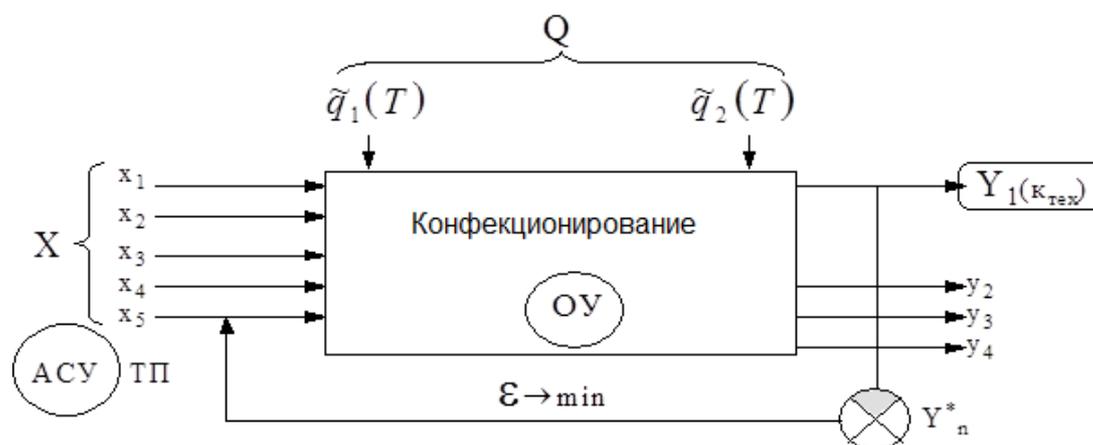
Коэффициент жесткости спиральной пружины ( $k$ ) определен из условия равенства прогиба на свободном конце консольной балки длиной, равной длине стержневого элемента модели, с изгибной жёсткостью, равной жёсткости пробы, и отклонения свободного конца абсолютно жёсткого консольного стержня той же длины с упругим элементом в виде спиральной пружины на другом конце. Были составлены уравнения Лагранжа 2-го рода движения пробы. В качестве обобщенных координат приняты углы поворота стержневых элементов  $\varphi_i$ . В результате анализа уравнений были установлены закономерности формирования коэффициентов системы. В итоге получена система сильно нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, которая в матричном представлении имеет вид:

$$([M] \cdot \cos[\Delta\varphi]) \cdot [\ddot{\varphi}] = -([M] \cdot \sin[\Delta\varphi]) \cdot [\dot{\varphi}^2] - \frac{kN^3}{ml^2} [K] \cdot [\varphi] \quad (1)$$

где  $[\varphi]$ ,  $[\dot{\varphi}]$ ,  $[\ddot{\varphi}]$  – вектора углов поворота, угловых скоростей и угловых ускорений стержневых элементов модели, соответственно;  $[M]$ ,  $[K]$  – матричные коэффициенты

Система решена численным методом переменного порядка Адамса–Бэшфорта–Милтона, являющимся особенно эффективным для нежёстких систем дифференциальных уравнений, правые части которых вычисляются по сложным формулам. Программирование осуществлено в среде MatLab с относительной точностью вычислений  $10^{-3}$ . В результате получена возможность теоретически определять кинематические параметры пробы ткани, в том числе, длину пути и скорость концевой свободной части в процессе «раскрытия» пробы (см. рис. 2), а также анализировать влияние жесткости и массы пробы на её кинематические параметры. При  $N=60$  относительное отклонение экспериментально и теоретически определённой скорости концевой свободной части пробы в процессе её «раскрытия» составило не более 2%, периода свободных колебаний – менее 1%.

Прогнозирование характеристик свойств материалов при конфекционировании может осуществляться с учетом методологических особенностей, характерных для системного подхода (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Схема системы прогнозирования свойств тканей:**  
**X – входные факторы, Y – выходные параметры, Q – возмущающие факторы,**  
**ОУ – объект управления по отклонению  $\varepsilon$**

Процесс прогнозирования свойств тканей реализован посредством связей характеристик структуры тканей с технологическими и потребительскими свойствами. Процесс ограничения обеспечивает соответствие выхода системы целям конфекционирования.

Наличие обратной связи позволяет сравнивать выборку выхода с моделью выхода,  $Y_i$  с  $Y_n^*$ , оценивать содержание и смысл различия и вырабатывать решение по корректировке входных параметров, например, взять ткань с большей или меньшей плотностью, поверхностной плотностью ( $M_s$ ) и др. Формируя процесс ввода, управляют показателями технологических и потребительских свойств тканей в соответствии с требованиями. Управление процессом осуществляется по отклонению, которое должно стремиться к минимуму:  $|Y_n^* - Y_i| \rightarrow \min$ .

Конфекционирование материалов с требуемыми свойствами открывает широкие возможности повышения качества продукции.

В качестве компьютерной технологии в конфекционировании актуально интеллектуальная система, которая способна обобщить накопленный опыт в рамках конкретного технологического процесса, выдавать рекомендации, прогнозы в отношении свойств материалов при заданных вариантах структуры, развиваться и обновлять свою структуру на основе новых поступающих данных, не требуя при этом глубоких научных знаний в области моделирования.

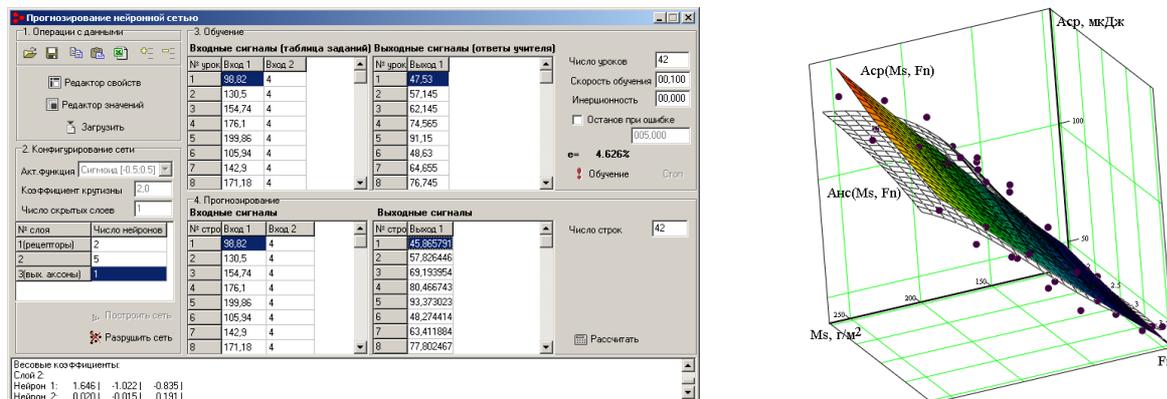
Такая интеллектуальная система создана на базе искусственных нейронных сетей (ИНС). ИНС, аналогичная по структуре головному мозгу человека, способна выполнять функции группировки и классификации, обобщения их свойств.

Тестирование ИНС производится на подмножестве контрольных данных, составляющих обучающее подмножество. Проверка пригодности к обобщению данных и решению задачи прогнозирования осуществляется на типичных элементах генерального множества с оценкой приемлемости результатов прогнозирования по величине погрешности.

Для решения поставленной задачи разработан и зарегистрирован собственный программный продукт «NeuroPrognosis» (рисунок 4) [9].

Преимущества разработанной ИНС при прогнозировании характеристик свойств текстильных материалов: автоматический выбор факторов из числа известных параметров, поэтому нет необходимости решать задачу факторного и корреляционного анализа; возможность получить более высокую точность аппроксимации экспериментальных данных, чем методами регрессионного анализа; адаптивность сети к практически любому набору данных, любым характеристикам и показателям.

Анализ результатов исследований [10, 11] показал возможность применения ИНС и разработанной программы «NeuroPrognosis» для прогнозирования свойств материалов по характеристикам строения (см. рисунок 4).



**Рисунок 4 – Главное окно программы «NeuroPrognosis» и графическое представление эмпирической формулы работы изгиба  $A_{cp}(Ms, Fn)$  и результатов генерирования ИНС  $A_{nc}(Ms, Fn)$**

### Выводы

1. Компьютерные технологии позволяют реализовать цифровизацию конфекционирования в разных вариантах: с использованием автоматизированного измерительного комплекса; моделирования; с использованием системного подхода на основе аналитических зависимостей и с использованием искусственных нейронных сетей.
2. Цифровизация конфекционирования – залог успешного функционирования систем автоматизированного проектирования одежды и выпуска конкурентоспособных и качественных изделий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Замышляева В.В.* Разработка классификации экспериментальных методов определения жесткости при изгибе материалов текстильной и лёгкой промышленности / В.В. Замышляева, Н.А. Смирнова, В.В. Лапшин // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. Санкт-Петербург, 2009. – №4. – С. 19-26.
2. *Замышляева В.В.* Анализ методов определения показателей жесткости текстильных материалов при их растяжении / В.В. Замышляева, Н.А. Смирнова, В.В. Лапшин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. Иваново, 2009, № 4. – С. 10-12.
3. *Воронова Л.В.* Анализ методов для определения трения и цепкости текстильных полотен / Л.В. Воронова, Н.А. Смирнова, А.Н. Флегонтов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – Иваново, 2012. – № 4(340).– С.45-49.
4. *Лапшин В.В.* Автоматизированная система для термомеханических исследований текстильных материалов / В.В. Лапшин, Н.А. Смирнова, Е.Н. Борисова, В.В. Семенов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – Иваново, 1999. –№ 6. – С. 135-136.
5. *Добрынина Н.Н.* Автоматизированный метод и устройство для исследования показателей качества тканей при сдвиге нитей / Н.Н. Добрынина, Н.А. Смирнова, В.В. Замышляева, В.В. Лапшин // Современные проблемы науки и образования, 2014. – № 6; URL: [www.science-education.ru/120-16521](http://www.science-education.ru/120-16521).
6. *Лапшин В.В.* Автоматизированное устройство для определения жёсткости и упругости материалов и пакетов материалов / В.В. Лапшин, Н.А. Смирнова, Д.А. Козловский // Вестник Костромского государственного университета: рецензируемый периодический научный журнал. – Кострома: КГТУ, 2004. – № 9. – С. 32-34.

7. Смирнова Н.А. Исследование отечественного прибора для определения свойств текстильных полотен при деформации сдвига / Н.А. Смирнова, В.Е. Кузьмичев, В.В. Замышляева, В.В. Лапшин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – Иваново, 2017. – № 3 (369). – С. 93-97.

8. Бойко С.В. Моделирование процесса восстановления ткани после изгиба. / С.В. Бойко, Н.А. Смирнова, В.В. Замышляева, В.В. Лапшин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. Иваново – 2010 – №2. – С. 25-27.

9. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018619528. Программа «Neuro-Prognosis» / Лапшин В.В., Козловский Д.А., Ершов В.Н., Смирнова Н.А., Замышляева В.В. / правообладатель Костромской гос. ун-т. – в Реестре программ для ЭВМ от 07.08.2018.

10. Замышляева В.В. Прогнозирование упругих свойств дублированных систем материалов / В.В. Замышляева, Н.А. Смирнова, В.В. Лапшин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 2018. № 2 (374). С. 120-123.

11. Замышляева В.В. Использование нейронной сети для прогнозирования формоустойчивости дублированных пакетов одежды / В.В. Замышляева, В.В. Лапшин, Н.А. Смирнова, В.Н. Ершов, Н.В. Переборова // Известия вузов. Технология легкой промышленности. Санкт-Петербург, 2018. – Т.40, № 2. – С. 22-26.

УДК 534-8

**КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭКСТРАКЦИИ  
ПАТОЛОГИЧЕСКОГО СОДЕРЖИМОГО ИЗ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
COMPUTER MODEL OF ULTRASONIC EXTRACTION OF PATHOLOGICAL  
CONTENTS FROM BIOLOGICAL SYSTEMS**

**Владимир Николаевич Хмелёв\*, Роман Николаевич Гольх\*, Валерий Викторович  
Педдер\*\*, Инесса Александровна Пастушенко\*\*, А.И. Шепелева\*,  
Виктор Александрович Нестеров\*  
Vladimir N. Khmelev\*, Roman N. Golyh \*, Valery V. Pedder\*\*, Inessa A. Pastushenko\*\*,  
A. I. Shepeleva\*, Victor A. Nesterov\***

\*Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Россия, Бийск

\*Biysk Institute of Technology (branch) of Altai State Technical University after I.I. Polzunova,  
Russia, Biysk

(e-mail: romangl90@gmail.com)

\*\*ООО «Научно-производственное предприятие «Метромед», Омск, Россия  
LLC Metromed Research and Production Enterprise, Omsk, Russia

*Аннотация:* В статье описана предложенная компьютерная модель процесса течения патологического содержимого в биологических системах под действием ультразвука.

*Abstract:* The article describes the proposed computer model of the process of flow of the pathological content in biological systems under the action of ultrasonic.

*Ключевые слова:* ультразвук, капилляры, амплитуда, биоткань, экстракция.

*Keywords:* ultrasound, capillaries, amplitude, biological tissue, extraction.

Раневая инфекция, проявляющаяся у 35-45% пациентов хирургических стационаров и у еще большего числа больных онкологического профиля, является не только клинической, но и общебиологической проблемой. У большинства из пациентов, в последующем, развиваются послеоперационные раневые осложнения, сопровождаемые синдромом эндогенной интоксикации. Одним из перспективных подходов к местному удалению экстракцией раневого содержимого, включающего эндотоксины, из очага инфекции в биотканях – природных капиллярно-пористых системах [1] – является возможность использования энергии ультразвука.

Для выявления оптимальных режимов ультразвукового воздействия, которые позволят одновременно обеспечить максимальную эффективность удаления раневого содержимого и безопасность воздействия для человека целесообразно применять компьютерное моделирование, позволяющее непосредственно определить скорость течения раневого содержимого, учитывая:

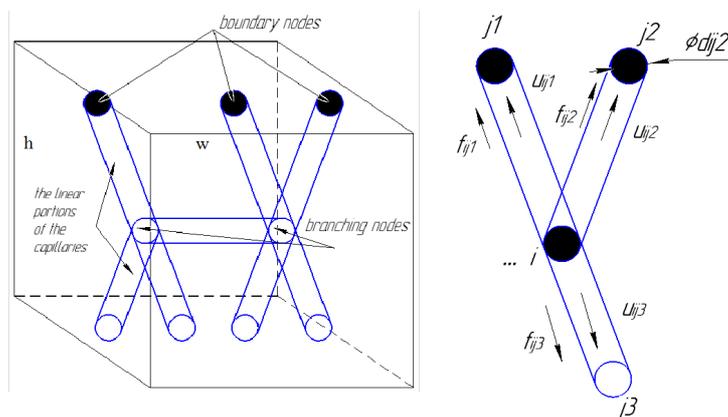
- вторичные силы акустической природы, способствующие течению раневого содержимого;
- разветвленность структуры биоткани, т.е. разветвлённость структуры пор капиллярно-пористой системы.

Компьютерное моделирование не требует проведения экспериментов на модельных средах, с помощью которых невозможно точно симитировать биоткань человека.

На сегодняшний день инструменты численного анализа моделей и визуализации течения жидкой фазы в капиллярах, в основном, реализованы в виде САЕ-систем (ANSYS, COMSOL Multiphysics, ABAQUS, FreeFEM, OpenFOAM). Однако такие системы, как COMSOL Multiphysics, ABAQUS [2] не содержат удобных и эффективных средств моделирования течения жидкой фазы в капиллярно-пористых системах и требует детальной разработки геометрии каналов пор в биоткани. FreeFEM разработан для решения широкого класса задач математической физики, но эффективно применим только для двумерных случаев. При этом ANSYS и OpenFOAM даже с дополнительными модулями и инструментами настройки невозможно использовать для решения узкоспециализированных задач течения жидкой фазы в пористых средах, так как в них нет учета действия сил акустической природы.

Таким образом, эффективной и удобной САЕ-системы на сегодняшний день для расчёта течения жидкой фазы (патологического содержимого в биотканях под действием ультразвуковых колебаний не существует. Это свидетельствует о необходимости разработки компьютерной модели и программного модуля для расчета скорости течения раневого содержимого в биоткани с учетом разветвленности пор и действия сил акустической природы.

Для расчетов рассматривается выделенный элемент биоткани, с заданной структурой пор, содержащих удаляемое раневое содержимое, представленный на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Структура элемента биоткани**

Система капилляров с узлами ветвления и граничными узлами представляет собой неориентированный граф  $G = (V, E)$  (где  $V$  – множество узлов;  $E$  – множество прямолинейных цилиндрических капилляров, соединяющих узлы). Множество узлов представляет собой объединение двух непересекающихся подмножеств  $V = B \cup S$  ( $S$  – граничные узлы;  $B$  – узлы ветвления). Для каждого узла определён радиус-вектор  $r_i$ , определяющий его расположение в пространстве;  $p_i$  – постоянное давление в узле. Для капилляра определен вектор средней (по поперечному сечению) скорости  $u_{ij}$  течения жидкой фазы в капилляре, соединяющем узлы  $i$  и  $j$ , м/с;  $S_{ij}$  – площадь поперечного сечения капилляра,

соединяющего  $i$ -й и  $j$ -й узлы, м;  $f_{ij}$  – удельная сила, действующая на единицу длины капилляра, соединяющего  $i$ -й и  $j$ -й узлы и обусловленная ультразвуковым воздействием, Н/м.

Ультразвуковое воздействие характеризуется амплитудой колебаний ( $A$ ) биоткани и частотой колебаний ( $f$ ).

С помощью известных характеристик нужно найти удельный расход раневого содержимого через единицу площади поверхности выделенного элемента биоткани.

Конечная цель исследования компьютерной модели процесса течения раневого содержимого в капиллярах биоткани под действием ультразвуковых колебаний – выявление режимов (по частоте и интенсивности ультразвукового воздействия), обеспечивающих максимальную скорость удаления раневого содержимого (кг/с), при соблюдении требований безопасности.

$$G(f, I) \rightarrow \max. \quad (1)$$

Для вычисления целевой функции в зависимости от параметров колеблющейся поверхности рабочего инструмента разработана модель течения раневого содержимого. Расчёт целевой функции согласно разработанной модели проводился с помощью программного модуля, созданного в NetBeans IDE на языке Java.

Для капилляров и узлов ветвления в них выполняются законы сохранения массы протекаемой жидкости (раневого содержимого) (2):

$$\sum_{j \in \{i, j\} \in E} (u_{ij} \frac{r_i - r_j}{|r_i - r_j|}) S_{ij} + \begin{cases} 0, \text{ если } i \notin S \\ u_i, \text{ если } i \in S \end{cases} = 0; (u_{ij}, r_i - r_j) = |u_{ij}| |r_i - r_j|; u_{ij} = u_{ji}; \quad (2)$$

где  $E$  – множество прямолинейных цилиндрических капилляров, соединяющих узлы;  $u_{ij}$  – скорости течения жидкой фазы в капилляре, соединяющем узлы  $i$  и  $j$ , м/с;  $r_i, r_j$  – радиус-вектор для узлов  $i$  и  $j$ , определяющий их расположение в пространстве;  $S_{ij}$  – площадь поперечного сечения капилляра, соединяющего  $i$ -й и  $j$ -й узлы;

и закон сохранения импульса (3)

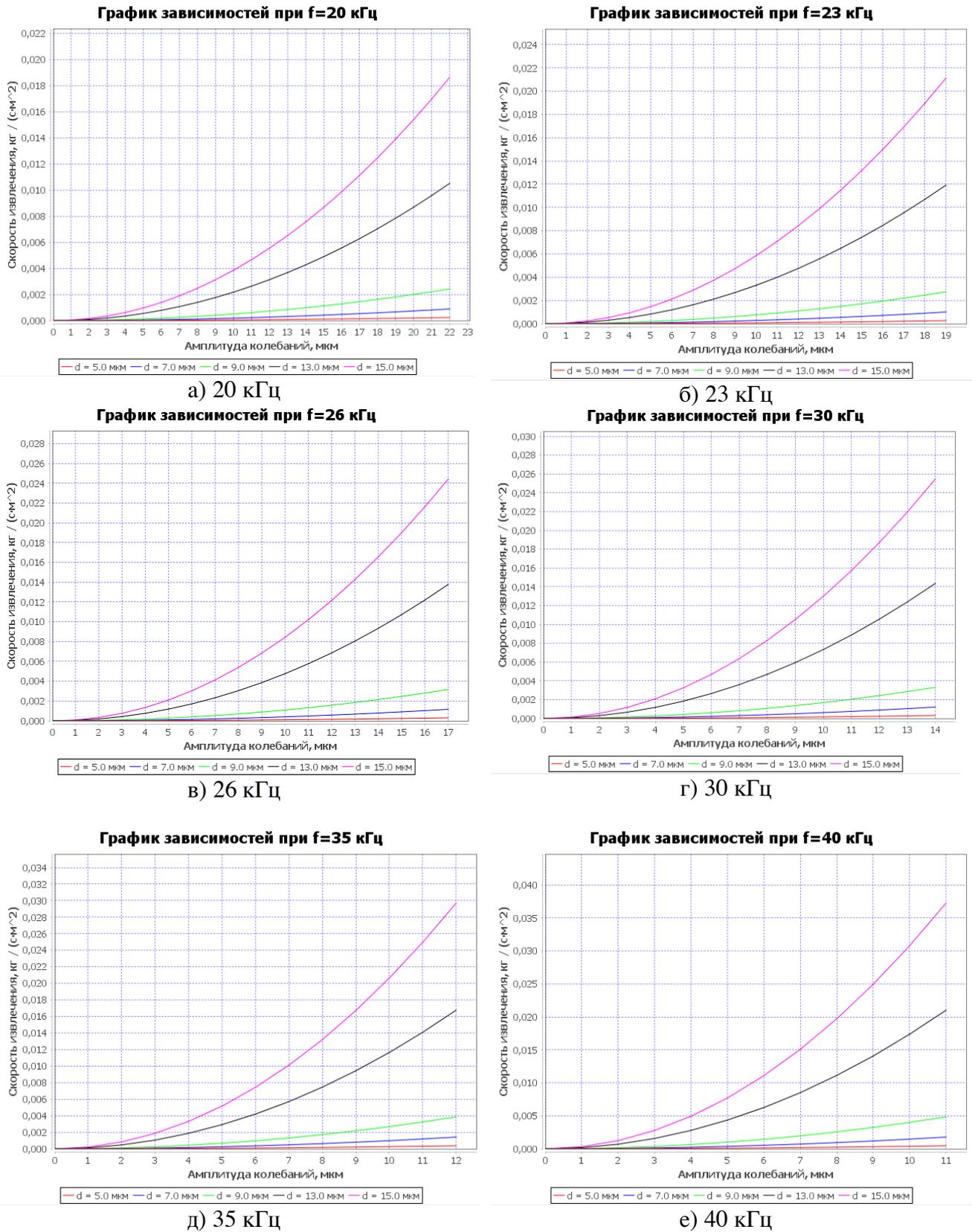
$$f_{ij} |r_i - r_j| - 32\eta |r_i - r_j| u_{ij} = (p_i - p_j) \frac{r_i - r_j}{|r_i - r_j|} S_{ij}; f_{ij} = f_{ji}; \quad (3)$$

где  $f_{ij}$  – сила, вызванная ультразвуковым воздействием, Н/м;  $r_i, r_j$  – радиусы-векторы для узлов  $i$  и  $j$ , определяющие их расположение в пространстве, м;  $\eta$  – вязкость раневого содержимого, Па·с;  $u_{ij}$  – скорость течения жидкой фазы в капилляре, м/с;  $p_i, p_j$  – давление в узлах, Па.

На основании модели получены зависимости скорости экстракции от амплитуды при различных диаметрах капилляров, представленные на рисунке 2. Выбранные диаметры пор соответствуют мышечной и соединительной биологическим тканям [1].

Проведённые исследования зависимости скорости экстракции от амплитуды и частоты при различных диаметрах капилляров позволили выявить следующие закономерности.

Зависимость скорости экстракции от амплитуды имеет характер, пропорциональный квадрату последней. Это связано с тем, что объёмная сила, способствующая массопереносу раневого содержимого, пропорциональна квадрату звукового давления (из-за того, что сила вызвана плоской бегущей волной). Например, при амплитуде 9 мкм скорость экстракции составляет 0,025 кг в секунду на 1 м<sup>2</sup> поверхности биоткани, при 10 мкм – 0,031 кг/(с·м<sup>2</sup>), при 11 мкм – 0,037 кг/(с·м<sup>2</sup>) (частота 40 кГц, диаметр пор 15 мкм).



**Рисунок 2 – Зависимость удельной скорости от амплитуды колебаний для разных размеров капилляров**

С этим же фактом связан квадратичный рост скорости экстракции при повышении частоты (поскольку колебательная скорость биоткани линейно пропорциональна частоте).

Например, при частоте 40 кГц скорость экстракции составляет 0,031 кг/(с·м<sup>2</sup>), при 35 кГц – 0,021 кг/(с·м<sup>2</sup>), при 30 кГц – 0,013 кг/(с·м<sup>2</sup>) (амплитуда 10 мкм, диаметр пор 15 мкм).

При уменьшении диаметра пор, существенно падает скорость экстракции, что связано с возрастанием градиента скорости в порах и, следовательно, с возрастанием сил вязкого трения, препятствующих экстракции. Например, при диаметре пор 15 мкм скорость экстракции составляет 0,037 кг/(с·м<sup>2</sup>), при 13 мкм – 0,021 кг/(с·м<sup>2</sup>), при 9 мкм – 5 г/(с·м<sup>2</sup>) (частота 40 кГц, амплитуда 11 мкм).

Это свидетельствует об эффективности применения ультразвукового воздействия для удаления раневого содержимого.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-00227 А.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Педдер В.В., Лоцилова Л.В., Бяллер В.В., Саврасов Г.В., Шевелев Н.В. «Обратный» ультразвуковой капиллярный эффект и его использование в хирургии // Проблемы техники и медицины: материалы IV Всесоюзной конференции. 1987. С. 57-67.

2. Белостоцкий А.М. Разработка верификационного отчета по использованию программного комплекса Abaqus для решения задач строительного профиля // Верификационный отчет. Том 1. Теоретические основы. Москва, 2013.

УДК 539.3

## ГРАНИЦЫ ЗОН ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДОГРУЗКИ И УПРУГОЙ РАЗГРУЗКИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ СТАЛИ 40Х

## THE BOUNDARIES OF THE ZONES OF PLASTIC LOADING AND ELASTIC UNLOADING IN THE SOLUTION OF THE STABILITY PROBLEM OF A CIRCULAR CYLINDRICAL SHELL OF STEEL 40X

Степан Валерьевич Черемных, Павел Олегович Скудалов  
Stepan V. Cheremnykh, Pavel O. Skudalov

*Тверской государственный технический университет, Россия, Тверь*  
*Tver state technical university, Russia, Tver*  
*(e-mail: cheremnykh\_s.v@mail.ru, p.s@live.ru)*

**Аннотация:** Рассматривается задача упругопластической бифуркации круговой тонкостенной цилиндрической оболочки. Решение строится на основе теории устойчивости неупругих систем при сложном нагружении В.Г. Зубчанинова. Используются условие несжимаемости материала и условие однородности напряженного состояния в оболочке до момента потери устойчивости. Задача решается в геометрически линейной постановке [1].

**Abstract:** The task under consideration is that elastic-plastic bifurcation of circular thin-walled cylindrical shell. The solution is based on the basis of the theory of the stability of inelastic systems with the combined loading, created by V.G. Zubchaninov. The condition of the incompressibility of material and the condition of the uniformity of the stressed state in the shell till the moment of loss of stability are used. The problem is solved in a geometrically linear setting [1].

**Ключевые слова:** устойчивость, пропорциональное нагружение, бифуркация, деформация, упрочнение, границы раздела зон, оболочка.

**Keywords:** stability, proportional load, bifurcation, deformation, strengthening, interface of the zones, shell.

При принятых допущениях решение задачи устойчивости сводится к решению задачи о собственных числах на основе которой можно вычислить значение гибкости оболочки  $i = 3R/h$  в зависимости от величины модуля вектора напряжений  $\sigma$  и параметров волнообразования  $m, n$ , реализующихся при потере устойчивости. При расчетах на основе теории устойчивости А.А. Ильюшина, в которой связь напряжений и деформаций принимается в соответствии с определяющими соотношениями теории квазипростых процессов [2, 3], являющейся частным вариантом гипотезы компланарности, система алгебраических уравнений задачи о собственных числах принимает вид (1) и (2):

$$i^2 \frac{\sigma}{Eg_1} \left( -K_* - \frac{EN_1^*}{2\sigma\theta} \lambda_m^4 \right) + i \frac{3}{2} \frac{N_1^* \Phi^*}{g_1 \theta} \lambda_m^2 K_* S_* = (\lambda_m^2 + n^2)^2 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{g_2}{g_1} \right) K_*^2 + \frac{9}{8} \frac{N_1^* \Phi^{*2}}{g_1 \theta} K_*^2 S_*^2, \quad (1)$$

$$C\theta = \frac{N_1^*}{2} \lambda_m^2 - \frac{3}{4} \frac{N_1^* \Phi^*}{i} K_* S_*,$$

$$N_m = \int_{-h/2}^{h/2} Nz^{m-1} dz, P_m = \int_{-h/2}^{h/2} Pz^{m-1} dz \quad (2)$$

Для определяющих функций пластичности принимаем кусочно-линейные аппроксимации (3)

$$\begin{cases} N = 2G(1-\omega), P = 2G(1-\lambda), & 0 \leq \vartheta_1 \leq \pi/2 \\ N = P = 2G, & \pi/2 \leq \vartheta_1 \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

где  $\omega$  – параметр пластичности А.А.Ильюшина;  $\lambda$  – параметр разупрочнения.

Разбивая в (3) интегрирование по зонам и полагая, что зона разгрузки примыкает к поверхности  $z_p^* = -1$ , имеем [1]

$$\begin{aligned} N_m^* &= \frac{1}{m} \left[ 1 - (-1)^m - \omega(1 - Z_p^{*m}) \right], \\ P_m^* &= \frac{1}{m} \left[ 1 - (-1)^m - \lambda(1 - Z_p^{*m}) \right], \quad (m = 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (4)$$

Для определения координаты границы раздела зон упругой разгрузки и пластической догрузки материала имеем уравнения

$$4Z_p^* + \lambda(1 - Z_p^*)^2 = 2f_1, \quad f_1 = P_1^* z_p^* - P_2^*, \quad \tau = \cos \vartheta_1 = \sigma \cdot p_1 = \frac{\sigma \cdot \bar{\Theta}}{s}, \quad (5)$$

где  $\vartheta_1$  – угол сближения;  $-1 \leq z_p^* \leq +1$ .

Если зона разгрузки не образуется, то полагаем  $Z_p^* = P_2^* = P_1^* = \Phi^* = 0$ .

В основу модифицированной теории устойчивости оболочек за пределом упругости В.Г. Зубчанинова [1 - 7] положено предположение, что бесконечно малое продолжение процесса, связанное с бифуркацией, является простым или локально простым. В этом случае

$$\bar{\sigma} = P\bar{\Theta}, \quad S_{ij} = P\Theta_{ij}, \quad (6)$$

где для зоны пластической догрузки  $P = 2G_k$ , а для зоны разгрузки  $P = 2G$ .

Основные уравнения задачи принимают вид [1]

$$\begin{cases} i^2 = \frac{Eg_2}{\sigma} (\lambda_m^2 + n^2)^2 \left[ -K_* - \frac{EP_1^* \lambda_m^4}{2\sigma\theta} \right]^{-1} \\ C\theta = \frac{P_1^*}{2} \lambda_m^2, \quad \theta = (\lambda_m^2 + n^2)^2 \end{cases} \quad (7)$$

Ранее, при решении задач бифуркации цилиндрических оболочек, графики координат границ раздела зон упругой разгрузки и пластической догрузки материала не строились. Между тем, как показывают последние исследования [2, 6, 7], изучение и анализ данного

вопроса существенно способствуют обоснованию использования различных вариантов теории пластичности для получения физически достоверных результатов решения задачи устойчивости как при простых, так и сложных процессах комбинированного докритического нагружения конструкций.

Представленное в настоящей работе решение выполнено для оболочек, изготовленных из стали 40X. Рассматривались две партии материала. Химический анализ проводился в лаборатории Тверского вагоностроительного завода на оборудовании Foundry Master 01H0076 (Optik 01H0077). Результаты химического анализа приведены в таблицах 1 и 2. В соответствии с ГОСТ 4543-71 обе партии относятся к низколегированной стали 40X.

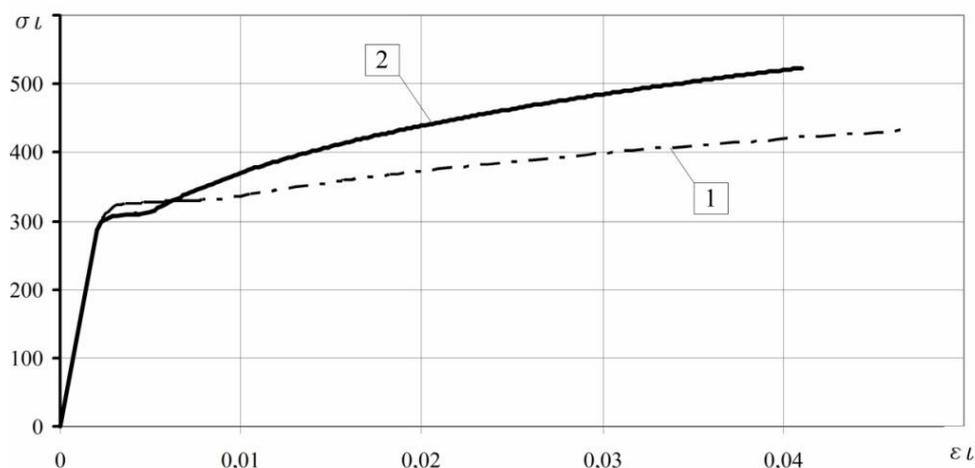
**Таблица 1 – Химический состав материала. Партия 1**

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
97.1	0.374	0.153	0.721	0.0173	0.0266	0.924	0.0251
Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
0.197	0.0033	0.0027	0.175	0.0153	0.0042	0.0191	0.0455
Pb	Sn	B	Ca	Zr	As	Bi	
0.0873	0.002	0.0139	0.0007	0.0298	0.0535	0.09	

**Таблица 2 – Химический состав материала. Партия 2**

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
97.2	0.44	0.267	0.745	0.0176	0.0117	0.995	0.0119
Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
0.0544	0.0344	0.0032	0.0573	<0.002	<0.002	0.0041	0.0246
Pb	B	Ca	Zr	As	Bi		
<0.05	0.0038	>0.0007	0.0045	0.0127	<0.09		

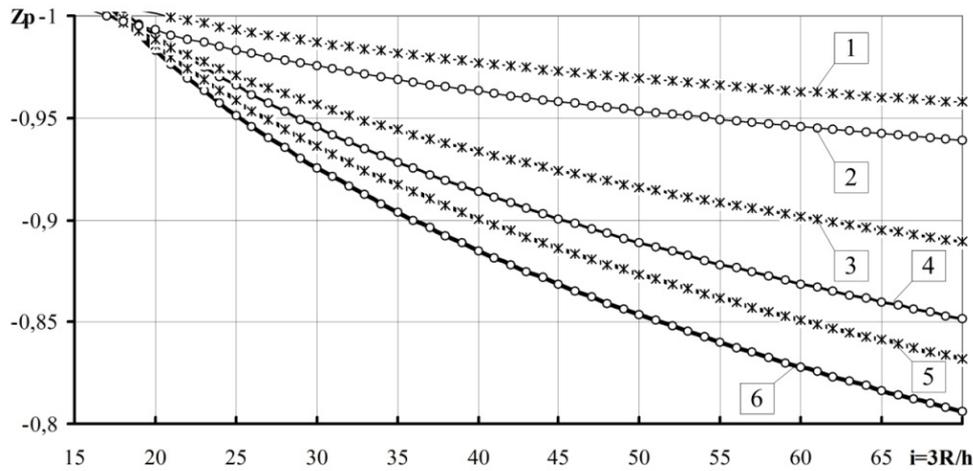
Диаграммы деформирования материала при сжатии представлены на рисунке 1, где  $\sigma$  – интенсивность напряжений;  $\varepsilon$  – интенсивность деформаций; 1 - Партия 1; 2 - Партия 2.



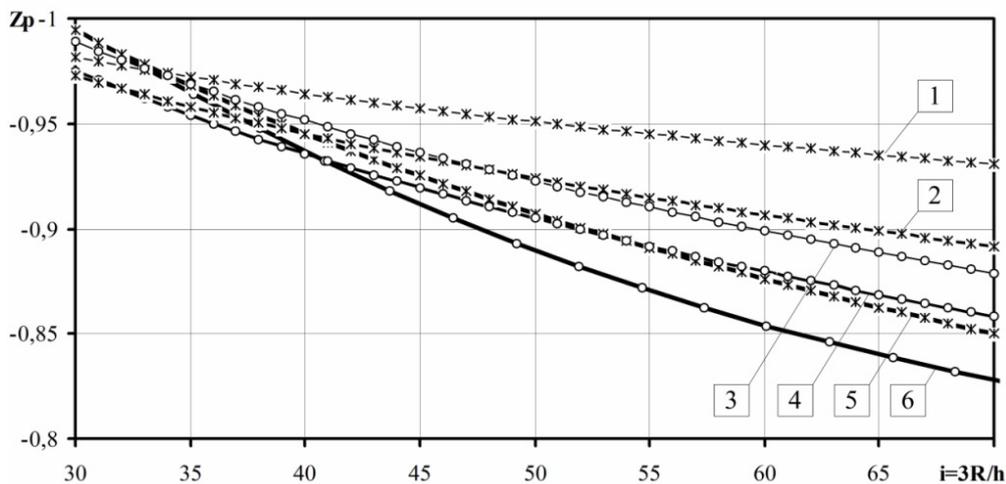
**Рисунок 1 – Диаграмма деформирования материалов.**

Как следует из рисунка 1, материал второй партии характеризуется существенно большим упрочнением. Так, при  $\varepsilon_i = 0,02$  соотношение касательных модулей материалов составляет  $E_k^1/E_k^2 = 56\%$ .

Результаты расчетов безразмерных координат границы раздела зон материалов представлены на рисунках 3, 4. Цифрами обозначены: 1 - Партия 1 при  $\alpha=0$ ; 2 - Партия 2 при  $\alpha=0$ ; 3 - Партия 1 при  $\alpha=45^\circ$ ; 4 - Партия 2 при  $\alpha=45^\circ$ ; 5 - Партия 1 при  $\alpha=90^\circ$ ; 6 - Партия 2 при  $\alpha=90^\circ$



**Рисунок 2 – Координаты границ раздела зон на основе модифицированной теории устойчивости В. Г. Зубчанинова**



**Рисунок 3 – Координаты границ раздела зон на основе теории устойчивости А. А. Ильюшина**

**Выводы**

Из полученных результатов следует, что для всех рассмотренных процессов зона разгрузки в целом не велика. В наибольшей степени разгрузка проявляется для процессов чистого сжатия. С уменьшением гибкости оболочки координата границы раздела зон приближается к значению  $z_p^* = -1$ , что соответствует чисто пластической потере устойчивости. Влияние угла  $\alpha$  наклона луча траектории в плоскости  $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$  на величины  $z_p^*$  при расчетах по теории устойчивости А.А. Ильюшина проявляется в меньшей степени, чем при расчетах по модифицированной теории устойчивости В.Г. Зубчанинова.

Согласно модифицированной теории устойчивости В.Г. Зубчанинова, при, например,  $i = 70$  соотношение координат границ раздела зон образцов партии 1 и партии 2 составляет:

$$\frac{z_p^{*1}}{z_p^{*2}} = 2,6\% \text{ при } \alpha = 0; \frac{z_p^{*1}}{z_p^{*2}} = 4,0\% \text{ при } \alpha = 45^\circ; \frac{z_p^{*1}}{z_p^{*2}} = 3,7\% \text{ при } \alpha = 90^\circ$$

По теории устойчивости А.А. Ильюшина при  $i = 70$  имеем:

$$\frac{z_p^{*1}}{z_p^{*2}} = 4,4\% \text{ при } \alpha = 0; \frac{z_p^{*1}}{z_p^{*2}} = 3,5\% \text{ при } \alpha = 45^\circ; \frac{z_p^{*1}}{z_p^{*2}} = 3,6\% \text{ при } \alpha = 90^\circ$$

Для оболочек малой гибкости  $i = 15-20$  как при расчетах по теории устойчивости А.А. Ильюшина, так и по модифицированной теории устойчивости В.Г. Зубчанинова разница не превышает 1%. Отмечено, что с увеличением степени упрочнения зона разгрузки материала становится больше.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубчанинов, В.Г. Устойчивость и пластичность. Т. 1. Устойчивость / В.Г.Зубчанинов. – М.: Физматлит, 2007. – 448 с.
2. Зубчанинов, В.Г. Математическая теория пластичности: Монография / В.Г.Зубчанинов. – Тверь: ТГТУ, 2002. – 300 с.
3. Ильюшин А.А. Пластичность. Уругопластические деформации. М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
4. Зубчанинов, В.Г. Экспериментальная пластичность: Монография. Книга 1. Процессы сложного деформирования / В.Г.Зубчанинов, Н.Л.Охлопков, В.В.Гараников. – Тверь: ТГТУ, 2003. – 172 с.
5. Зубчанинов В.Г. Механика процессов пластических сред. М.: Физматлит, 2010. 352 с.
6. Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Гультияев В.И. Моделирование процессов сложного уругопластического деформирования материалов по плоским криволинейным траекториям // Проблемы прочности и пластичности. 2015. Т. 77, Ч. 2. С. 113-123.
7. Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Гультияев В.И. Численное моделирование процессов сложного уругопластического деформирования стали по двузвенным ломаным траекториям // Проблемы прочности и пластичности. 2014. Т. 76, Ч. 1. С. 18-25.

УДК 004.942

#### РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АГРЕГАЦИИ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ DEVELOPMENT OF A COMPUTER STOCHASTIC MODEL OF AGGREGATION IN THE DISPERSE SYSTEMS

Лейла Мусабекова  
Leila Musabekova

*Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, Шымкент,  
Казахстан  
M.Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent, Kazakhstan  
(e-mail: mleyla@bk.ru)*

*Аннотация:* В работе предлагается новый модельный алгоритмический подход к описанию процессов агрегации, основанный на математическом инструменте случайного блуждания по математическим решеткам. Этот инструмент позволяет устранить проблему, связанную с учетом влияния столкновений многих частиц, и дает возможность описать как агрегацию, ограниченную диффузией, так и конкуренцию различных кинетических механизмов, которые происходят в разные характерные моменты времени.

*Abstract:* The submitted paper proposes a new model algorithmic approach to describing aggregation processes, which is based on mathematical tool of a random walk over mathematical lattices. This tool allows removing the problem linked to accounting the effect of many-particles collisions, and it gives the way for describing both a diffusion-limited aggregation and the competition of different kinetic mechanisms that take place on different characteristic times.

*Ключевые слова:* процессы агрегации, моделирование дискретных событий, многочастичные столкновения

*Keywords:* aggregation processes, discrete event modeling, multiparticle collisions

## **Введение**

В настоящее время процессы агрегации играют исключительно важную роль в нанотехнологиях [1]. Однако, теоретический анализ многих вопросов остается до сих пор слабо развитым. Анализ литературных данных показал, что предположение о сильном преобладании числа бинарных столкновений над многочастичными столкновениями кластеров не является правильным [2]. Было выявлено, что для плотных дисперсных систем в начальный период, вклад многочастичных столкновений на скорость процесса агрегации, может быть сопоставим с вкладом бинарных столкновений [3,4].

В этой работе проблема также рассматривается с точки зрения алгоритмического подхода. Авторы указанной работы [5,6] ограничивались случаем периодического реактора, в котором средняя скорость потока принималась равной нулю, и учитывались только случайные блуждания частиц.

В то же время процессы агрегации в проточных реакторах могут протекать в особых условиях из-за воздействия свежего потока с диспергированной фазой, поступающей в проточный реактор [7]. Следует также учитывать специфическое взаимодействие между усредненным потоком и турбулентно-броуновскими дрейфами [8].

## **2. Подробная информация об алгоритме и коде**

Используемый подход основан на алгоритме, представленном в работах [3,9]. В соответствии с моделью, область, в которой происходят процессы диффузии и агрегации, покрывается фиксированной пространственной решеткой. Далее описано изменение локального распределения дробного состава [9] в клетках решетки, вызванное дрейфами частиц и процессами агрегации.

### **2.1 Концепция**

В случае диффузионно-ограниченной агрегации (ДОА) объединение кластеров происходит сразу в момент их столкновения. В терминах решетчатой модели это явление интерпретируется как попадание кластеров в общую ячейку. Поэтому в этом случае характерное время агрегации определяется характерным временем диффузии частиц, т. е. временем дрейфа частиц из одной ячейки в другую. Это время может быть принято как характерная единица времени или временной такт.

В случае смешанной кинетики единица временного такта принималась равной характеристическому времени коагуляции кластеров, попадающих в одну ячейку. Это означает, что частицы, которые достигают общей ячейки, могут не иметь необходимого времени для образования одного кластера, но могут продолжать дрейф отдельно [3,6]. Кроме того, гипотетически предполагается, что частицы склеены друг с другом, и, как только они попадут в общую ячейку, они снова мигрируют в общую ячейку в следующем блоке времени. В этом случае агрегация считается завершенной.

Таким образом, моделируется конкуренция временных интервалов диффузии и характерного времени агрегации. Для моделирования случайного дрейфа частицы вдоль решетки применялась разработанная ранее техника [9]. Перед каждым временным шагом выполнялся случайный выбор компонентов движения частиц в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Пусть термин «порядок кластеров» означает количество образующих кластер частиц - мономеров. В этом случае следует учитывать возможность того, что кластеры разных порядков имеют разную подвижность [10]. Специфическое критическое значение кластерного порядка, для которого значительно уменьшается подвижность, зависит от физико-химических характеристик реальной системы.

Таким образом, математическое ожидание смещения уменьшается, когда порядок кластеров увеличивается [6]. Например, если случайный выбор одного временного смещения по заданному направлению для кластеров порядков 1 или 2 можно сделать из последовательности (-3; -2; -1; 0; 1; 2; 3), то для кластеров с порядком выше двух и менее четырех, выбор может быть сделан из последовательности (-3; -2; -2; -1; -1; 0; 1; 1; 2; 2; 3) [9].

Подвижность кластеров также зависит от дислокации кластеров относительно стенки аппаратов.

Основные параметры численного эксперимента были приняты, как и в предыдущей работе [6], но с одним принципиальным различием. Движение в горизонтальном направлении на каждом такте времени состояло из двух составляющих: фиксированного смещения со средней осевой скоростью потока и горизонтальной составляющей случайного дрейфа. Это обстоятельство потребовало некоторых изменений в схеме расчета.

Во-первых, предполагается, что при подборе случайного дрейфа смещения частиц, захваченных в пограничных ячейках вблизи стенок, т.е, которые выходят за границы рассматриваемой решетки, равны нулю.

Во-вторых, в отличие от алгоритма для моделирования периодического реактора [6,9], кластеры, выходящие из-за случайного дрейфа среднего потока влево или вправо за трубчатый реактор, выпадают из дальнейших расчетов.

## 2.2. Схема расчета для случая АОД

Во время расчета формируются четыре матрицы.

Первая матрица  $A^*$  имитирует всю решетку с кластерами разных порядков, полученными в процессе перемещений и агрегации в каждый такт времени.

Вторая матрица  $U$  имитирует аналогичную решетку с кластерами, которые попадают в реактор со свежим потоком, который втекает в реактор с заданной средней горизонтальной скоростью.

Третья матрица  $A$ , которая имитирует ситуацию в конце единицы времени расчета и генерирует начальную ситуацию для следующего блока, формируется как сумма двух предыдущих матриц:  $A = A^* + U$ .

Четвертая матрица  $S$  указывает количество столкновений частиц в каждой ячейке в каждый такт времени.

На рисунке 1 показаны описанные процедуры. Заштрихованная область в матрице (первые столбцы  $w$ ) обозначает область, занятую свежим потоком в течение такта времени.

В начальный момент кластер первого порядка помещается в каждую ячейку. Затем производится случайный отбор смещений для каждой частицы, как было ранее объяснено, и дальнейшая агрегация частиц осуществляется по описанному ранее механизму.

Затем процесс повторяется на каждом временном шаге по тому же принципу. Численные эксперименты проводились на плоских матрицах размеров  $4 \times 40$ ,  $8 \times 40$ ,  $5 \times 20$ ,  $4 \times 100$ , которые моделировали проточные реакторы длиной 20, 40 и 100 ячеек и шириной 4, 5 и 8 ячеек.

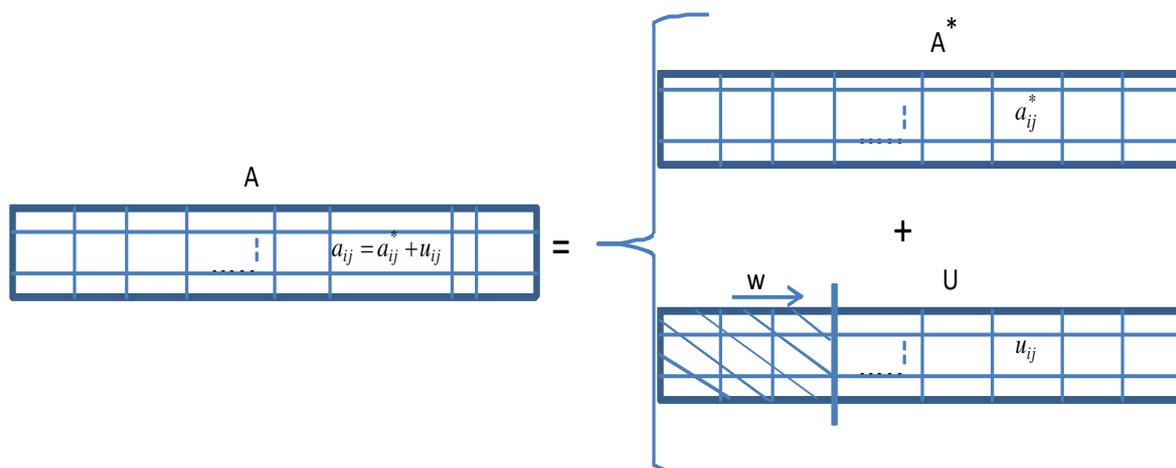


Рисунок 1 – Схема процедуры расчета.

### 2.3. Схема расчета для случая смешанной кинетики

Во время расчета формируются пять матриц. Первая, вторая и третья матрицы  $A^*$ ,  $U$  и  $A$  имеют то же значение, что и в предыдущем разделе. Четвертая матрица  $S$  указывает количество столкновений частиц в каждой ячейке в каждый такт времени.

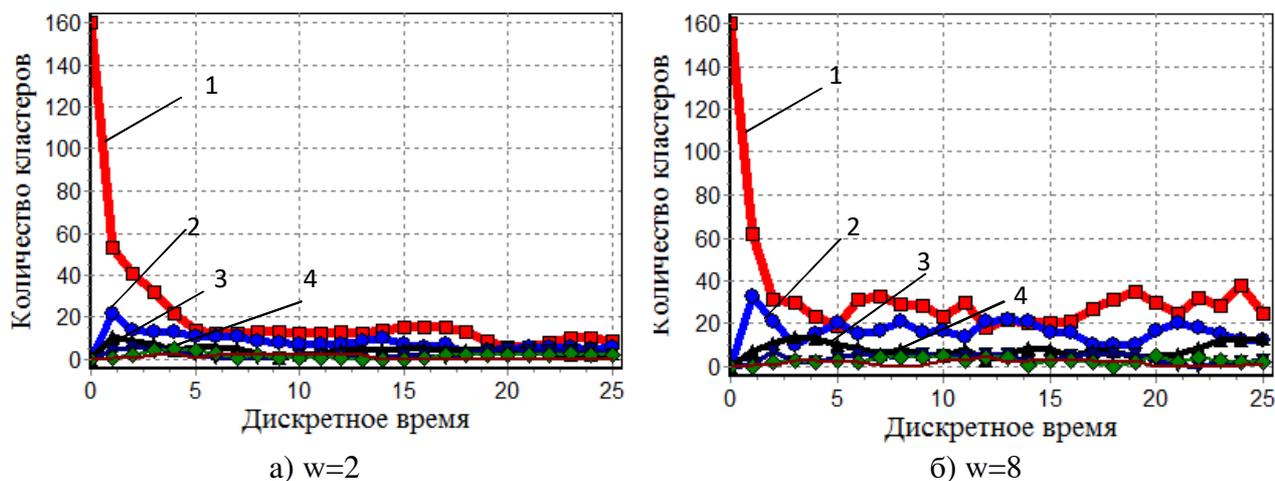
Наряду с этим формируется пятая матрица  $B$  [6]. Этот трехмерный массив  $B(I, J, M)$  служит для идентификации предыдущей ячейки, из которой данный кластер вступил в новую ячейку. Для этого в дополнение к двум индексам ячеек  $(I, J)$ , в которые кластер попадает на заданный интервал времени, третий индекс  $M$  указывает метку ячейки  $((I-1) * N + J)$ , в которой кластер был до начала дрейфа. Таким образом, можно идентифицировать кластеры с одинаковыми метками, которые, согласно предлагаемой модели, должны быть агрегированы. Матрицу  $B$  можно обозначить как матрицу свидетельства взаимодействия.

Созданный алгоритм и код обеспечивают достаточно высокую скорость вычисления. Например, время для вычисления матрицы  $4 \times 100$  в случае смешанной кинетики на глубину 100 тактов времени занимает около 5 минут с использованием современной техники.

### 3. Результаты моделирования

На рисунке 2 показаны некоторые численные результаты для матриц, где каждая точка усредняется по десяти сериям вычислений. В качестве условного такта времени в процессе моделирования используется шаг вычисления.

Результаты численных экспериментов показали, что резкое изменение распределения кластеров в порядках происходит в течение нескольких начальных тактов времени после начала процесса, а затем состав фракции остается практически стабильным. Это наблюдение является правильным как для случая ДОА, так и для случая смешанной кинетики. Однако падение концентрации кластеров 1-го порядка в начальный период является более резким для случая ДОА, и это легко объяснить, конечно. В то же время в случае смешанной кинетики устанавливается более однородная фракционная композиция.



**Рисунок 2 - Временная история количества кластеров разных порядков для скорости потока  $w = 2$ (а) и  $w = 8$ (б), таблица  $4 \times 40$ . Эксперимент для случая АОД. Порядок кластеров: 1-первый, 2-второй, 3-третий, 4-четвертый**

Как и в случае с моделью периодического реактора [9], численные эксперименты для проточного реактора подтвердили, что общее количество многочастичных столкновений не может считаться ничтожно малым по сравнению с количеством двоичных столкновений. Это особенно верно на начальном этапе процесса.

#### Выводы

Общий вывод из результатов исследования состоит в том, что описанный алгоритмический подход, может быть достаточно эффективно использован для расчета кинетики агрегации в гетерогенных системах, как для периодических, так и для проточных

реакторов. Созданный математический инструмент позволяет численно решать проблему, связанную с учетом влияния столкновений многих частиц и дает возможность описать как диффузионно-ограниченную кинетику агрегации, так и конкуренцию различных кинетических механизмов.

Моделирование и численные эксперименты подтвердили, что вклад многочастичных столкновений кластеров в кинетику агрегации заметен не только в периодических реакторах, но это явление еще более значимо в проточных дисперсных системах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen H., Lin L., Li H., Li J., Lin J.M. Aggregation-induced structure transition of protein-stabilized zinc/copper nanoclusters for amplified chemiluminescence// ACS Nano. 2015. 9(2). P.2173-2183.

2. Wattis J.A. An introduction to mathematical models of coagulation–fragmentation processes: a discrete deterministic mean-field approach// Physica D: Nonlinear Phenomena. 2006. 222(1). P.1-20.

3. Brenner A. M. Model of many-particle aggregation in dense particle systems// Chemical Engineering Transactions (CET). 2014. V.38. P.145-150.

4. Markus A.A., Parsons J.R., Roex E.W.M., De Voogt P., Laane R.W.P.M., Modeling aggregation and sedimentation of nanoparticles in the aquatic environment// Science of the Total Environment. 2015. 506. P.323-329.

5. D. Dairabay, V. Golubev, L. Musabekova, B. Korganbayev. Modeling the precipitation of bidisperse suspension with allowance for the aggregation of clusters of various fractions// International journal of systems applications, engineering & development. NAUN Journal, Oregon. USA. 2015. V.9. P.197-200.

6. Brenner A.M., Musabekova L.M., Jamankarayeva M.A. Stochastic Lattice Model of Aggregation in Heterogeneous Polydisperse Media// Chemical Engineering Transactions. 2017. V.60. P.79-84.

7. Boer G.B.J de, Hoedemakers G.F.M., Thoenes D. Coagulation in turbulent flow// Part II, Chemical Engineering Research and Design. 1989. V.67. P.308-315.

8. Zatevakhin M.A., Ignatyev A.A., Govorkova V.A., Numerical simulation of Brownian coagulation under turbulent mixing conditions// Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. 51(2). P.148-155.

9. Musabekova L.M., Dausheyeva N.N., Zhumataev N.S., Jamankarayeva M.A. Application of the Stochastic Lattice Model for Describing Aggregation Processes in the Disperse Systems Flowing through a Tubular Reactor// Chemical engineering transactions. V.70. 2018. P.1933-1938

10. Gambinossi F., Mylon S.E., Ferri J.K. Aggregation kinetics and colloidal stability of functionalized nanoparticles// Advances in Colloid and Interface Science. 2015. 222. P.332-349.

УДК 621.357.12

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В  
ДИАФРАГМЕННОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ  
MODELING PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES IN A DIAPHRAGM CELL**

**Сергей Владимирович Оськин, Дмитрий Сергеевич Цокур,  
Сергей Петрович Волошин  
Seregy V. Oskin, Dmitry S. Tsokur, Sergey P. Voloshin**

*Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина, Россия, Краснодар  
Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Russia, Krasnodar  
(e-mail: kgauem@yandex.ru, dmitry\_tsokur@mail.ru, luntik-s@mail.ru)*

*Аннотация.* В статье анализируется проблема описания основных физических и химических процессов, происходящих при электрохимической активации воды. В программном пакете Comsol авторам удалось описать основные физико-химические процессы и получить решения с высоким уровнем совпадения с экспериментальными данными.

*Abstract.* The article analyzes the problem of describing the main physical and chemical processes occurring during the electrochemical activation of water. In the Comsol software package, the authors were able to describe the main physicochemical processes and obtain solutions with a high level of agreement with the experimental data.

*Ключевые слова:* электролиз, анолит, католит, пчеловодство.

*Keywords:* electrolysis, anolyte, catholyte, beekeeping.

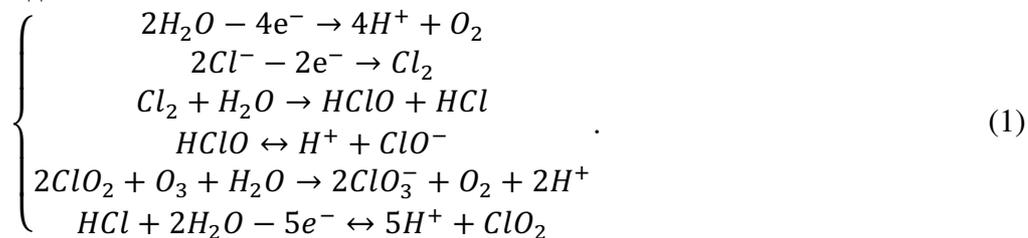
Россия является одним из крупнейших производителей меда в мире, имея около 4% общемирового объема производства меда. Однако российские пчеловоды применяют большое количество химических препаратов для борьбы с болезнями пчел, что приводит к невозможности поставки меда на европейский рынок и увеличению содержанию вредных веществ в этом продукте. Кроме того, увеличились объемы импорта дешевого меда из стран ближнего и дальнего зарубежья. Для изменения сложившейся ситуации нужно искать новые альтернативные пути борьбы с вредными организмами. Одним из таких путей может быть использование электроактивированных растворов. Исследователями [1, 3] установлено, что химическая природа дезинфицирующего эффекта такого раствора аналогична антимикробному действию внутренней среды живых организмов – фагоцитозу. Применение электроактивированных растворов в различных сферах деятельности человека хорошо описано в литературе под авторством Бахира В.М. [2,3] В Кубанском ГАУ также давно ведутся исследования по применению активированных сред в технологиях агропромышленного комплекса и в том числе в пчеловодстве [4, 5, 6, 7]. Хороший обеззараживающий эффект на пчелоинвентарь и внутриульеовое пространство получен в результате применения анолита при периодических осмотрах пчелиных семей. Однако необходимо разработать максимально адаптированную к условиям работы пчеловодов технологию получения анолита с требуемыми параметрами и соответствующее оборудование по его применению.

Задачу получения электроактивированных растворов можно осуществить с помощью малообъемных ионизаторов типа «Ашбах», «Ива» и других подобных видов. В основе всех этих установок лежит один и тот же принцип действия, основанный на диафрагменном электролизе. Всеми исследователями отмечается трудность описания процессов происходящих в процессе активации. Это связано с большим количеством электрохимических реакций происходящих в межэлектродном пространстве. Большинство исследователей сходятся на том, что основой высокой эффективности анолитов является наличие

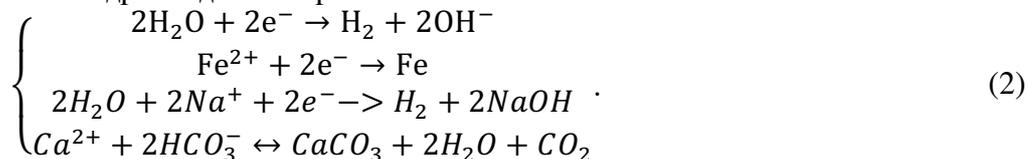
хлорсодержащих и пероксидных соединений. Одной из ведущих ролей по бактерицидному действию отводится хлорноватистой кислоте [3].

Для получения анолита с необходимыми характеристиками и создания наиболее оптимальных режимов работы электроактиваторов нужно попытаться описать основные происходящие физические и химические процессы в данном объекте. Лучше всего произвести такую реализацию в программном комплексе Comsol.

Решения уравнений тепловых процессов будем получать с помощью физического блока "Heat Transfer". Корпус активатора принимаем пластмассовым, электроды - катод стальной, анод - сталь покрытая рутением, диафрагма - брезент. Начальная температура всех элементов 20°C. Решения по движению жидкости в результате тепловой конвекции проводились в интерфейсе "Laminar Flow". Все электролитические процессы моделировались в интерфейсе "Tertiary Current Distribution". В качестве начальных условий были заданы концентрации химических элементов и соединений: Na, Cl, Mg, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, K, Ca, Cl<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, Fe, HClO, HCl, ClO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>, NaOH, ClO<sub>3</sub>, ClO. Также были введены значения коэффициентов диффузии, которые принимались по литературным данным. В интерфейсах "Electrode Surface" на аноде моделировалось образование кислорода, озона и хлора, а на катоде имитировалось восстановление водорода и железа. В анодной камере идет образование хлор содержащих соединений:

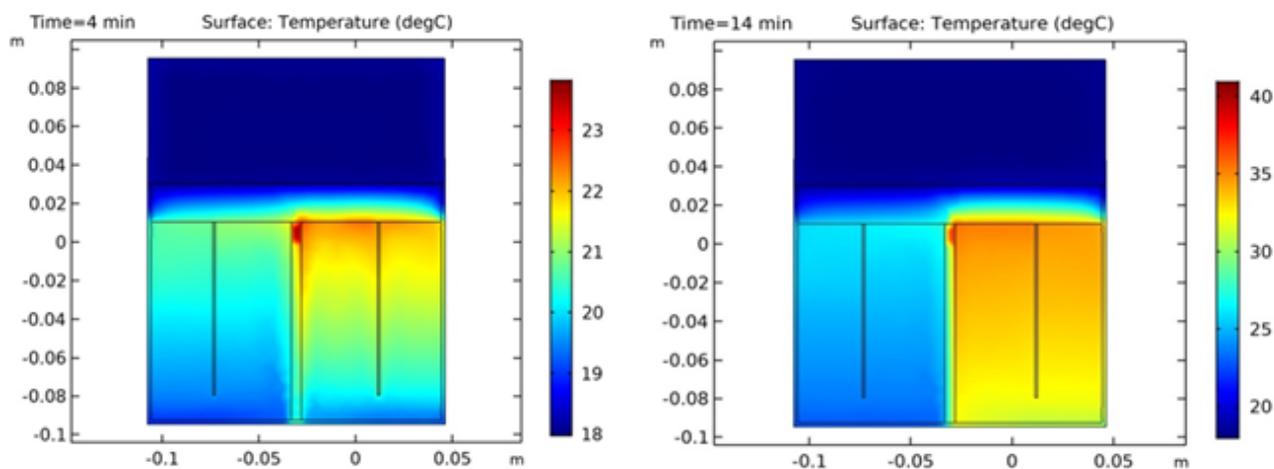


На катоде происходит выделение водорода, восстанавливаются металлы и идут реакции по образованию гидроксидов и карбонатов:



Все интерфейсы связаны через мультифизические блоки "Electrochemical Heating" и "Nonisothermal Flow". Решения проводились в нестационарном режиме.

Анализ изменений температуры проводился как по всему объему активатора, так и со временем. На рисунке 1 представлены термограммы активатора через 4 и 14 минут работы, из которых видно, что наиболее нагретым является анолит – превышение над католитом составляет 6-8 градусов. Внутри анодной камеры виден подъем более нагретой части анолита вверх. На рисунке 2 (а, б) представлены изображения образования гидроксидов натрия через 4 и 12 минут работы активатора, где видно что повышенная концентрация наблюдается около катода и диафрагмы со стороны анолита, а за анодом концентрации очень низкие. На рисунке 3 видно, что концентрация гидроксида через 16 минут работы достигает значений 65·10<sup>-8</sup> моль/м<sup>3</sup> и в тоже время за анодом концентрация находится на уровне только 1·10<sup>-8</sup> моль/м<sup>3</sup>.



**Рисунок 1 - Изображения температурных полей в активаторе через 4 минуты (слева) и через 14 минут (справа)**

Образования газовой фракции хлора в анолите представлено на рисунке 2 (в, г), где можно увидеть следующее: к 6 минуте газ хлор в основном находится за анодом и имеет концентрацию до  $0,075$  моль/м<sup>3</sup>; к 16 минуте уже часть газа распространилась по всему анолиту и будет происходить его частичное растворение, при этом максимальные концентрации находятся около анода и имеют значение  $0,035$  моль/м<sup>3</sup>.

Наибольшая проблема возникла при моделировании содержания ионов хлора в анодной камере. Первоначально были построены графики изменения концентрации ионов хлора в анодной камере при различных значениях плотности локального тока  $i_{loc}$  (рис.3 а). Из графиков наблюдается более интенсивное снижение концентрации ионов хлора при увеличении плотности тока, что связано с увеличенным образованием газовой фракции хлора и ее удалением из камеры. Как показали эксперименты в действительности изменение концентрации хлора идет по другому (рис. 3 б): первоначально резко снижается, а потом возрастает и график приобретает седловидную форму. Такое несовпадение можно объяснить следующим. Comsol моделирует процесс независимо от существующей концентрации химического элемента. Возникла необходимость корректировки изменения локального тока  $i_{loc}$  через функцию Step. При этом вид графиков изменился и приблизился максимально к экспериментальным изменениям (рис. 3 в, г).

Также получены изображения процессов образования хлорсодержащих соединений. Образование  $ClO_2$ ,  $ClO_3$ , идет очень медленно, так как они появляются в результате вторичных реакций и поэтому концентрации этих элементов имеют более низкие значения по сравнению с  $HCl$  (на несколько порядков). Установлено, что максимальная концентрация хлорноватистой кислоты находится около анода через 16 минут работы активатора со значением  $35 \cdot 10^{-7}$  моль/м<sup>3</sup>.

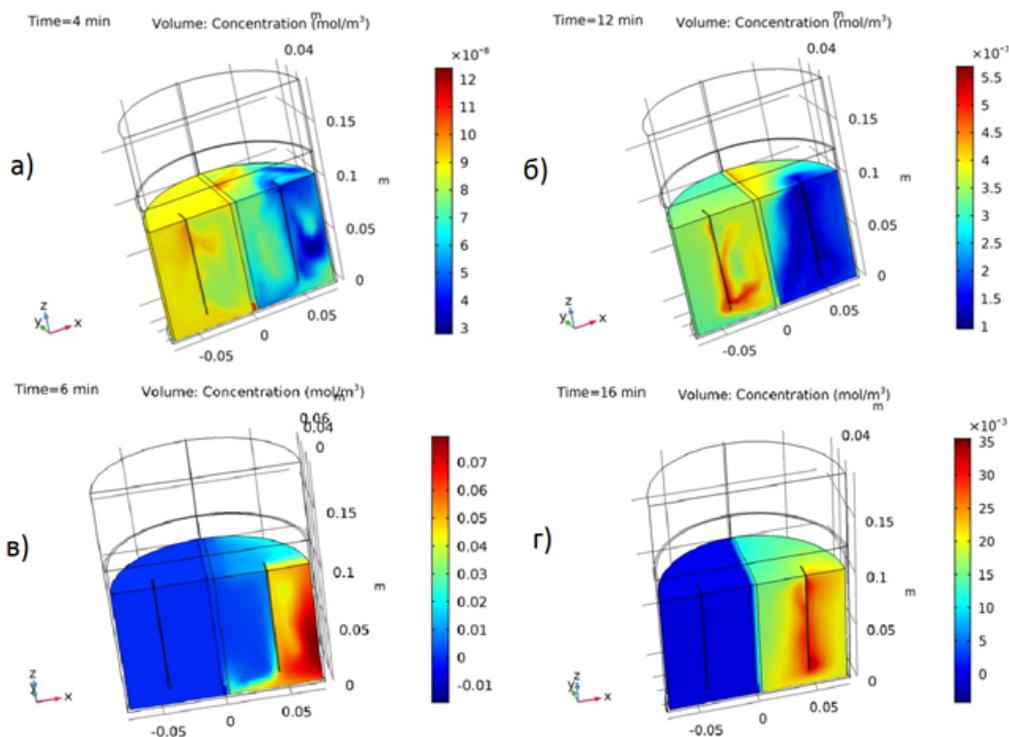


Рисунок 2 - Изображения образования NaOH через 4 минуты (а) и 12 минут (б) работы активатора и изображения распространения газообразного хлора в анодной камере через 6 минут (в) и через 16 минут(г)

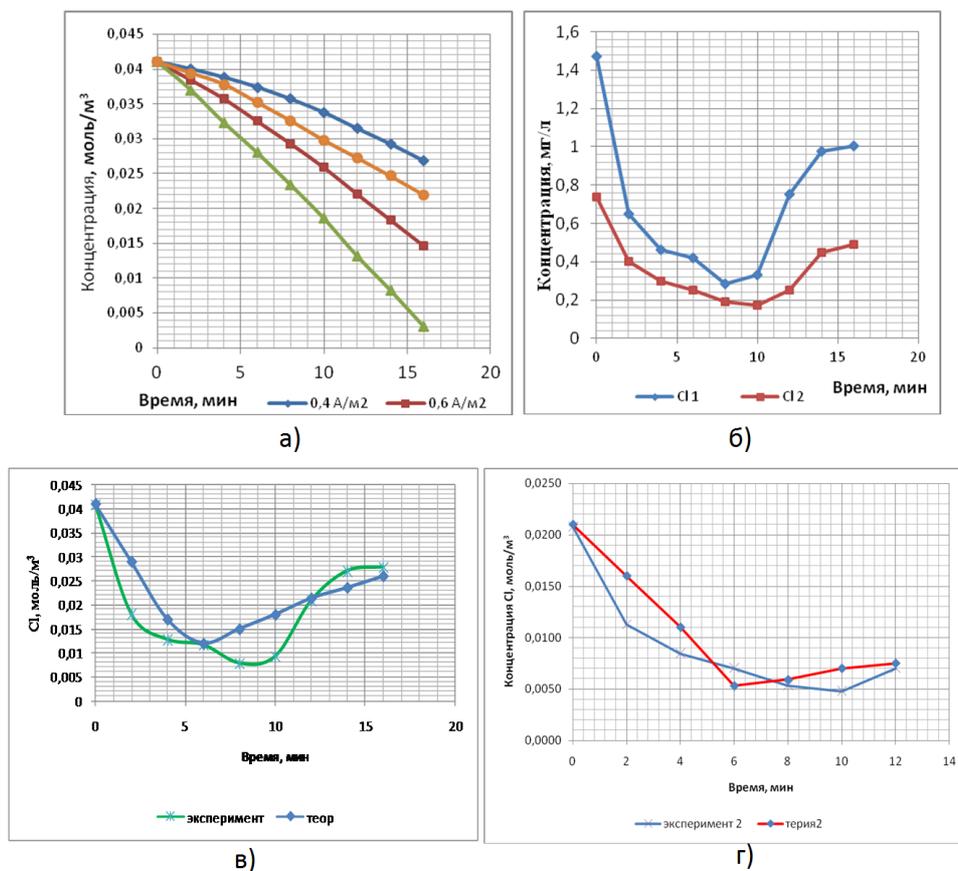


Рисунок 3 - Графики зависимости концентрации ионов хлора в анодной камере от времени при разных плотностях локального тока (а), графики экспериментальных зависимостей концентрации ионов хлора от времени при разных начальных значениях продукта (б), графики теоретических и экспериментальных зависимостей изменений хлора от времени при различных начальных концентрациях (в, г)

В результате моделирования физических и химических процессов в электроактиваторе и сопоставления с экспериментальными значениями концентраций отдельных химических соединений установлено следующее. Средние значения изменения температуры в анолите и католите практически полностью согласуются с данными модели – ошибка не превышает 3%. Изменения концентраций магния, натрия, кальция до 10 минуты идут с большим отклонением от модельных значений – ошибка может достигать 35%. Однако к концу 12 минуты переходные процессы заканчиваются, и наблюдается достаточно высокое совпадение теории и эксперимента – ошибка не более 5%. Моделирование образования хлорсодержащих элементов с использованием функции Step, позволило приблизить результаты модели к эксперименту и ошибка находится на уровне 8%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монастырский О. А. и др. Влияние токсинообразующих видов грибов и микотоксинов на физиологические свойства зерна высокопродуктивных сортов пшеницы / О.А. Монастырский, Е. В. Кузнецова, Л. В. Свирелис, Т.Г. Стрелкова, Е. А. Ефременко, Н. Н. Алябьева // Наука Кубани.-2007. -№ 3. -С. 27-32.

2. Бахир В. М. и др. Эффективность и безопасность химических средств для дезинфекции, предстерилизационной очистки и стерилизации /В. М. Бахир, В. И. Вторенко, Б. И. Леонов, С. А. Паничева, В. И. Прилуцкий, Н. Ю. Шомовская//Дезинфекционное дело. - 2003. -№ 1. -С. 29-36.

3. Прилуцкий В.И., Долгополов В.И., Барабаш Т.Б. Анолиты на рынке дезсредств: не ошибитесь в выборе! / В.И.Прилуцкий, В.И.Долгополов, Т.Б.Барабаш // Медицинский алфавит. Эпидемиология и гигиена. №3.-2013.-С.52-61.

4. Оськин С. В. Электротехнологические направления повышения экологической безопасности сельскохозяйственной продукции // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. -2010. -№ 1-2. -С. 107-115.

5. Оськин С.В., Овсянников Д.А. Необходимость применения экологически чистых способов обработки пчелиных семей от существующих болезней/Оськин С.В., Овсянников Д.А. // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2014. № 2 (18). С. 134-144.

6. Оськин С.В. Инновационные способы повышения экологической безопасности сельскохозяйственной продукции/ С.В.Оськин // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2013. № 8 (104). С. 75-80.

7. Цокур Д.С., Оськин С.В. Использование электроактивной воды в технологическом процессе экологически безопасного выращивания овощных культур в условиях закрытого грунта / Д.С.Цокур, С.В.Оськин // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2014. № 2 (18). С. 148-154.

УДК 51-74

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОНОЛИТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ  
ИНЖЕНЕРНЫМИ МЕТОДАМИ**  
**MATHEMATICAL MODELING OF NON-LINEAR WORK OF REINFORCED  
CONCRETE SLABS BY ENGINEERING METHODS**

**Павел Олегович Скудалов, Степан Валерьевич Черемных**  
**Pavel O. Skudalov, Stepan V. Cheremnykh**

*Тверской государственный технический университет, Россия, Тверь*  
*Tver State Technical University, Russia, Tver*  
*(e-mail: p.s@live.ru, stepan\_1986@bk.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрена практическая реализация физически нелинейного расчета в МКЭ программах на примере расчетных моделей однопролетных монолитных железобетонных плит различной конфигурации с выводом уточненных модулей упругости бетона и оценкой экономического эффекта такого расчета.

*Abstract:* The practical implementation of physically nonlinear calculations in FEM programs is considered on the example of calculation models of single-span monolithic reinforced concrete slabs of various configurations with the output of refined modules of concrete elasticity and the assessment of the economic effect of such calculation.

*Ключевые слова:* МКЭ, расчетные модели, физическая нелинейность, модуль упругости, железобетон, жесткость.

*Keywords:* FEM, calculation models, physical nonlinearity, elastic modulus, reinforced concrete, stiffness.

В механике строительных конструкций, как и в большинстве других отраслей науки и техники, наряду с экспериментальными исследованиями, огромное значение имеет математическое моделирование процессов и явлений с целью качественной и количественной оценки ожидаемых результатов. В строительной отрасли описание математической модели с учетом исследуемых при моделировании процессов и явлений заключается в понятии расчетная схема. Для получения итогового результата математического моделирования выполняют расчет такой схемы. В связи со спецификой строительной механики для расчета схем наибольшее развитие получил метод конечных элементов (МКЭ), как относительно просто реализуемый программно.

Составление адекватных расчетных схем, учитывающих все важные аспекты происходящих в строительных конструкциях процессов, но при этом достаточно просто описываемых в инженерной практике, является залогом безопасности и надежности проектируемых конструкций, что и отражено в нормативных документах в области строительства [1]. Однако, следует понимать, что особенности, которые следует учитывать при расчете различных схем, отличаются в зависимости от вида конструкции (балки, колонны, плиты и т.п.), материала конструкции (металл, дерево, бетон, железобетон), вида внешнего воздействия на схему (статическое, динамическое) и многих других факторов.

При проектировании плоских железобетонных монолитных безбалочных плит одним из наиболее важных критериев эффективности принятых решений является расход бетона (характеризующийся толщиной плиты) и арматуры на устройство плиты требуемого пролета плиты под заданную нагрузку. Причем снижение толщины плиты и расхода арматуры даже на несколько процентов дает ощутимый экономический эффект на все здание.

Железобетон при правильном проектировании наиболее рационально использует положительные черты как бетона («хорошую» работу на сжимающие усилия при относительной дешевизне, приемлемую коррозионную и огне- стойкость), так и арматуры

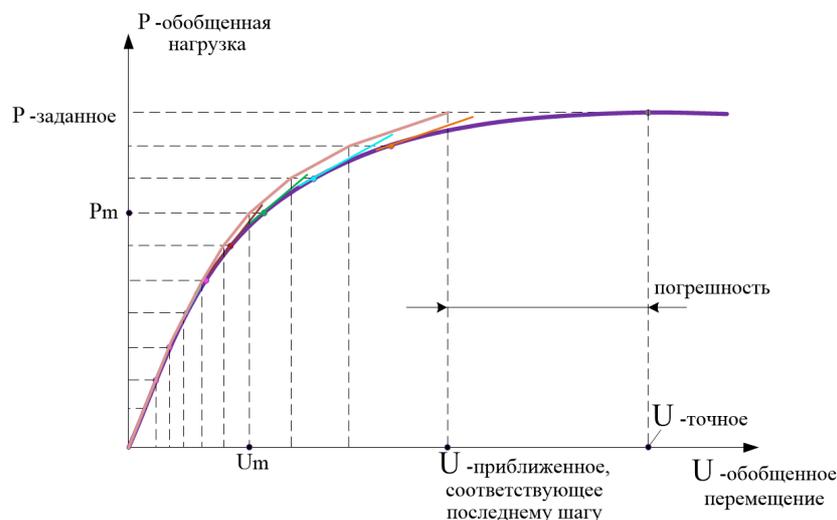
(«хорошую» работу на растяжение и сжатие, возможность выполнять сложные арматурные изделия). Если при составлении расчетной схемы наиболее точно описать поведение конструкции в составе всего несущего каркаса и учесть возможные изменения ее свойств в процессе эксплуатации, можно получить наиболее рациональную компоновку конструкции (армирование) и уменьшить итоговый расход материалов.

Для железобетонных конструкций характерно изменение исходных свойств конструкции за счет трещиннообразования и ползучести в бетоне, что вызывает неупругие деформации самой конструкции под нагрузкой [2]. Действующие нормативные документы в области строительства рекомендуют при первом приближении учитывать эти факторы введением коэффициентов к модулям упругости КЭ в расчетной схеме [3]. Приближенный учет неупругой работы конструкции даже при расчете простых жестко защемленных балок вносит существенные корректировки в количество и расположение армирования и величину итоговых прогибов от нагрузки [4]. В случае более точного учета изменения жесткости балки по ее длине в процессе работы под нагрузкой необходимо проводить многочисленные дополнительные вычисления и внимательно анализировать полученный результат, что связано с большими трудозатратами [5]. Если использовать предложенный в нормах способ для расчета железобетонных плит, то объем вычислений возрастает в несколько раз.

Пригодный для инженерной практики упрощенный алгоритм расчета монолитных железобетонных плит с учетом эффекта физической нелинейности был разработан в работе [6]. Он также реализуется с помощью ввода дополнительных коэффициентов (множителей) к начальному модулю упругости бетона, но сами множители выбираются в сводных таблицах в зависимости от геометрических размеров плит (соотношение пролетов в перпендикулярных направлениях и толщины плиты), класса бетона плиты, вида расчета и характерной зоны плиты.

Сводные таблицы были получены путем расчета железобетонных плит различной конфигурации (длина, ширина, толщина) смоделированных в программно-вычислительном комплексе «ЛИРА-САПР» с учетом действительной физически нелинейной работы конструкции и неупругих деформаций в бетоне.

В «ЛИРА-САПР» для решения физически нелинейных задач предназначен нелинейный процессор. Он позволяет рассматривать задачи в которых отсутствует линейная зависимость между напряжениями и деформациями, представляя материал конструкции нелинейно упругим. Закон деформирования может быть симметричным и несимметричным – с различными пределами сопротивления растяжению и сжатию. Решение этих задач производится шаговым методом (Рисунок 1), причем шаг выбирается автоматически.



**Рисунок 1 – Шаговый метод решения физически нелинейных задач в ЛИРА-САПР**

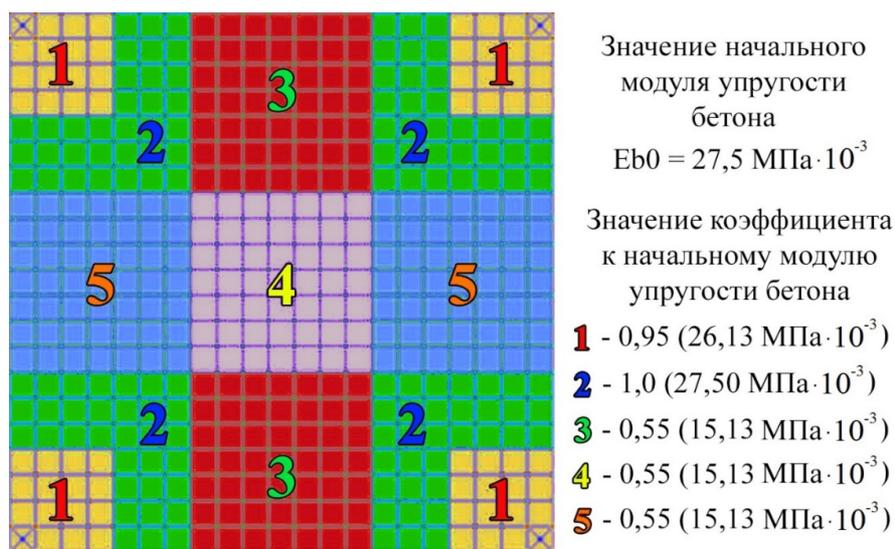
В статье приведены результаты проведенного в работе [6] исследования и оценен экономический эффект от проведения нелинейного расчета по сравнению с обычным линейным на примере монолитных железобетонных плит, конфигурации которых представлены в Таблице 1.

**Таблица 1 – Параметры расчетной схемы плиты перекрытия**

Длина (L), м	Ширина (B), м	Толщина (h), м
4,5	4,5	0,18
6,0	6,0	0,2
7,5	7,5	0,22
6,0	4,5	0,2
7,5	4,5	0,22
7,5	6,0	0,22

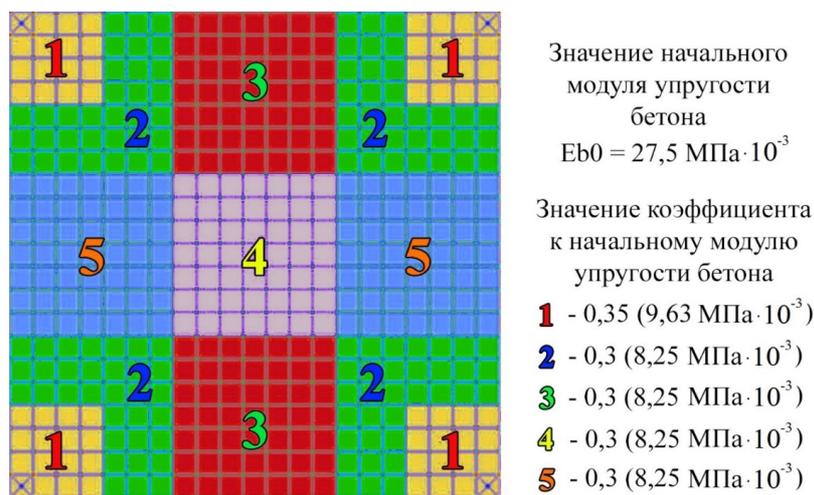
Расчетная схема плиты была поделена на характерные участки, с различными значениями коэффициентов к начальному модулю упругости бетона (Рисунок 2 и 3): 1 – опорная зона; 2 – приопорная зона; 3 – зона пролета по оси X; 4 – центральная зона плиты; 5 – зона пролета по оси Y.

При моделировании был применен бетон классов В20, В25, В30 и арматура класса А400. За расчетную диаграмму бетона для расчета с учетом физической нелинейности принята кусочно-линейная диаграмма, аппроксимированная из криволинейной. Расчетная диаграмма арматуры – двухлинейная.



**Рисунок 2 – Зоны уточнения модуля упругости бетона для 1 группы предельных состояний плиты размерами 6х6 метров из бетона класса В20**

Для всех остальных конфигураций плит и других классов бетона разбивка на характерные участки была выполнена аналогичным образом и представлена в работе [6]. Там же представлены изополя изгибающих моментов в обоих направлениях, изополя вертикальных перемещений от нормативных нагрузок и сводная таблица для расчета по 1 и 2 группе предельных состояний для всех смоделированных плит.



**Рисунок 3 – Зоны уточнения модуля упругости бетона для 2 группы предельных состояний плиты размерами 6х6 метров из бетона класса В20**

В Таблице 2 представлены расходы арматуры на нижнее и верхнее армирование для каждой из смоделированных плит.

**Таблица 2 – Изменение расхода арматуры при использовании предложенной методики**

Сетка колонн, м	Класс бетона	Толщина перекрытия, мм	Расход арматуры на верхнее армирование, кг/м <sup>3</sup>		Расход арматуры на нижнее армирование, кг/м <sup>3</sup>		Общий расход арматуры, кг/м <sup>3</sup>		Изменение расхода арматуры, %			
			Лин. расчет	Нелин. расчет	Лин. расчет	Нелин. расчет	Лин. расчет	Нелин. расчет	Верхн. арм-ие	Нижн. арм-ие	Общее изменение	
4.5 x 4.5	V20	180	21.378	28.193	31.860	25.794	53.238	53.987	31.9	-19.0	1.4	
	V25					25.356		53.548	31.9	-20.4	0.6	
	V30					23.017		51.209	31.9	-27.8	-3.8	
6.0 x 6.0	V20	200	34.486	39.321	57.243	46.224	91.729	85.544	14.0	-19.3	-6.7	
	V25					46.224		85.544	14.0	-19.3	-6.7	
	V30					30.118		57.526	43.036	87.644	82.356	30.6
7.5 x 7.5	V20	220	47.695	59.176	82.137	60.535	129.831	119.710	24.1	-26.3	-7.8	
	V25					60.535		119.710	24.1	-26.3	-7.8	
	V30					31.078		47.695	84.689	65.871	115.766	113.565
4.5 x 6.0	V20	200	39.184	42.407	28.479	28.677	65.050	76.079	8.2	17.4	12.1	
	V25		36.571			28.479		30.988	73.395	16.0	8.8	12.8
	V30		36.571			27.768		70.176	16.0	-2.5	7.9	
4.5 x 7.5	V20	220	57.436	57.436	35.604	30.987	93.040	88.423	0.0	-13.0	-5.0	
	V25			70.353		30.592		100.945	22.5	-14.1	8.5	
	V30			27.449		97.802		22.5	-22.9	5.1		
6.0 x 7.5	V20	220	59.538	64.338	50.925	37.297	110.464	101.582	8.1	-26.9	-8.0	
	V25				50.925			101.636	8.1	-26.8	-8.0	
	V30				50.387			109.926	8.1	-26.0	-7.5	

Предложенная методика позволяет добиться снижения расхода арматуры до 8% за счет корректировки модулей упругости элементов плиты в привычном линейном расчете, не затрачивая при этом большого количества времени на моделирование плит в нелинейной постановке.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" от 30.12.2009 N 384-ФЗ// СПС КонсультантПлюс.
2. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Введ. 13.07.2015. М.: ИУС, 2015. 152 с.
3. СП 52-103-2007 Железобетонные монолитные конструкции зданий. Введ. 12.07.2007. М.: ФГУП ЦПП, 2007. 22 с.
4. Кудряшов, Д.В. Влияние расчетной жесткости монолитных железобетонных конструкций на их армирование и деформации /Д.В. Кудряшов, П.О. Скудалов// Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов ТвГТУ: материалы научно-практической конференции, приуроченной ко Дню российской науки. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. С. 33-36
5. Скудалов, П.О. Влияние трещинообразования в железобетонных балках на усилия в них, подбор армирования и жесткость /П.О Скудалов, Д.В. Кудряшов, Т.Р. Баркая, А.В. Бровкин// Саморазвивающаяся среда технического университета: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. В 2-х частях. Под редакцией Е.А. Евстифеевой, С.В. Рассадина / Тверской государственный технический университет. Тверь: 2018. С. 129-134.
6. Кудряшов, Д.В. Распределение коэффициентов к начальному модулю упругости бетона методом последовательных приближений: магистерская диссертация по направлению строительство: 08.04.01: защищена 06.07.18 / Кудряшов Дмитрий Владимирович. – Тверь, 2018. –314 с.

УДК 677.024:519.876.5

### КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДЕФОРМАЦИЙ ТКАНЫХ ПОЛОТЕН FEM-MODELING OF FABRIC DEFORMATION DYNAMICS

**Петр Алексеевич Севостьянов, Татьяна Алексеевна Самойлова,  
Мария Львовна Тихомирова  
Petr A. Sevostyanov, Tatyana A. SamoiloVA, Maria L. Tikhomirova**

*Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва  
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow  
(e-mail: petrsev46@yandex.ru, tasamo89@yandex.ru, vdmonahov@yandex.ru,  
mary.tikhomirova@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрены некоторые особенности деформации образца тканого полотна под действием удлиняющих деформаций, приведены результаты компьютерного моделирования с применением метода конечных элементов (МКЭ).

*Abstract:* Some features of the woven fabric sample deformation under the action of elongating deformations are considered, the results of computer simulation using the finite element method (FEM) are presented.

*Ключевые слова:* тканое полотно, деформация текстильной ткани, метод конечных элементов.

*Keywords:* woven fabric, deformation of textile fabric, finite – elements method.

Механические свойства текстильных тканых полотен зависят от двух групп факторов. Первая группа - это механические характеристики и свойства нитей основы и утка, из которых сформировано полотно. Вторая группа факторов определяет особенности переплетения нитей, которые зависят от геометрии раппорта и фазы строения. Как известно, фаза строения определяется по величине изгиба нитей основы и утка в областях их перекрытия и их окрестностях [1,2,3]. Текстильные полотна, выработанные из пряжи или/и нитей, являются уникальными искусственными материалами, созданными человеком и не имеющими аналогов в природе. Изделия из полотен представляют собой плоские или искривленные поверхности, площадь которых обычно составляет десятки квадратных дециметров или метров. Размеры раппорта переплетения двух систем нитей: основы и утка, - ничтожно малы по сравнению с этими площадями. Однако при этом все основные свойства полотен определяются именно особенностями переплетения.

Взаимодействие нитей и волокнистых продуктов (например, пряжи) подчиняется законам классической механики. При этом специфика структуры и взаимодействия этих механических конструкций в ткани требует адаптации общих законов классической механики к этим объектам, чтобы получить возможность решать необходимые прикладные задачи. Огромное количество точек взаимодействия, распределённых по поверхности полотна, и безусловное наличие статистического разброса значений переменных и параметров, хотя бы в малых пределах, между точками взаимодействия, означает, что наиболее естественным было бы включить в список используемых методов классическую статистическую механику. Взаимодействие элементов волокон и нитей в ткани происходит в результате их точечных или поверхностных контактов. Оно приводит либо к деформациям самих элементов, либо к их смещениям. Для прогнозирования механических свойств полотна на основе свойств нитей и переплетений разработано большое число различных геометрических, математических и компьютерных моделей. Некоторые из них рассмотрены, например, в [3,4,5]. Однако, проблема моделирования продолжает оставаться актуальной и привлекать внимание многих исследователей. Здесь приводится двумерная модель тканого полотна в пределах линейно упругой составляющей деформации. Она основана на методе конечных элементов и позволяет учесть структурные особенности ткани.

Рассмотрим прямоугольный образец тканого полотна. Его проекция на плоскость, параллельную плоскости образца, состоит из участков трех типов. Первый тип - это "поры" - участки полотна, не заполненные нитями. После формирования ткани и ее последующей обработки нити частично расплющиваются в плоскости полотна и могут полностью или частично закрыть эти участки. В некоторых видах полотен, например, марли или сети, поры создают специально. Важно, чтобы размеры этих пор не слишком сильно отличались от проектных значений [6,7].

Второй тип участков - это перекрытия основы и утка. На эти участки попадают проекции, как минимум, одной нити основы и одной - утка. В многослойных тканях на эти участки могут проектироваться и больше двух нитей. Перекрытия и тесный контакт между нитями, усиленный трением и сцеплением между нитями и волокнами внутри нитей на этих участках, являются главными факторами, от которых зависят механические свойства и целостность данного участка полотна.

Третий тип участков - это проекции участков нитей одной из систем: основы или утка, - между участками перекрытий. В однослойных полотнах эти участки образуются проекциями одной из нитей. В многослойных тканях на эти участки могут попадать участки нескольких нитей, которые, однако, в отличие от участков второго типа, непосредственно не контактируют, лишь их проекции попадают на одни и тот же участок плоскости. На таких участках механические свойства полотен определяются свойствами только этих нитей.

Модель удлинения образца основана на замене ткани сплошной деформируемой средой в двумерном пространстве. При быстром монотонном удлинении образца эффектами релаксации и пластической составляющей деформации можно пренебречь. В линейной

упругой модели материал описывается двумя параметрами: модулем упругости  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$ . Чтобы учесть особенности периодической структуры ткани, обусловленные раппортом переплетения и параллельными нитями основы и утка, значения  $E$  и  $\mu$  будем описывать периодическими функциями координат. В качестве простейшего примера таких функций выберем следующие зависимости, приближенно отвечающие однослойной ткани полотняного переплетения

$$E(x, y) = 2e9(1 + 0.6\sin(2\pi x/0.0005)\cos(2\pi y/0.0005)), Pa$$

$$\nu(x, y) = 0.2((1 + 0.6\sin(2\pi x/0.0005)\cos(2\pi y/0.0005)))$$

Значения  $E$  и  $\nu$  меняются синхронно по обеим осям с периодом  $T = 0.0005$  м. При удлинении образца на 10% (0.02 м) в образце возникают механические напряжения и пропорциональные им деформации в плоскости образца. Используем для моделирования этих напряжений и деформаций метод конечных элементов, построив в пределах геометрической модели образца сетку конечных элементов прямоугольной формы. Число элементов 5000, число степеней свободы 40602, моделирование выполнено в системе Comsol 4.

В качестве интегрального показателя напряженного состояния деформируемой сплошной среды, использованной в качестве модели образца, принято использовать т.н. эквивалентное «напряжение по фон Мизесу». Распределение этого напряжения по плоскости удлиненного образца показано цветной контурной диаграммой на рисунке 1. Видно, что наиболее напряженными и деформированными являются участки по углам образца. Периодически меняющиеся механические характеристики полотна приводят к волнам в распределении напряжений. Это отчетливо видно на рисунке 2, на котором представлены напряжения по фон Мизесу и относительные продольные и поперечные удлинения (первая и третья главные компоненты тензора деформаций) по линиям, направленным вдоль середины образца и одного из его краев.

Большой размах колебаний напряжений и деформаций свидетельствуют о том, что при проектировании и прогнозировании механических свойств тканых полотен нельзя исходить из усредненных значений. Необходимо учитывать изменения механических свойств нитей после зарботки их в полотно и особенности их взаимодействия на участках перекрытия и в промежутках.

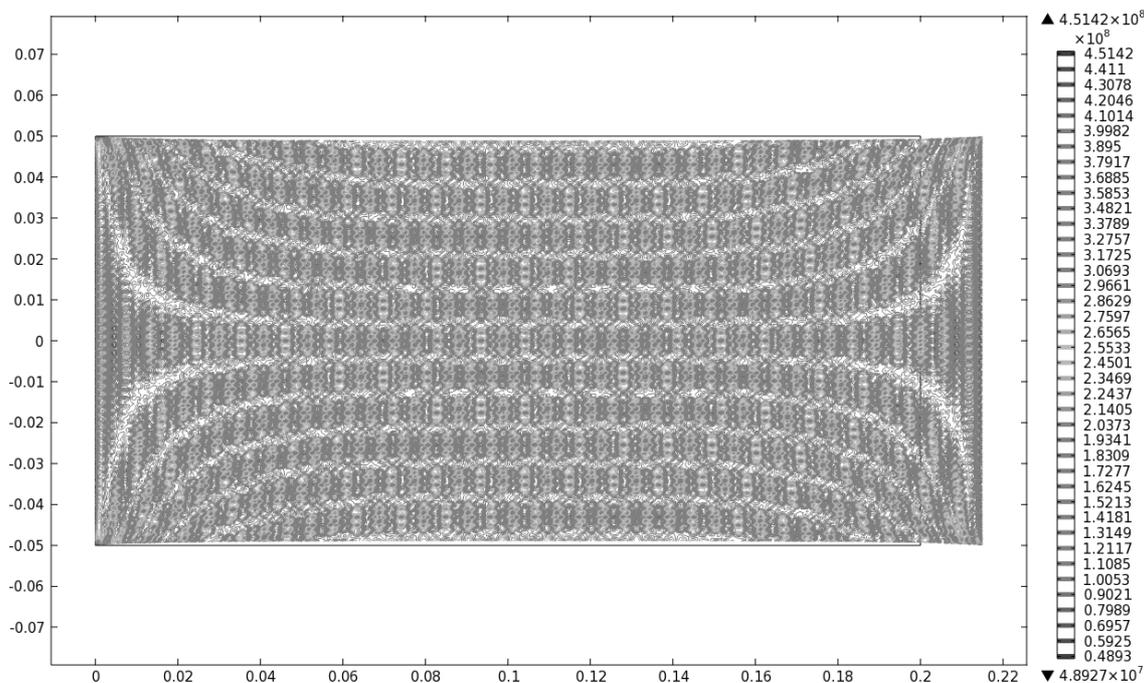
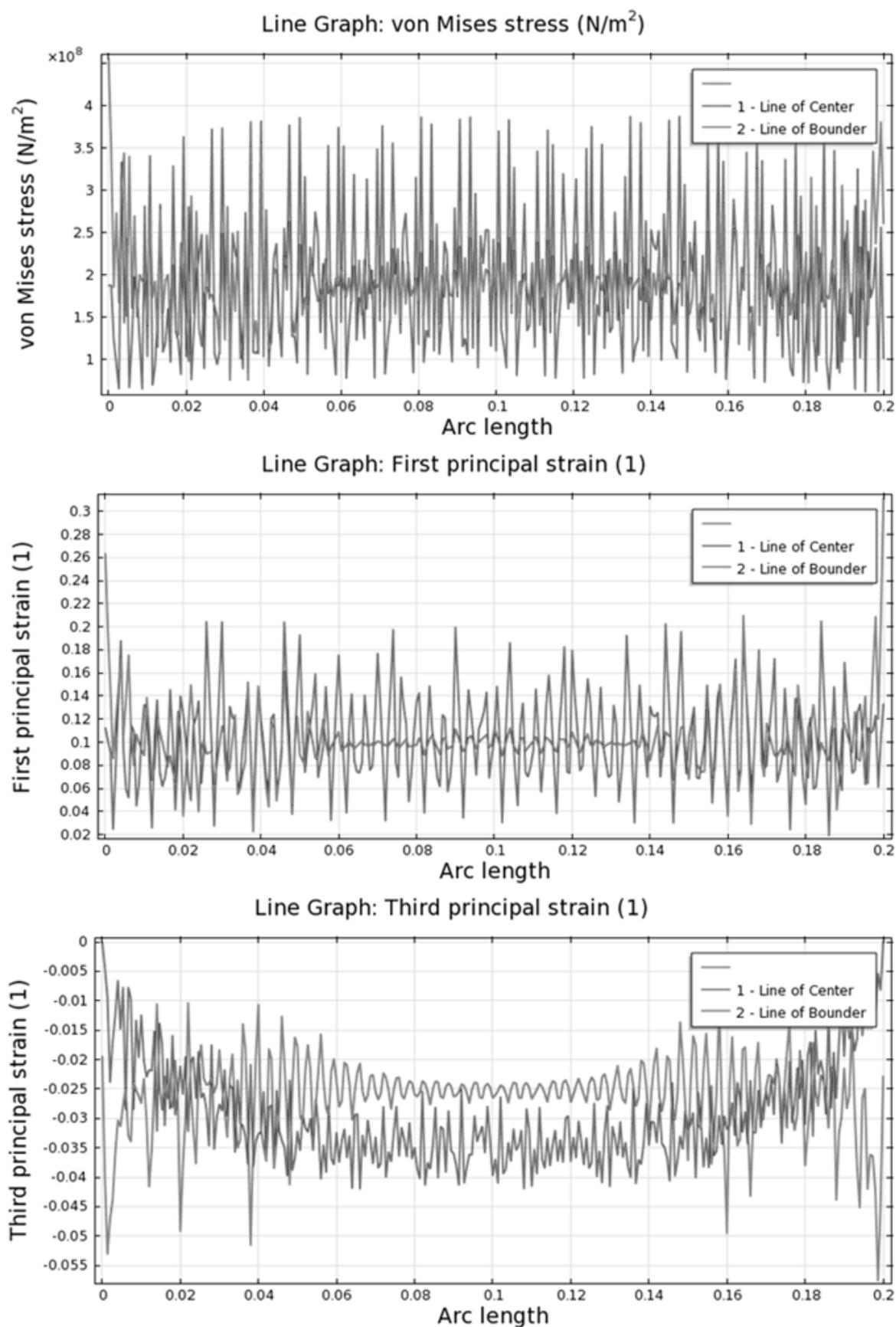


Рисунок 1 – Контурные равных механических напряжений по фон Мизесу



**Рисунок 2 – Напряжения и относительные продольные и поперечные деформации по длине образца в его середине и по краю.**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гордеев, В.А.* Ткацкие переплетения и анализ ткани [Текст]. – М.: Ростехиздат, 1962. – 10 с.
2. *Ломов, С.В.* Прогнозирование строения и механических свойств тканей технического назначения методами математического моделирования. - Диссертация ... доктора технических наук: 05.19.01 / Ломов Степан Владимирович; [Место защиты: С.-Петербург. гос. ун-т технологии и дизайна] – СПб.: 1995. – 486 с.
3. *Примаченко, Б.М.* Разработка методов прогнозирования структуры и эксплуатационных свойств тканей бытового и технического назначения на основе технологических параметров их производства: диссертация ... доктора технических наук : 05.19.02 / Примаченко Борис Макарович; [Место защиты: С.-Петербург. гос. ун-т технологии и дизайна] – СПб.: 2009. – 406 с.
4. *Севостьянов, П.А.* Компьютерные модели в механике волокнистых материалов: монография. – М.: «Тисо Принт», 2013. – 254 с. – ISBN 978-5-9904852-1-1
5. *Севостьянов П.А., Самойлова Т.А., Монахов В.В.* Моделирование неравномерности распределения деформации основных нитей в тканых полотнах методом конечных элементов. // Химические волокна – 2018. - № 5. – с. 93-97.
6. *Севостьянов П.А., Самойлова Т.А., Монахов В.В.* Распределение деформаций по основе и влияние уточных нитей на деформацию при моделировании удлинения основной нити в ткани. Известия вузов. Технология текстильной промышленности – 2018. - № 3 (375). – с.163 - 165.
7. *Севостьянов П.А., Самойлова Т.А., Монахов В.В.* Простая конечноэлементная модель удлинения образца тканого полотна. Технологии и материалы. Витебский государственный технический университет, г. Витебск, Респ. Беларусь, 2018 г. № 1, с.33-36.

УДК 536.241

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТА  
С МАКРО-ОТКЛОНЕНИЕМ  
MODELING THERMAL CONTACT RESISTANCE WITH MACRO DEVIATION**

**Ольга Роальдовна Дорняк\*, Виктор Михайлович Попов\*, Алексей Николаевич  
Внуков\*\*, Наталья Анатольевна Анашкина\*  
Olga Roaldovna Dorniyak\*, Victor Mikhaylovich Popov\*,  
Alexey Nikolaevich Vnukov \*\*, Natal'ya Anatol'yevna Anashkina\***

*\*Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.Морозова,  
Россия, Воронеж*

*\*Voronezh state forestry engineering University named after G. F. Morozov, Russia, Voronezh  
(e-mail: etgvglta@mail.ru)*

*\*\* Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж*

*The Military training and scientific center Sky force*

*«Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Russia, Voronezh»,  
Russia, Voronezh*

*Аннотация:* Рассмотрен результат применения математической модели теплообмена в малонагруженных контактных парах, у которых соприкасающиеся поверхности непараллельные. Показано удовлетворительное совпадение значений перепада температуры в зоне контакта, а также контактного термического сопротивления, полученных в результате вычислительного и натурального экспериментов.

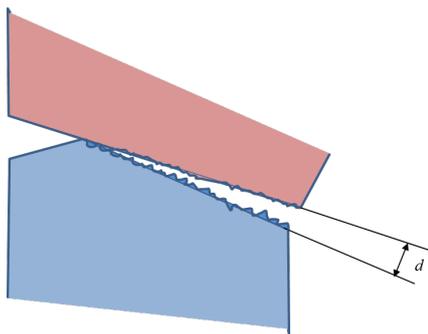
*Abstract:* The result of application of the mathematical model of heat transfer in low-loaded contact pairs whose contact surfaces are nonparallel is considered. The values of the temperature

drop in the contact zone and the contact thermal resistance obtained as a result of computational and full-scale experiments are shown to coincide satisfactorily.

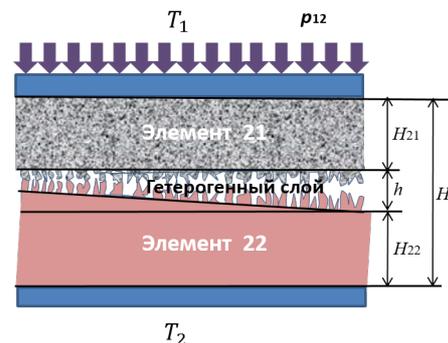
*Ключевые слова:* теплопроводность, термическое сопротивление, макро-отклонения формы соприкасающихся поверхностей, многофазные системы.

*Keywords:* thermal conductivity, thermal resistance, macro deviations of the shape of the contacting surfaces, multiphase systems

Прогноз эффективности теплопередачи через поверхности элементов, находящихся в контакте, важен для проектирования конструкций авиационно-космического комплекса, электронной промышленности, а также технологий, связанных с процессами сушки и термовлажностной обработки материалов. Реальные поверхности имеют микродефекты, что создает проблемы при осуществлении тепловых расчетов. Известно, что температурная проводимость неидеального контакта существенно зависит от величины механической нагрузки, комплекса геометрических факторов, а также от теплофизических свойств контактирующих материалов. Разработанные подходы к решению данной проблемы базируются на результатах экспериментальных исследований и полуэмпирических моделях контактного взаимодействия [1-3]. Как правило эти подходы применимы к одному из типов контактирующих поверхностей: шероховатым, волнистым и поверхностям с макро-отклонениями. В [4-6] предложена общая теоретическая модель контактного взаимодействия, исследование которой проведено ранее только для шероховатых поверхностей. В данной работе рассматривается возможность применения этой модели для поверхностей, обладающими макро-отклонениями в виде (непрямолинейности) – рисунок 1.



**Рисунок 1 – Схематичный вид поверхностей контактной пары с макро-отклонением в виде непрямолинейности и шероховатостью.**



**Рисунок 2 – Расчетная схема.**

Математическая модель термоконтактного взаимодействия является достаточно сложной. В полном объеме она представлена в [4] в виде нестационарной сопряженной задачи для напряженно-деформированного и теплового состояния материалов контактной пары. Объект моделирования – два тела в виде пластин 21 и 22 из гомогенного или гетерогенного материала. Область контакта рассматривается как отдельный слой, содержащий воздух, а также включения материалов обоих элементов контактной пары (рисунок 2). Отметим, что в случае идеального контакта такой слой отсутствует.

Математическая модель включает уравнения сохранения массы, количества движения и энергии в двух фазах – твердой и газообразной. Все уравнения записаны, следуя [7], для микроскопических переменных, усредненных по объему каждой из фаз. Реологическое поведение твердой фазы считается упругим, деформации линейными.

Расчет температурного поля в системе проведен для образцов из одинакового материала - стали 45 при следующих значениях параметров.

Геометрические параметры. Толщина пластин  $H_{21}=H_{22}=0.04$  м. Обе контактные поверхности являются шероховатыми. Максимальная высота микронеровностей

поверхностей соответствует классам 8б и 9а. Она задана значениями  $R_{\max}=2.1$  мкм и  $R_{\max}=1.4$  мкм. Непрямолинейность соединения, определяемая отношением максимального расстояния между плоскостями к базовой длине, принята равной  $d/b=7 \cdot 10^{-6}$ .

Теплофизические параметры. Коэффициенты теплопроводности -  $\lambda_1=0.0248$  Вт/(мК);  $\lambda_{22}=\lambda_{21}=48.2$  Вт/(мК). Коэффициенты теплоотдачи на межфазных поверхностях  $\alpha_{1-21}^{\Sigma} = \alpha_{21-1}^{\Sigma} = 2$  Вт/(м<sup>2</sup>К);  $\alpha_{1-22}^{\Sigma} = \alpha_{22-1}^{\Sigma} = 5$  Вт/(м<sup>2</sup>К) ;  $\alpha_{21-22}^{\Sigma} = \alpha_{22-22}^{\Sigma} = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>К) ;  $\alpha_{22-21}^{\Sigma} = 5 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>К).

Входными функциями модели являются распределения объемного содержания металлических включений в гетерогенном слое  $\alpha_{21}$  и  $\alpha_{22}$  до приложения механической нагрузки. Такое распределение для безразмерных координат идентично уравнению опорной кривой профиля, получаемой на основе профилограммы. В [1] обосновано выражение для опорной кривой плоской шероховатой поверхности в виде бета-функции:

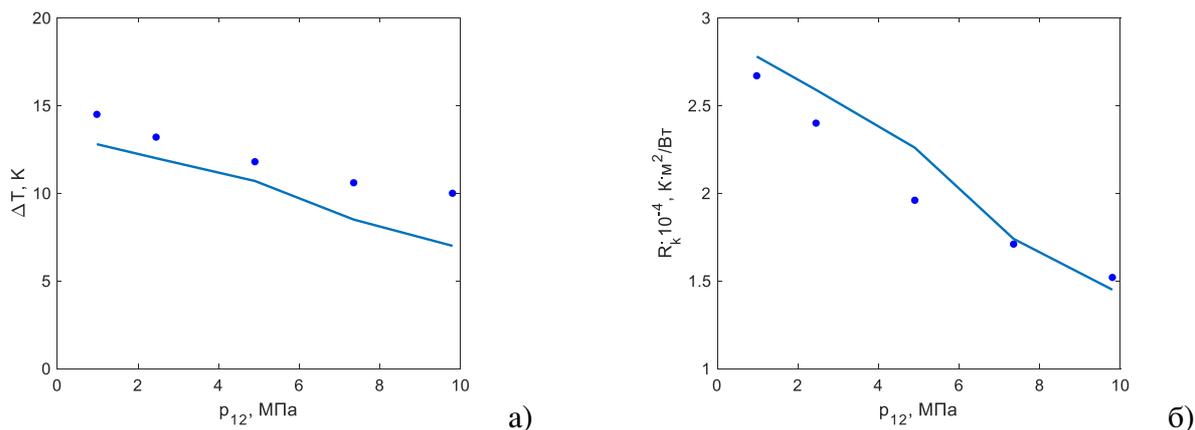
$$\alpha_2(e_m) = t_p(e_m) = \frac{\Gamma(m+n)}{\Gamma(m)\Gamma(n)} \int_0^{e_m} x^{(m-1)}(1-x)^{n-1} dx \quad (1)$$

где  $e_m=z/R_{\max}$ ,  $z$  – поперечная координата, отсчитываемая от линии выступов;  $m$  и  $n$  – параметры. Распределение (1) подходит для описания микрогеометрии поверхности элемента 22. Элемент 21 имеет комплекса дефектов поверхности (шероховатость и макро-отклонение). Опираясь на геометрический смысл опорной кривой, легко получить ее выражение для элемента 21, как вероятности произведения двух совместных событий, используя уравнения опорных кривых для макро-отклонения и шероховатости. Объемное содержание воздуха  $\alpha_1$  отлично от нуля только в гетерогенном слое. Здесь  $\alpha_1 = 1 - \alpha_{21} - \alpha_{22}$ .

Для параметров бета-распределения микронеровностей по высоте приняты значения  $m = 3$ ,  $n = 2$  (для поверхностей обоих элементов). Начальные значения удельной поверхности раздела компонент твердой фазы и газообразной фазы в гетерогенном слое должны определяться экспериментально. В расчетах принято  $s_{1-i} = (1 - \alpha_i(x_1))s_{1-i}$ ,  $i = 21, 22$ ,  $s_{1-21} = s_{1-22} = 2,5 \cdot 10^4$  м<sup>-1</sup>;  $s_{21-22}=3.2 \cdot 10^6$  м<sup>-1</sup>.

Реологические параметры. Модули упругости и коэффициенты Пуассона для материала и структурного каркаса  $E_s = 1.9 \cdot 10^{11}$  Па;  $E_f = 10^9$  Па;  $\nu_s = \nu_f = 0,26$ .

Температура на внешних границах  $T_{22}|_{x=0} = T_2 = 331$  К ;  $T_{21}|_{x=H} = T_1 = 419$  К . Давление на поверхности контактной пары  $p_{12}$  изменялось в диапазоне от 0.1 до 1 МПа.



**Рисунок 3 – Термическое сопротивление – а) и температурный скачок в контактном слое для контактной пары сталь 45-сталь 45 ( $\nabla 8б-\nabla 9а$ ,  $\delta_{эжв}/b \cdot 10^5=70$ ) в зависимости от интенсивности нагружения. Непрерывные кривые – расчет, маркерные – эксперимент [2].**

На рисунке 3 показана зависимость термического сопротивления контактной пары и температурного скачка в пограничной зоне от величины давления. Сравнение данных, полученных в рамках вычислительного и натурального эксперимента [2], позволяет сделать

вывод об их удовлетворительном совпадении. С ростом интенсивности сжимающей нагрузки величина термосопротивления контакта с макро-отклонениями снижается. Соответствующие значения температурного скачка имеют такую же тенденцию.

**Вывод.** Исследование математической модели термомеханического взаимодействия элементов контактной пары с плоскими поверхностями, имеющими отклонения от формы в виде непрямолинейности, показало ее применимость для прогноза контактного термосопротивления реальных поверхностей с макро-отклонениями.

*Список обозначений:*  $R_k$  – термическое сопротивление теплопередачи,  $m^2K/Wt$ ;  $s_{i,j}$  – удельная поверхность раздела фаз  $i$  и  $j$ ,  $m^{-1}$ ;  $p$  – давление,  $Pa$ ;  $T$  – температура,  $K$ ;  $q$  – плотность теплового потока,  $Wt/m^2$ ;  $\alpha$  – объемное содержание фазы;  $\alpha_{i,j}^{\Sigma}$  – коэффициент теплоотдачи между фазами  $i$  и  $j$ ,  $Wt/(m^2K)$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Wt/(mK)$ .

*Нижние индексы* относятся: 1, 2 – к газообразной и твердой фазам, 21 и 22 – компоненты твердой фазы для двух пластин;  $\Sigma_{ij}$  – к границам раздела фаз  $i$  и  $j$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. - Москва: Наука, 1970. 227 с.
2. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. Москва: Энергия, 1971. 216 с.
3. Bahrami M., Culham J.R., Yovanovich M.M., Asme F. Modeling Thermal Contact Resistance: A Scale Analysis Approach. Journal of Heat Transfer. 2004. V. 126. P. 896-905.
4. Дорняк О.Р., Попов В.М., Анашкина Н.А. Математическое моделирование термического сопротивления в контактных парах из гомогенных и гетерогенных материалов // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 1. С. 24-33.
5. Дорняк, О.Р., Попов В.М., Анашкина Н.А. Математическая модель термоконтального взаимодействия двух капиллярно-пористых образцов // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского. - М.: 2016. Т. 2. С. 127-130.
6. Попов В.М., Дорняк О.Р. Соединения на клеях, модифицированных воздействием физических полей. – Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г. Ф. Морозова, 2016. 128 с.
7. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.

УДК 519.876.5: 677.024: 53.09

#### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ УДЛИНЕНИЯ И РАЗРЫВА ТКАНОГО ПОЛОТНА COMPUTER SIMULATION OF THE STATISTICAL DYNAMICS OF WAVING FABRIC ELONGATION AND BREAKING

**Петр Алексеевич Севостьянов, Татьяна Алексеевна Самойлова**  
**Petr A. Sevostyanov, Tatyana A. Samoylova**

*Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина*  
*(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва*  
*The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow*  
*(e-mail: petrsev46@yandex.ru, tasamo89@yandex.ru)*

*Аннотация:* Разработан алгоритм компьютерной имитации статистической динамики удлинения ткани до разрыва образца. Результаты моделирования в виде полей деформаций дают наглядную картину динамики развития деформации и разрыва ткани, адекватную известным особенностям накопления деформации и разрыва вдоль поперечных (точных) нитей ткани, которые отличают его от разрыва других материалов.

*Abstract:* An algorithm for computer simulation of elongation's statistical dynamics to rupture of the sample was developed. The simulation results in the form of deformation fields give a clear picture of the deformation and rupture dynamics, adequate to the known features of the deformation and rupture accumulation along the weft, which distinguish it from the rupture of other materials.

*Ключевые слова:* компьютерное моделирование, деформация, удлинение, тканое полотно.

*Keywords:* computer modeling, deformation, elongation, woven fabric.

Деформация и разрыв тканого полотна принципиально отличается от разрушения сплошных кристаллических или аморфных твердых материалов и полимеров и от разрушения композитных материалов [1,2]. В первом случае разрушение связано с возникновением и развитием трещин. На их контурах происходит концентрация напряжений и деформаций, причем, чем больше напряжения и деформации вокруг трещины, тем быстрее она развивается и тем большую область захватывает. Разрушение композитного материала происходит как вероятностный процесс, распределенный в течение всего времени разрушения по всему объему материала [3,4,5,6].

Процесс разрыва тканого полотна происходит в несколько стадий. При удлинении ткани напряжения и деформации распределяются по площади образца более или менее равномерно. При удлинении вдоль основы уточные нити остаются практически не нагруженными. Их задача - упрочнить основные нити и перераспределить внешнюю нагрузку более или менее равномерно между всеми основными нитями. С нарастанием нагрузки во все большей и большей мере проявляются различия в прочностных свойствах нитей основы на длинах порядка элемента ткани, т.е. размера перекрытия нитей основы и утка. Эти длины соизмеримы с толщиной нитей. Неравномерность в линейной плотности нитей, их механической прочности и прочности образующих нить волокон, в силах трения и сцепления между волокнами проявляются все сильнее и приводят к различной деформации участков основных нитей в элементе ткани между соседними нитями утка. Возникает эффект положительной обратной связи: чем больше была нарушена структура и прочность локального участка основной нити, тем больше деформируется этот участок нити на последующих этапах удлинения.

Возникает также и коллективный эффект: ослабление одной из нитей основы в элементе ткани приводит к перераспределению нагрузки на остальные нити основы в этом же элементе ткани [7]. Аналогичная ситуация возникает в пучке параллельных удлиняемых нитей [8]. Когда одна из них рвется, нагрузка перераспределяется на еще не разорвавшиеся нити, но в случае ткани этот "пучок" очень короткий: его длина в пределах одного перекрытия нитей основы и утка. Вследствие указанных особенностей модель динамики удлинения и разрыва тканого полотна не сводится к моделям деформируемых сплошных сред, полимерных или композитных материалов или пучков параллельных нитей основы, упрочненных благодаря их взаимодействию с нитями утка. Уток не только упрочняет нити основы при их перекрытии и взаимодействии, но и перераспределяет нагрузку между нитями основы.

С учетом этих представлений был разработан алгоритм и на его основе компьютерная модель для имитации динамики развития деформации в прямоугольном образце тканого полотна, которое удлиняется вдоль нитей основы с постоянной скоростью, включая появление изменений в структуре полотна вплоть до разрыва отделочных нитей основы. Модель имитирует процесс монотонного удлинения (полуциклового испытания [9]) прямоугольного образца тканого полотна вдоль основных нитей до возникновения в нем областей разрыва и позволила детально исследовать динамику этих процессов [2,5]. Деформация удлинения образца в основном связана с удлинением участков основы, расположенных между областями их перекрытия уточными нитями, поскольку в этих областях общая прочность и жесткость материала существенно превышают эти же характеристики нитей основы вследствие тесного взаимодействия: трения и сцепления между

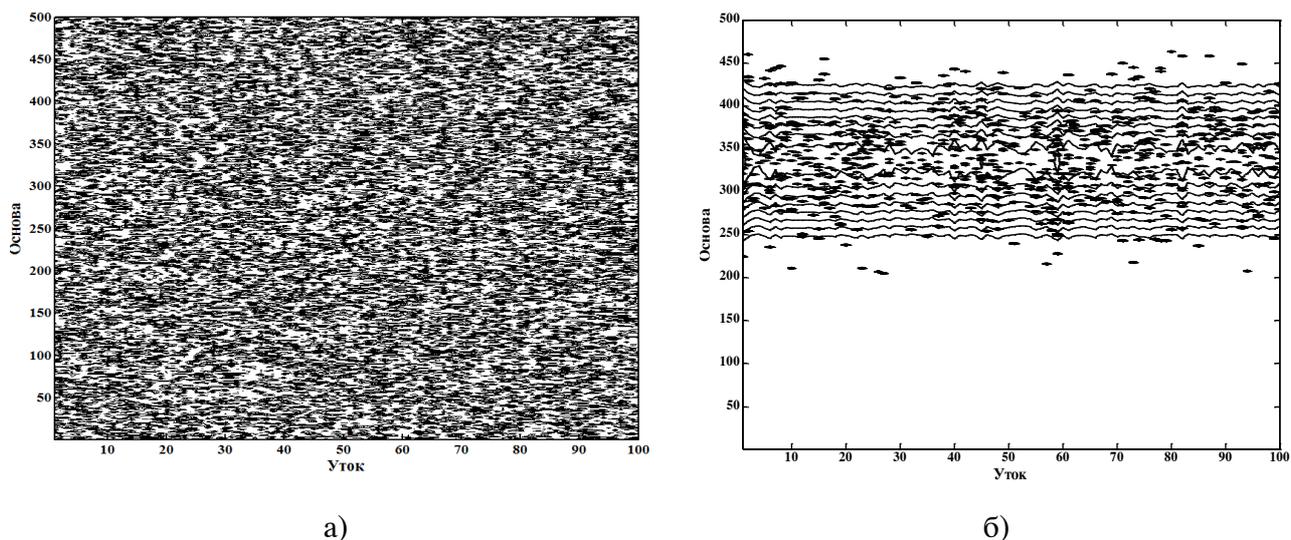
основой и утком. Деформация образца содержит также и случайные вариации, приводящие к различной величине этих деформаций для разных элементов ткани. Эти вариации связаны с вариациями в строении нитей основы, свойствах волокон, особенностях перекрытия нитей и др. Если удлинение образца происходит достаточно быстро, эластическая составляющая деформаций не успевает развиться, и ее можно исключить из рассмотрения.

Для имитации разрыва ткани необходимо учитывать значения предельной разрывной нагрузки и относительного разрывного удлинения для каждого участка основных нитей. Кроме того, следует учитывать коллективное взаимодействие нитей в структуре ткани. Эти особенности поведения нитей в образце в процессе разрыва были учтены в модели с помощью включенной в нее формулы для расчета перераспределения удлинения нитей основы, которые еще остались неразорванными на данном участке образца и на текущий момент времени  $t$

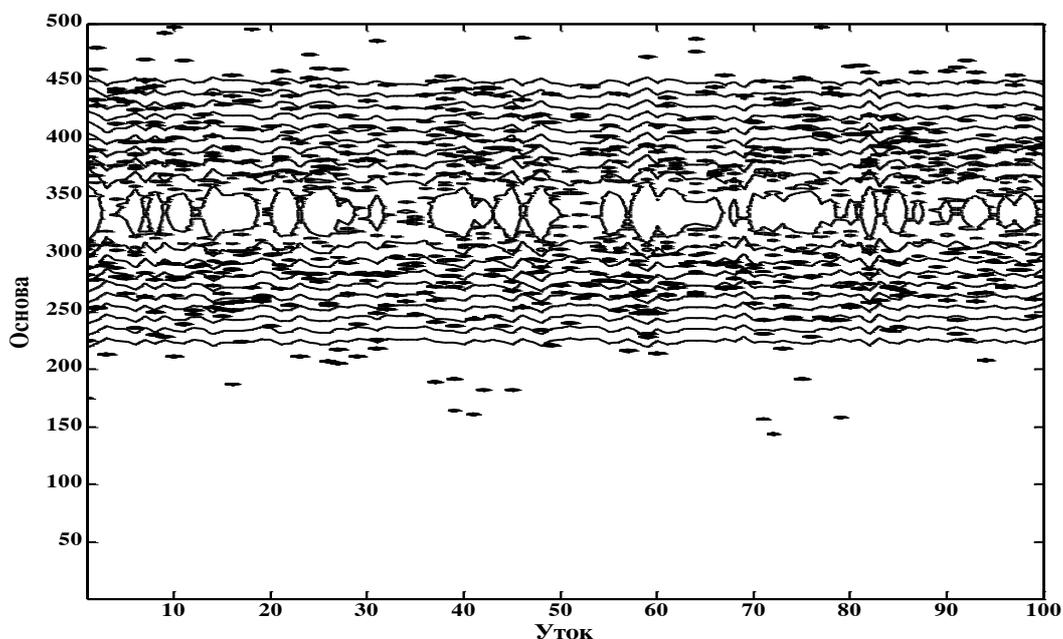
$$\varepsilon(i, j, t + 1) = \varepsilon(i, j, t) + P_{\max}(k) \exp\left(-\frac{|i - i_{\max}(k)|}{at}\right) \exp\left(-\frac{|j - j_{\max}(k)|}{bt}\right)$$

где  $\varepsilon(i, j, t)$  – относительная деформация  $j$ -й нити основы в элементе ткани между  $i$ -й и  $i+1$ -й нитями утка в момент  $t$ ,  $P_{\max}$  – приращение деформации вследствие удлинения образца в области локальной концентрации напряжения в образце ткани,  $k$  – номер участка локальной концентрации деформации. Включенные в формулу параметры  $at$  и  $bt$  зависят от  $t$  и от переплетения и свойств образующих его нитей. Они задают перераспределение деформации между соседними участками ткани. Экспоненциальный закон убывания этого перераспределения с увеличением расстояния между нитями был обоснован в [2]. Эти параметры не поддаются теоретической оценке и могут быть оценены экспериментально. Приведенный в [5] алгоритм имитации и его программная реализация позволили получить имитацию динамики разрыва образца ткани, которую лучше и полнее всего можно отобразить двумерными полями распределения деформации по площади образца на разных этапах растяжения и разрыва.

С нарастанием удлинения образца на статистически однородном фоне деформации нитей постепенно появляются нарушения, которые затем развиваются, перераспределяются по площади образца, пока не происходит разрыв вдоль одной из уточных нитей. Развитие неоднородности деформации, появление «очагов» возможных разрывов и концентрация деформации вокруг этих областей показаны на рисунках 1а, 1б и рисунке 2. Отметим нелинейный характер нарастания дислокаций. Если на первых 60 – 70% циклов однородность образца практически не нарушалась (происходило накопление деформации в пределах существовавшей структуры ткани), то, начиная с некоторого уровня деформации, нарастание размера дислокаций происходит лавинообразно.



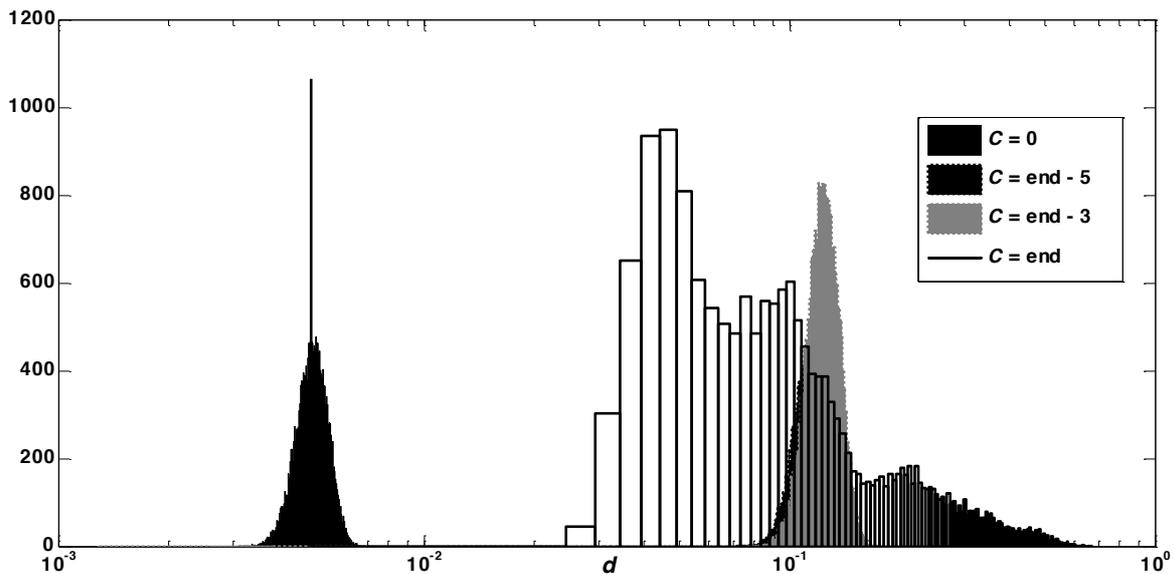
**Рисунок 1 – а) Статистически однородное поле распределения деформации в образце ткани на начальном этапе удлинения; б) Локализация деформаций в элементах ткани вдоль группы уточных нитей**



**Рисунок 2 – Образование разрывов основы вдоль уточных нитей при локализации деформации ткани на конечном этапе непосредственно перед полным разрывом нитей основы**

В качестве показателей статистической неоднородности двумерного поля деформаций  $\epsilon(i, j)$  для оценки динамики развития деформации и разрыва были выбраны гистограммы удлинения участков нитей основы перед началом удлинения ( $C = 0$ ), за 5 шагов удлинения ( $C = \text{end} - 5$ ), за 3 шага до разрыва ( $C = \text{end} - 3$ ), при разрыве ( $C = \text{end}$ ), которые приведены на рис.3. По оси абсцисс для большей информативности рисунка использован логарифмический масштаб. На рисунке видно существенное изменение не только абсолютных значений удлинения, но и формы распределения. Последнее является доказательством хаотизации деформации и лавинообразного развития процесса разрыва. Для изучения динамики разрыва необходимы специфические механико-статистические методы, примером которых является описываемая модель. Физико-механические и геометрические свойства нитей и ткани в

областях деформаций, далеких от разрыва, могут быть использованы лишь как начальные условия для соответствующих компьютерных нелинейных моделей статистической динамики.



**Рисунок 3 – Гистограммы удлинения участков нитей основы до удлинения ( $C = 0$ ), за 5 циклов ( $C = \text{end}-5$ ), за 3 цикла до разрыва ( $C = \text{end}-3$ ), при разрыве ( $C = \text{end}$ )**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел // Новосибирск: Наука. 1985. – 254 с.
2. Севостьянов П.А. Компьютерные модели в механике волокнистых материалов: монография // - М.: «Тисо Принт». 2013. – 254 с.
3. Забродин Д.А., Севостьянов П.А. Моделирование потери свойств текстильных материалов как задача теории надежности // Химические волокна. 2009. № 4. С.41 – 43.
4. Севостьянов П.А., Забродин Д.А., Дасюк П.Е., Баландин Е.А. Статистическое компьютерное моделирование одноосного растяжения тканого полотна методом конечных элементов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2014. № 6, - С. 102-105.
5. Севостьянов П.А., Забродин Д.А., Дасюк П.Е., Пучкова Н.М. Модель удлинения и разрыва ткани с учетом статистических вариаций параметров нитей и структуры. // Химические волокна. 2014. №6. С.47-52.
6. Севостьянов П.А. Статистическая имитация растяжения и разрыва пряжи. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1981. №3. С.9 – 13
7. Севостьянов П.А., Самойлова Т.А., Монахов В.В. Простая конечноэлементная модель удлинения образца тканого полотна. Технологии и материалы. Витебский государственный технический университет, г. Витебск, Респ. Беларусь, 2018 г. № 1, с.33-36.
8. Севостьянов П.А., Самойлова Т.А., Монахов В.В. Динамика удлинения и разрыва комплексных нитей и ее связь со свойствами элементарных нитей при моделировании полуцикловых деформаций. Химические волокна – 2017. - № 2. – с. 64-66.
9. Кукин Г.Н. Лабораторный практикум по курсу «Учение о волокнистых материалах» / Г.Н. Кукин, А.Н. Соловьев, Ф.Х. Садыкова, А.Г. Монастырский. Под ред. Г.Н. Кукина – М.: Государственное научно-техническое изд-во легкой пром-сти. 1952. – 300 с.

УДК 681.2

**ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ  
DIGITAL METHODS FOR ANALYSIS OF THE STATE OF FOREST ARRAYS**

**Наталья Юрьевна Евсикова\*, Нина Сергеевна Камалова\*,  
Наталья Александровна Саврасова\*\*  
Natalya Yu. Evsikova\*, Nina S. Kamalova\*, Natalya A. Savrasova\*\***

*\*Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова,  
Россия, Воронеж*

*\*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov,  
Russia, Voronezh*

*(e-mail: natalyaevsikova@mail.ru, rc@icmail.ru)*

*\*\*Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,  
Россия, Воронеж*

*\*\*The Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin,  
Russia, Voronezh*

*(e-mail: savrasova-natalya@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрены особенности формирования моделей оценки состояния лесных массивов в системах прогноза катастрофических ситуаций. Предложена фундаментальная концепция оценки состояния лесных массивов, которая позволяет применять цифровые методы анализа.

*Abstract:* The features of the formation of models for assessing the state of forests in forecasting systems of catastrophic situations are considered. A fundamental concept for assessing the state of forests, which allows the use of digital methods of analysis, is proposed.

*Ключевые слова:* лесные массивы, формализованное моделирование, состояние лесных массивов, прогноз катастрофических ситуаций.

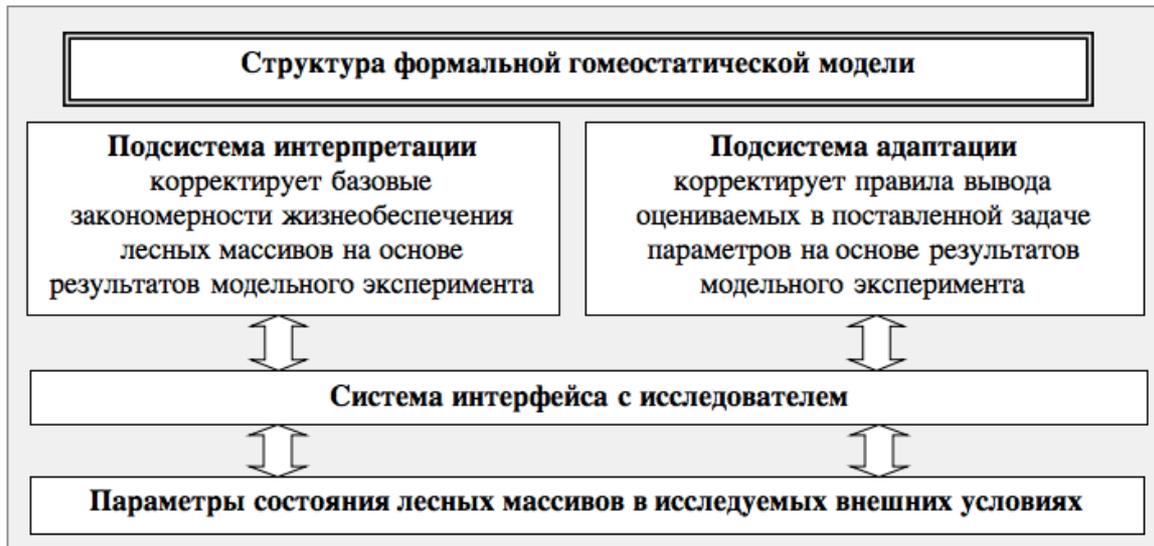
*Keywords:* forests, formalized simulating, the state of forests, forecast of catastrophic situations.

Лесные массивы являются возобновляемым источником кислорода на Земле, сберегают генетическое разнообразие биосферы, очищают водные стоки, способствуют накоплению грунтовых вод и гумуса в почвах, обеспечивают уникальные жизненные условия на планете. Существующие способы оценки состояния лесных массивов носят вербальный (описательный характер) и основываются на анализе факторов окружающей среды (метеоданные, загрязнение воздуха и почв и т.д.). Активно развиваются методики моделирования состояния лесных массивов в области прогнозирования лесных пожаров [1, 2, 3]. Например, в наиболее проработанной и развитой канадской системе прогноза пожарной опасности (FWI) прогноз опасности возгорания оценивается с учетом следующих факторов: 1) температура и относительная влажность воздуха (на 12.00–13.00 часов); 2) продолжительность периода без дождей; 3) ветер на высоте 10 м на открытом месте или сезонная продолжительность дня. Моделируется при этом скорость высыхания слоев эталонного горючего. В американской национальной системе оценки пожарной опасности (вначале NFDRS–72, затем NFDRS–78) все растительные горючие материалы (РГМ) подразделяются на две крупные категории: мертвые и живые, поскольку считается, что живые растения всегда способны поддерживать свое высокое влагосодержание, в то время как влагосодержание отмерших РГМ зависит от процессов их увлажнения и высыхания под влиянием погодных условий. Анализируют в процессе оценки время высыхания. В российских системах прогноз основывают на метеоданных (система Нестерова) или моделируют процесс сушки слоя горючих материалов на подстилающей поверхности, антропогенную нагрузку и действие сухих гроз. Современные цифровые технологии могут значительно расширить

возможности исследования и моделирования состояния лесных массивов. С этой целью в работах [4, 5], например, предлагается измерять отклик ксилемы стволов древесных растений на изменение температуры с помощью полупроводниковых цифровых датчиков.

Существующие модели носят детерминированный или вероятностный характер (в лучшем случае наблюдается объединение этих подходов) [1, 2, 3]. При этом модели не учитывают комплексность лесных массивов, взаимовлияние их компонент и динамику влагосодержания в течение года. Таким образом, на настоящий момент моделирование состояния лесных массивов не имеет серьезной фундаментальной концепции. Целью данной работы является обоснование концепции для создания фундамента для формализованного моделирования состояния лесных массивов с помощью цифровых методов анализа.

Концепция должна включать в себя вербальную модель объекта с учетом цели исследования, методы измерения характеристик с контролируемой точностью и оценку влияния внешних факторов. Формальные математические модели, статистические с базовыми аксиомами, не подходят для такого объекта, как лесной массив. Поэтому в основе инструментальной части концепции должно лежать гомеостатическое моделирование. В системном анализе под таким моделированием понимают пошаговое приведение исходной модели к состоянию, подобному объекту-оригиналу, путем включения в модель механизмов адаптации, интерпретации и интерфейса связи с исследователем. Согласно технологии такого формализованного подхода, как показано в [6], на каждом шаге система развивает свою базовую основу (аксиомы и правила ввода-вывода), исходя из результатов модельного эксперимента, в котором сопоставляет их с характеристиками объекта и вносит корректировки в изначальные предположения. В отличие от систем искусственного интеллекта базовые представления в такой модели корректируются непосредственно исследователем. Структура, которой должна обладать модель для осуществления подобной технологии, представлена на рисунке 1.



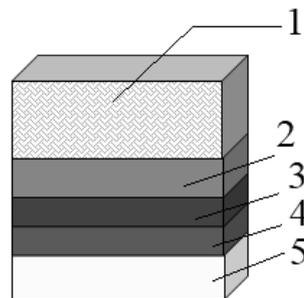
**Рисунок 1 – Структура гомеостатической модели.**

Подсистема интерпретации, формируя базовые закономерности или соотношения между параметрами состояния лесных массивов, не может учитывать все возможные характеристики элементов и процессов в такой комплексной системе. Поэтому при интерпретации происходит пренебрежение некоторыми параметрами и процессами в виду их незначительности или скоротечности. Обоснование этих упрощений определяется особенностями проблем, решаемых с помощью модели. При создании связанной с предотвращением катастрофических ситуаций с помощью цифровых технологий модели основными выходными характеристиками становятся критические значения параметров

состояния лесных массивов, при которых вероятность катастрофы приближается к предельно допустимому значению и определяется уже только внешними условиями (например, возникновением очага возгорания при пожаре).

Анализ известных моделей прогноза пожаров в лесных массивах показывает, что в основе оперируемых алгоритмом данных лежат сведения об осадках, интенсивности солнечного излучения, скорости испарения, интенсивности гроз и антропогенном факторе. Поскольку антропогенный фактор и возможность сухих гроз характеризует вероятность образования очага возгорания, то при оценке состояния лесного массива их можно не учитывать. В результате остаются три природных фактора, влияние которых на лесной массив осуществляется независимо друг от друга, поэтому комплексное взаимодействие внешних условий можно моделировать с помощью известного в классической физике принципа суперпозиции. Таким образом, в качестве параметров состояния лесного массива для прогноза катастрофических ситуаций надо выбирать характеристики отклика лесных массивов на воздействие осадков, испарения и солнечного излучения (факторов влияния). Все три перечисленных фактора влияния изменяют одно физическое свойство – влагосодержание, определяющее как уровень сопротивления возгоранию, так и жизнеспособность массива. Следовательно, задачей моделирования является оценка влагосодержания в лесном массиве в текущий момент времени в текущих физических условиях. Тогда на выходе модель даст процент влагосодержания от минимального критически допустимого значения, которое определяется эмпирически.

Для дальнейшего формирования концептуальной модели необходима вербальная модель лесного массива. Лесной массив при прогнозе природных катастроф удобно представить как многослойную структуру (см. рис. 2), которая в первом приближении содержит несколько комплексных слоев: слой древостоев, подлеска и воздуха, напочвенный растительный покров, древесный опад, лесную подстилку, залежи горючих материалов и перегноя, слой негорючих материалов [1–3].



**Рисунок 2 – Многослойная концепция лесных массивов (1 – многоярусные древостои с подлеском; 2 – напочвенный растительный покров; 3 – лесная подстилка; 4 – залежи горючих материалов и перегноя; 5 – слой негорючих материалов).**

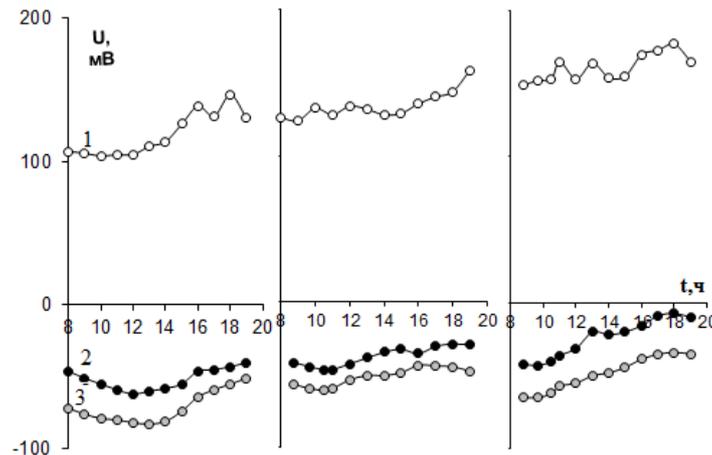
Для оценки влагосодержания в данной модели удобно характеризовать каждый слой параметрами проницаемости для осадков и способностью к накоплению влаги под воздействием факторов влияния. Влияние осадков можно считать положительным фактором, который увеличивает влагосодержание в слоях лесных массивов. Первый слой обычно состоит из древостоев нескольких ярусов, кустарникового подлеска и воздуха, поэтому его проницаемость во многом определяется влажностью окружающей среды, а способность к накоплению – влагосодержанием стволов деревьев, по которым происходит транспорт воды. Напочвенный растительный покров содержит виды, впитывающие, но не удерживающие и не накапливающие влагу. Влагосодержание подстилки и опада определяется физическими законами увлажнения и высыхания, для которых существует множество моделей оценки скорости высыхания горючих материалов. Поскольку параметры состояния всех слоев взаимосвязаны, то наблюдение за состоянием одного из них с контролируемой точностью позволило бы разработать динамичную систему контроля за состоянием лесных массивов в

целом с использованием цифровых технологий. Наиболее накапливающим слоем является первый слой, характеристиками его состояния можно считать влагосодержание древостоев.

В основе предлагаемого цифрового метода оценки влагосодержания лежит отклик ксилемы стволов деревьев на флуктуации температуры окружающей среды. Из-за высокой теплоемкости воды стационарная температура в стволе во многом определяется влагосодержанием. Было показано [7, 8], что при изменении температуры окружающей среды в стволе дерева в силу пьезоэлектрических и пьезоэлектрических свойств основной составляющей древесины – целлюлозы в радиальном направлении возникает электрическое поле, разность потенциалов которого распределяется вдоль радиуса  $r$  как

$$U = U_{max} \left( 1.24 - \frac{r}{r_0} - 0.24 \frac{r^3}{r_0^3} \right), \quad (1)$$

где  $U_{max}$  – максимальное значение разности потенциалов, зависящее от свойств древесины конкретного дерева,  $r_0$  – радиус его ствола. Экспериментальные исследования показали, что суточная динамика разности потенциалов (см. рис. 3) действительно является откликом дерева на изменение температуры, зависит от влажности, но характерна для каждой особи и отличается относительно стабильным уровнем при малых флуктуациях температуры окружающей среды. Цифровая обработка изменений этого сигнала может стать основой метода оценки состояния древостоев и лесных массивов с помощью цифровых технологий.



**Рисунок 4 – Суточная динамика разности потенциалов между центром ствола и половиной радиуса ствола. 1 – береза №1, 2 – береза №2, 3 – береза №3 [9].**

### Выводы

Разработано обоснование фундаментальной физической концепции анализа состояния лесных массивов как многослойной системы. Основной характеристикой при решении задач прогноза катастрофических ситуаций выбрано влагосодержание, которое предлагается контролировать с помощью цифровых методов анализа разности потенциалов, возникающей в стволах деревьев при флуктуации температуры окружающей среды.

Экспериментально установлено, что исследуемая разность потенциалов определяется в значительной степени влагосодержанием и является откликом древесины на основные факторы внешнего влияния

Исследования проведены в рамках гранта, выделенного ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет имени Г. Ф. Морозова» на проект «Разработка фундаментальной концепции методов измерения термополяризационных электрических полей в стволах древесных растений».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Castelli M., Vanneschi L., Popovič A. Predicting Burned Areas of Forest Fires: an Artificial Intelligence Approach // Fire Ecology. 2015. V. 11. Iss. 1. P. 106. doi 10.4996/fireecology.1101106.

2. Nelson Ralph M., Butler Bret W., Weise David R. Entrainment regimes and flame characteristics of wildland fires // *International Journal of Wildland Fire*. 2012. № 21(2). P. 127. <http://dx.doi.org/10.1071/WF10034>.
3. Perminov V. Mathematical Modeling of Crown Forest Fire Spread // *Open Journal of Forestry*. 2012. V. 2. № 1. P. 17.
4. Камалова Н.С., Лисицын В.И., Евсикова Н.Ю., Саушкин В.В. Цифровые методы контроля пожаробезопасности лесных массивов // *Лесные экосистемы в условиях меняющегося климата: проблемы и перспективы: материалы международной научно-технической юбилейной конференции, посвященной 100-летию кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, 21-22 мая 2015 г.* / отв. ред. С.М. Матвеев; ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова. Воронеж: Типография "Кварта", 2015. С. 47.
5. Евсикова Н.Ю., Камалова Н.С., Матвеев Н.Н. Цифровые методы контроля жизнеспособности древостоя в зонах активной застройки // *Лесные экосистемы в условиях меняющегося климата: проблемы и перспективы: материалы международной научно-технической юбилейной конференции, посвященной 100-летию кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, 21-22 мая 2015 г.* / отв. ред. С.М. Матвеев; ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова. Воронеж: Типография "Кварта", 2015. С. 149.
6. Попиков П.И., Евсикова Н.Ю., Камалова Н.С., Полянин В.С. Системный подход к проблеме обоснования модернизации лесозаготовительных машин // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции*. Воронеж, 2015. № 2. Ч. 2 (13-2). С. 296.
7. Евсикова Н. Ю. Поляризационные явления в высокомолекулярных биокompозитах в неоднородном температурном поле. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2012. 102 с.
8. Matveev N.N., Rychkov A.A., Kamalova N.S., Evsikova N.Yu. The possible mechanism for the water transport in the tree trunks in early spring // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 226. 012047. doi 10.1088/1755-1315/226/1/012047.

УДК 339.97:656.02

**РЕСУРСООЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ ЦЕПИ ПОСТАВКИ ТОВАРОВ КАК БАЗОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА  
ТАМОЖЕННЫХ ОРГАНОВ  
RESOURCE-EFFICIENT TECHNOLOGIES FOR THE FORMATION OF THE  
INTERNATIONAL SUPPLY CHAIN OF GOODS AS A BASIC ELEMENT OF  
IMPROVING THE RESOURCE POTENTIAL OF CUSTOMS AUTHORITIES**

**Андрей Игоревич Мохов\*, Елена Роальдовна Орлова\*\*, Павел Андреевич Третьяков\*\*\*  
Andrey I. Mokhov\*, Elena R. Orlova\*\*, Pavel A. Tretyakov\*\*\***

*\*Некоммерческое партнерство «ЭнергоЭффект», Россия, Москва  
\*Unkommercial partnership “EnergoEffect”, Russia, Moscow  
(e-mail: anmokhov@mail.ru)*

*\*\*Институт системного анализа Российской академии наук, Россия, Москва  
Institute of system analysis of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow  
(e-mail: orlova@isa.ru)*

*\*\*\*Российская таможенная академия, Россия, Люберцы, Московская область  
Russian customs Academy, Russia, Lyubertsy, Moscow region  
(e-mail: polimmi@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрены ресурсосберегающие технологии формирования международной цепи поставки товаров, основанные на обеспечении экологической безопасности процесса перевозки в части уменьшения углеродного следа и рационального использования видов транспорта в мультимодальных перевозках. Применение данных технологий позволяет повысить уровень реализации таможенных услуг в сопровождении перевозки, содействовать совершенствованию ресурсного потенциала таможенных органов.

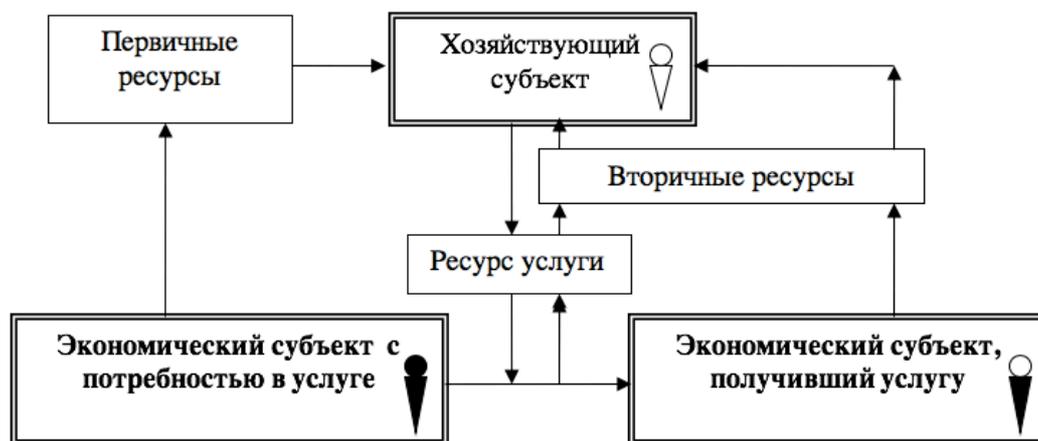
*Abstract:* Resource-saving technologies of formation of the international supply chain of goods based on ensuring environmental safety of the transportation process in carbon footprint reduction and rational use of transport modes in multimodal transportation are considered. The use of these technologies allows to increase the level of implementation of customs services accompanied by transportation, to contribute to the improvement of the resource potential of customs authorities.

*Ключевые слова:* ресурсный потенциал, ресурсоэффективные технологии, таможенные услуги, экологически безопасные технологии.

*Keywords:* resource potential, resource-efficient technologies, customs services, environmentally friendly technologies.

Применение энергоресурсоэффективных технологий призвано качественно изменить традиционную экономику в части повышения ресурсных возможностей хозяйствующих субъектов. К ресурсным возможностям хозяйствующих субъектов традиционно относят всё то, что может быть использовано ими для достижения своих целей. При этом, хозяйствующий субъект удовлетворяет собственные потребности и потребности других экономических субъектов, находящихся во внешней, по отношению к этому субъекту, среде. Объектом исследования в нашей работе являются виды сервисной деятельности, в реализации которых задействованы ресурсосберегающие технологии, ориентированные на совершенствование ресурсного потенциала хозяйствующего субъекта.

Сервисное функционирование хозяйствующего субъекта может быть представлено **инфографической** моделью, представленной на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Инфографическая модель осуществления услуги хозяйствующим субъектом.**

Представленная на рисунке 1 модель включает элемент реализации деятельности экономического субъекта, описывающий его переход из позиции «потребности в услуге» в позицию «получившего услугу», в которой данная потребность удовлетворена. Этому переходу содействовала услуга хозяйствующего субъекта, оказавшая управляющее воздействие на экономического субъекта в части приведения норм его деятельности в соответствие принятым нормам, обеспечивающим дальнейшее проведение этой деятельности. На рисунке изменение норм деятельности зафиксировано переменной цвета верхней части фигуры от черного к белому. При этом видение условий проведения деятельности, соответствующее рациональному подходу к ее проведению, становится основой принятия решений по ее дальнейшему осуществлению.

Ресурс услуги хозяйствующего субъекта предполагается достаточным для полного удовлетворения потребности экономического субъекта в достижении целей его деятельности и, одновременно, содействовать достижению целей деятельности хозяйствующего субъекта. При этом услуга должна обеспечивать применение ресурсосберегающих технологий для экономического субъекта, чтобы сформировать у него собственное обоснованное целеуказание «что хотеть надо» в процессе получения услуги. Процесс оказания услуги на рисунке показан стрелкой, перпендикулярной стрелке, фиксирующей направление перехода экономического субъекта в позицию «получившего услугу». Все стрелки, направленные к хозяйствующему субъекту, фиксируют ресурсы, формирующие его ресурсный потенциал для оказания услуги.

В настоящее время выделяют три вида сервисной деятельности [2]. Взаимосвязь видов сервисной деятельности может быть представлена в форме таблицы 1.

**Таблица 1 – Схема взаимосвязи видов сервисной деятельности**

	Обеспечение	Сопровождение	Продвижение
Ресурсы	Мощный ресурсный потенциал (Первичные ресурсы)	Обеспеченность ресурсами (Вторичные ресурсы)	Недостаточная обеспеченность ресурсами (Вторичные ресурсы)
Время и место	Перспективное настоящее время	Неопределенное настоящее время	Будущее время
Порядок	Систематично	Малая степень систематичности	Систематично
Нормативность	Регулятивно	Регулятивно	Регулятивно

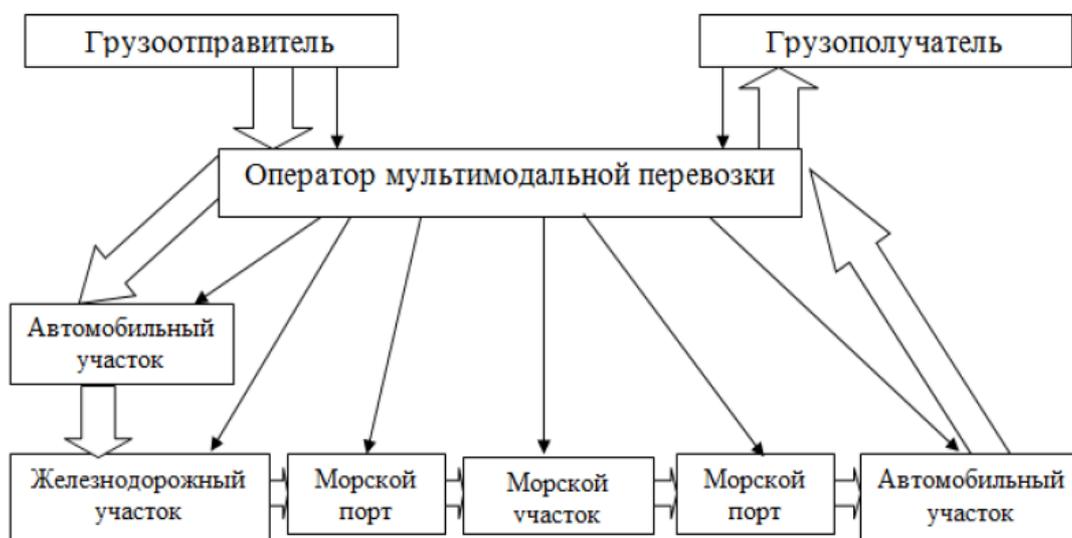
Рассмотрим функционирование модели, приведенной на рисунке 1, на примере оказания таможенных услуг экономическим субъектам, осуществляющим внешнеэкономическую деятельность (ВЭД). В работе [1] к ресурсам таможенных органов отнесены: кадровая составляющая; интеллектуальный компонент; информационно-технологические ресурсы; финансовые ресурсы; структурно-функциональные ресурсы; нормативно-правовая база; временной ресурс. Ресурс услуги по обеспечению ВЭД, являющейся в данном случае базовой практической деятельностью, на сегодняшний день является предметом активного наращивания таможенными органами. Таким образом, из трех видов сервисной деятельности, какими являются обеспечение, сопровождение и продвижение в настоящее время таможенные услуги используются в основном для обеспечения ВЭД. В рамках формирования ресурсного потенциала для реализации этого вида услуг проводятся работы по уменьшению времени совершения таможенных операций, оптимизации проведения таможенного контроля, упрощение таможенного законодательства, внедрение перспективных информационных технологий. Разработка и внедрение подобных ресурсообеспечивающих технологий носит систематичный порядок [например, 3], что связано с формированием первичных ресурсов для осуществления таможенных услуг. В работе [1] под первичными ресурсами понимают те виды ресурсов, которые вносят в настоящее время наибольший вклад в процесс оказания таможенными органами государственных услуг в области таможенного дела. Потенциальные возможности первичных ресурсов таможенных органов характеризуются, прежде всего, увеличением товаропотоков, состоянием государственного потенциала, развитием интеграционных преобразований мирового экономического сообщества, изменением нормативно-правовой базы. Исследование формирования структурно-функциональных ресурсов, определяемых инфраструктурой осуществления как ВЭД, так и таможенной деятельности [например, 4], в настоящее время предполагается продолжить в рамках реализации проекта создания сети центров электронного декларирования. Причем информационно-технологические ресурсы для наполнения таких центров были подготовлены ранее [например, 5]. Кадровая составляющая представляется важной составляющей для совершенствования потенциала таможенных органов, поскольку переводит таможенную деятельность на более высокие нормы ее реализации, формирует соответствующие компетенции работников таможни и обеспечивающих рост ее кадрового ресурса [6].

Вторичные ресурсы в меньшей степени задействованы в настоящее время в формировании ресурсного потенциала таможенных органов. Представляется необходимым, для достижения основных целей развития системы предоставления таможенных услуг, усилить формирующие эти ресурсы две другие формы сервисной деятельности. Заметим, что эти цели включают: повышение уровня удовлетворенности участников ВЭД результатами взаимодействия с таможенными органами; упрощение процедур взаимодействия с таможенными органами; повышение открытости и доступности таможенных услуг для граждан и организаций, участвующих в ВЭД. Для реализации поставленных целей все ресурсоэффективные технологии, реализуемые в ВЭД, должны быть изучены, освоены и включены в профессиональную подготовку работников таможни для уточнения методики оказания традиционных услуг и формирования услуг альтернативных (инновационных).

Рассмотрим энергоресурсосберегающие технологии ВЭД, которые пока не нашли своего места в развитии ресурсного потенциала таможенных органов России. К организации услуг, основанных на данных технологиях, таможня отношения не имеет, но понимание результатов оказания таких услуг могут существенно изменять условия прохождения таможенного контроля. Примером можно считать ресурсосберегающие технологии формирования международной цепи поставки товаров, основанные на обеспечении экологической безопасности процесса перевозки. В международной поставке товаров в настоящее время применяют международные мультимодальные перевозки – технологически взаимосвязанные перевозки грузов с применением более двух видов транспорта «from door to

door» по единому договору транспортировки и по единому сквозному тарифу [7]. Такая схема организации перевозок грузов в международном сообщении представлена на рисунке 2.

Оператор мультимодальной перевозки выполняет ключевую роль при организации и транспортировке грузов. Главная цель всей работы такого оператора заключается в извлечении прибыли от совершенных операций по доставке грузов до места назначения. Главным достоинством мультимодального способа доставки грузов является максимальное использование преимуществ каждого вида транспорта при их грамотном комбинировании. Причем, таможенный пост может находиться на любом отрезке пути перевозки. В частности, если морской участок может проходить по Северному морскому пути (СМП), то это сокращает расстояние между рынками Западной Европы и Тихоокеанского региона на 34% по сравнению с южным маршрутом через Суэцкий канал. При этом перевозчик существенно экономит время и топливо в такой перевозке. А для России СМП может приносить \$5,2 млрд в год.



**Рисунок 2 - Схема организации перевозок грузов в международном сообщении.**

Однако, использование СМП в настоящее время становится проблематичным. С одной стороны, крупнейшая во Франции компания, занимающаяся контейнерными перевозками, CMA CGM Group отказалась пользоваться для доставки своих грузов в Азию Северным морским путем, пролегающим по морям Северного Ледовитого океана, из-за вреда экологии от грузовых судов. К тому же компания призвала восемь других участников коалиции французских судоходных компаний, которые уже работают над переходом на новые, менее загрязняющие виды энергии. С другой стороны, в происшедший в это же время взрыв на полигоне в Северодвинске повлиял на радиационный фон окружающего пространства. И это стало источником для переоценки экологических условий перевозок. Из приведенной ситуации следуют две возможности для таможенной деятельности. В первом случае – это необходимость освоения международной или создания собственной методики расчета углеродного следа с получением компенсации нанесенного экологического вреда от прохода по СМП. Во втором случае – учет при проведении таможенного контроля изменений качества перевозимого товара и/или затрат на дезактивацию контейнеров при составлении таможенной декларации.

В заключение статьи следует отметить, что все возникающие в ВЭД ресурсоэффективные технологии при их освоении в таможенной деятельности приводят к совершенствованию ресурсного потенциала таможенных органов. При этом таможенная деятельность переходит к более высоким нормам своей реализации, формирующим соответствующие компетенции работников таможни и обеспечивающим рост кадрового ресурса.

**Выводы.** Проведено исследование основных направлений формирования международной цепи поставки товаров, основанных на применении ресурсоэффективных технологий и обеспечивающих экологическую безопасность процесса перевозки (уменьшение углеродного следа) и рациональное использование видов транспорта (мультимодальные перевозки). Показано, что использование таких технологий позволяет не только сократить затраты на перемещение груза в рамках ВЭД, но и приводит к повышению уровня реализации таможенных услуг в процессе сопровождения международной перевозки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенова Н.А. Ресурсный потенциал таможенных органов: понятие и факторы, влияющие на его совершенствование. // Экономика и предпринимательство. 2013.
2. Саруль Е.А. Коммуникативное обеспечение производственной кооперации на предприятиях. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2017. 97с.
3. Мохов А.И., Козьменко А.В. Совершенствование таможенного контроля товаров, подлежащих обязательному подтверждению соответствия, в свете разработки технических регламентов // Глобальная безопасность. 2005. №2. С.62-63.
4. Орлова Е.Р., Мохов А.И., Филичева Е.В. Инфраструктурные проекты аэрополисов в России // Вестник Государственного Университета Управления: сер. Развитие отраслевого и регионального управления. 2008. № 16(26). С.160-163.
5. Мохов А.И., Козьменко А.В. О выявлении поддельных, аннулированных, приостановленных сертификатов соответствия при таможенном оформлении и контроле ввозимых товаров // Сертификация. 2006. №1. С.34-37.
6. Васильев С.И. Повышение эффективности труда работников таможенных служб на основе управления их профессиональным развитием. // Этносоциум и межнациональная культура. 2015. № 11 (89). 71-77 с.
7. Беспалов Р.С. Транспортная логистика. Новейшие технологии построения системы доставки. СПб.: Вершина, 2016. 352с.

УДК 66.074.51

### ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА АМИНОВОЙ СЕРООЧИСТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВЫХ КОМБИНАЦИИ РАСТВОРОВ OPTIMIZATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICES OF THE PROCESS OF AMINE CLEANING WITH APPLICATION OF NEW COMBINATIONS OF SOLUTIONS

**Фазлиддин Садриддин угли Исмоилов\*, Аваз Мамуржанович Рахаталиев\*,  
Азиз Алишерович Рахмонов\*\*, Мухаммад Анварович Абдурахимов \*  
Fazliddin S. Ismoilov\*, Avaz M. Rakhataliev\*, Aziz A. Rakhmonov\*\*,  
Muhammad A. Abdurakhimov\***

*\*Акционерное общество «O'ZLITINEFTGAZ» — отраслевой головной научно-исследовательский и проектный институт Узбекистана, Узбекистан, Ташкент*

*\*Joint Stock Company "O'ZLITINEFTGAZ" - branch head research and design institute of oil and gas industry of Uzbekistan, Uzbekistan, Tashkent  
(e-mail: optg@liting.uz)*

*\*\*Акционерное общество «Узнефтегаздобыча», Узбекистан, Ташкент  
\*\*Joint Stock Company "Uzneftegazdobycha", Uzbekistan, Tashkent*

**Аннотация:** Изучены новые комбинации поглотителей на основе существующих доступных химических реагентов для повышения эффективности процесса сероочистки. Определены оптимальные соотношения аминовых реагентов в общем объеме поглощающих растворов и выведены сравнительные результаты для каждой комбинации раствора.

*Abstract:* Studied new combinations of absorbents based on existing available chemicals to increase the efficiency of the desulfurization process. The optimal ratio of amine reagents in the total volume of the absorbing solutions was determined and comparative results for each combination of the solution were derived.

*Ключевые слова:* природный газ, абсорбция, аминовая очистка, комбинирование, сероводород, кислые газы, регенерация, эффективность, моделирование.

*Keywords:* natural gas, absorption, amine treatment, combine, hydrogen sulfide, acid gases, regeneration, efficiency, modeling.

Нефтяные и природные газы наряду с углеводородами могут содержать кислые компоненты—диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) и сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ), меркаптаны ( $\text{RSH}$ ) другие примеси, которые осложняют при определенных условиях транспортирование и использование газов.

Для предотвращения возможного появления осложнений при транспортировке и при последующем его использовании необходимо разработать план мероприятий, направленных на достижение установленных нормами показателей по содержанию кислых компонентов в природном газе. С учетом этого, при выборе процессов очистки газов основным критерием выбора между технологиями и поглотителями рассматривается возможность достижения заданной глубины извлечения «кислых» компонентов и использования их для производства соответствующих товарных продуктов. В промышленности применяют большое число методов, каждый из которых имеет свою область применения, в принципе, более благоприятную или даже характерную.

Обычно различают четыре следующих основных случая [1]:

- извлечение  $\text{CO}_2$ ,
- извлечение  $\text{H}_2\text{S}$ ,
- извлечение  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$ ,
- избирательное извлечение  $\text{H}_2\text{S}$  (в присутствии  $\text{CO}_2$ ).

В свою очередь, для извлечения кислых компонентов используют разные методы и технологии, которые различаются по средствам очистки (поглотитель), степени извлечения кислых компонентов и объемами перерабатываемого сырья.

В настоящее время для очистки природного газа от  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$  используют следующие процессы:

- хемосорбционные процессы, основанные на химическом взаимодействии  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$  с активной частью абсорбента;
- процессы физической абсорбции, в которых извлечение кислых компонентов происходит за счет их растворимости в органических поглотителях;
- комбинированные процессы, использующие одновременно химические и физические поглотители;
- окислительные процессы, основанные на необратимом превращении поглощенного сероводорода в серу;
- очистка природного газа от сероводорода может производиться и с использованием адсорбционных процессов, основанных на извлечении компонентов газа твердыми поглотителями — адсорбентами [2].
- очистка от кислых компонентов с применением мембранных установок.

В ходе проведения исследований, целью которых было повышение эффективности процесса очистки газа от кислых компонентов, были разработаны математические модели технологических процессов для выполнения расчетов и определения оптимальных условий и баланса процесса сероочистки. Для проведения расчетов за основу были взяты физико-химические параметры сырья, поступающего на Головные сооружения (ГС) «Шуртан» и технологические параметры существующей установки аминовой сероочистки АСО-2.

Для сравнения результатов исследований и анализов фактические параметры установки АСО-2 были приняты как базовый вариант. Расчеты проводились с целью

определения оптимального фракционного состава аминного раствора, содержащего метилдиэтаноламин (МДЭА) и диэтаноламин (ДЭА).

В расчетах применялись различные соотношения МДЭА и ДЭА, при которых достигаются нормативно-качественные характеристики природного газа.

На рисунках 1 и 2 приведены аналитические результаты проведенных расчетов, показывающие зависимость массового расхода растворов амина для достижения нормативных значений по содержанию кислых компонентов от соотношения аминных реагентов в конечном растворе, а также экономические аспекты реализации каждого рассматриваемого варианта.

Результаты расчетов показали что, для определенных растворов амина существуют свои диапазоны применения, в котором проявляются их технологические и качественные показатели. Но показатели индивидуальных растворов амина не всегда позволяют достичь нормативных значений по качеству продукции, а также данные показатели не позволяют маневрировать в сторону быстро меняющихся требований к качеству готовой продукции, при этом сохраняя основные технико-экономические показатели производственного процесса.

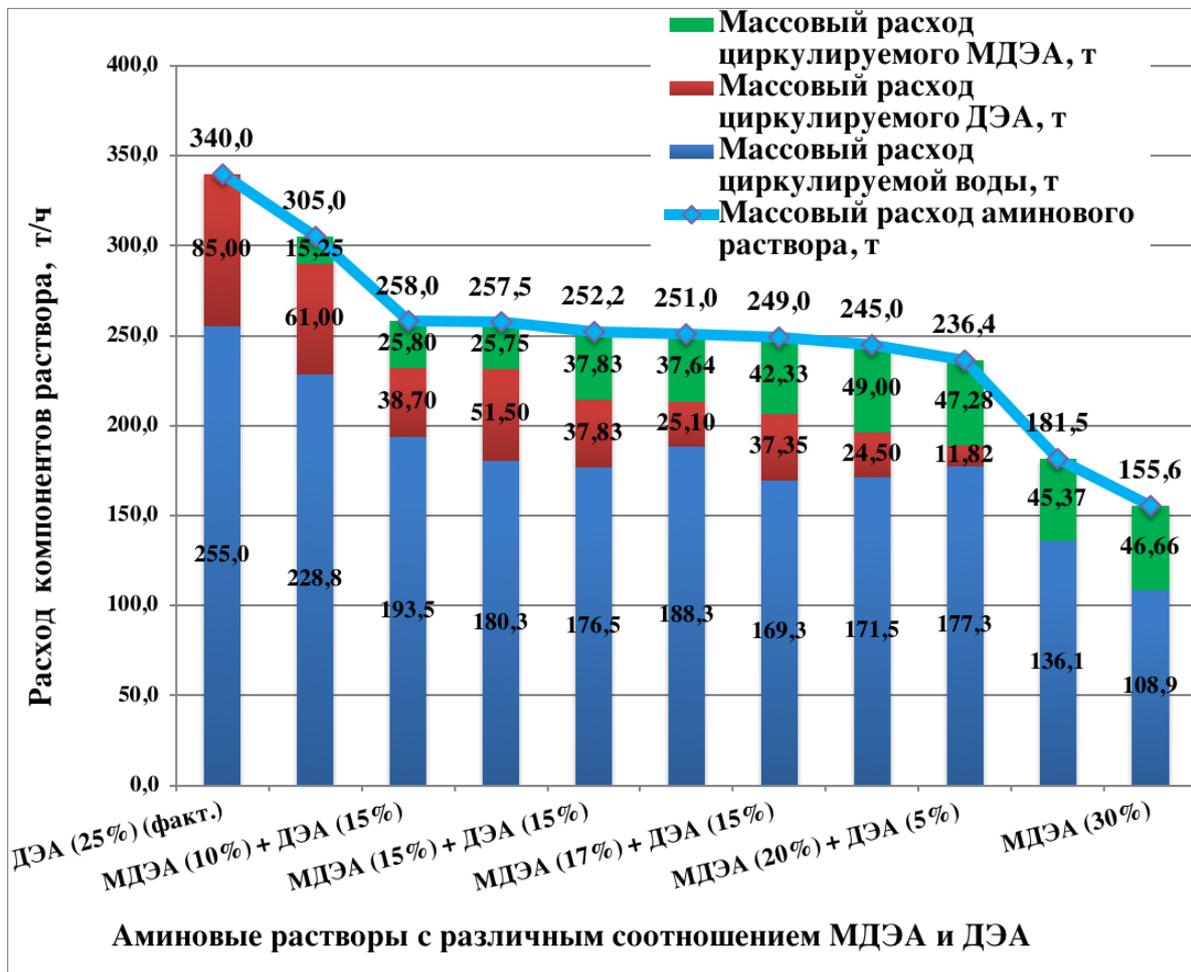


Рисунок 1 – Массовый расход аминных растворов с разными соотношениями аминных реагентов для достижения нормативных значений по содержанию кислых компонентов

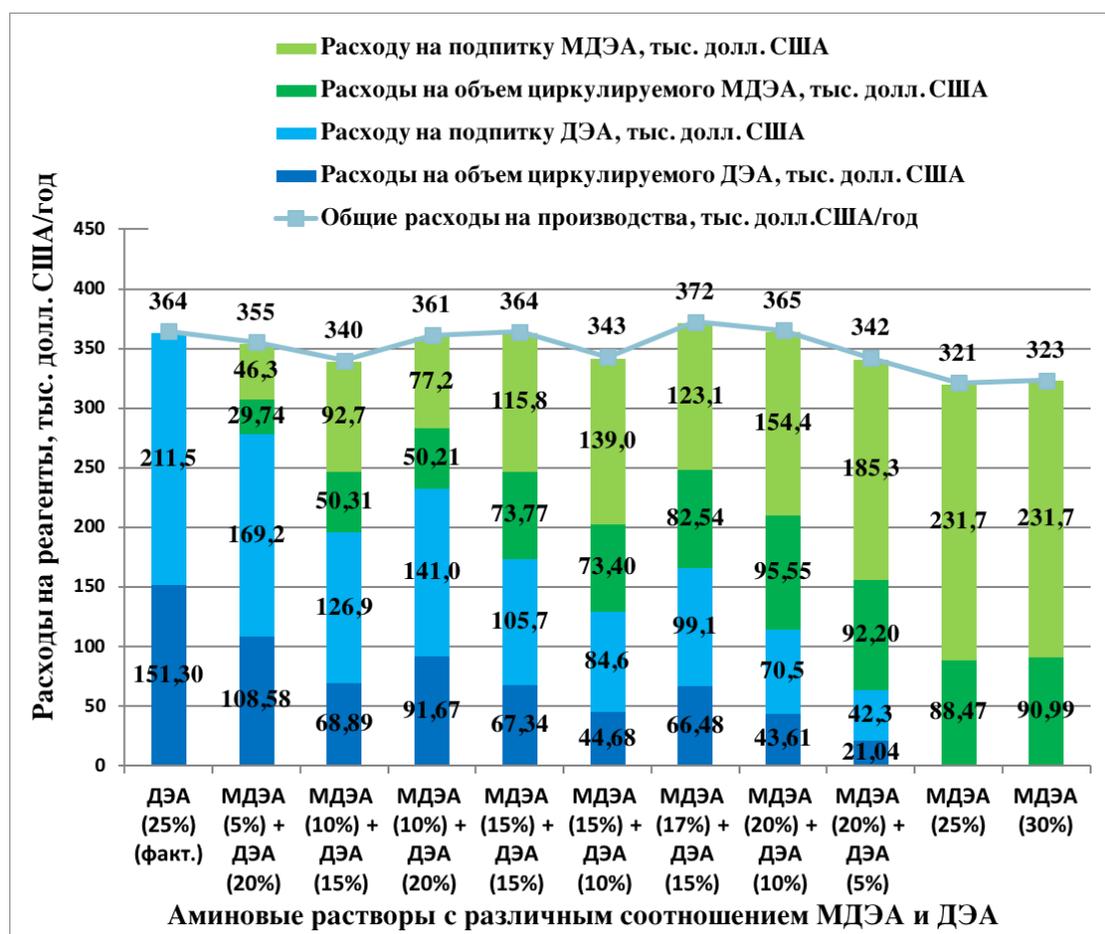


Рисунок 2 – Сравнение эксплуатационных расходов на растворы с разными соотношениями аминовых реагентов

### Выводы

Исходя из результатов технологических расчетов, которые свидетельствуют о том, что существует возможность повышения эффективности процесса очистки газа установки АСО-2 ГС «Шуртан» за счет применения комбинированных аминовых растворов на основе МДЭА+ДЭА с различными соотношениями. Выбор варианта реализации по применению комбинированных растворов зависит от технико-экономических возможностей предприятий, так как во всех вариациях достигаются нормативные значения по качеству газа.

В свою очередь использование комбинированных аминовых растворов возможно с наименьшими затратами и не требует изменений технологического процесса[3].

С учетом вышеизложенного наиболее эффективными вариациями применения аминовых растворов является комбинирование разных аминовых растворов с целью обобщения их поглощающих свойств для достижения установленных требований к качеству продукции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oi L.E. Optimization of configurations for amine based CO<sub>2</sub> absorption using Aspen HYSYS, L. E. Oi, T. Brathen, C. Berg, S.K. Brekne, M. Flatin, Energy Procedia. 2014, No 51. pp. 224-233.
2. ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. 4-е изд. Пер. с франц., Э.68 Ред. пер. К.С. Басниев.-М.: АО «ТВАНТ»,1994.-684 с: нл
3. Nasir M.A. Optimization and performance improvement of Lekhwair natural gas sweetening plant using Aspen HYSYS/ M. A. Nasir, Al-Habsi Sultan, A. O. Sagheer// Journal of Natural Gas Science and Engineering -2015, No 26

УДК 66.011

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА МОЮЩИХ СРЕДСТВ  
SIMULATION MODELING OF THE CHEMICAL ENGINEERING PROCESS OF  
DETERGENT INDUSTRY**

**Олег Иванович Седяров, Егор Владимирович Отрубянников,  
Анна Павловна Полиэфтова  
Oleg I. Sedlyarov, Egor V. Otrubyannikov Anna P. Polieftova**

*Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва  
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow  
(e-mail: annapolieftova@gmail.com)*

*Аннотация:* рассмотрены некоторые особенности имитационного моделирования химико-технологического процесса производства моющих средств, приведены параметры моделирования.

*Abstract:* some features of simulation modeling of the chemical engineering process of detergent industry are considered, the value of process is given.

*Ключевые слова:* имитационное моделирование, химико-технологического процесс.

*Keywords:* simulation modeling, chemical engineering process.

Современные темпы экономического развития обуславливают необходимость сокращения расходуемых ресурсов и времени производства. Концепция индустрии версии 4.0 подразумевает создание для производственных предприятий моделей реального времени и цифровых двойников [1]. Данные модели должны позволить более глубоко понять процессы производства в целях оптимизации, а так же более эффективно проводить оценку рисков. В данных условиях базовым инструментом для создания такого рода моделей становится имитационное моделирование, которое позволяет быстро воссоздать компьютерную модель системы, безопасно проводить исследование и анализ, при этом уменьшая затраты на экспериментальную деятельность до минимума.

Используя метод имитационного моделирования можно легко исследовать даже самые сложные системы [2]. Уровень детализации определяется создателем модели и может быть адаптирован под конкретные потребности исследования, что позволяет более рационально использовать вычислительные ресурсы и использовать различный уровень абстракции для каждого из процессов. В частности в единой модели могут сочетаться дискретные и непрерывные элементы, случайные события и аналитические зависимости, и прочие сложно сочетаемые элементы.

В рамках решения поставленной задачи была создана имитационная модель химико-технологических процессов. Выполнено описание технологического процесса производства моющих средств в общем виде для данного вида производства. В реактор-смеситель компоненты моющего средства подаются вручную персоналом предприятия, что делает часть процессов периодичными. В зависимости от расположения компонентов, которые входят в состав моющего средства, занятости персонала и места расположения смесителей, меняется время загрузки компонентов. В рамках создания модели реализована схема расположения оборудования на предприятии.

Единицы оборудования формализованы как стандартные агенты, в сочетании которых может быть смоделирован любой из выполняемых на производстве технологических процессов. В общем случае смеситель реализуется как реактор идеального смешения периодического действия, материальный баланс которого имеет вид:

$$r_i = \frac{\partial C_i}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где  $C$  — концентрация вещества,  $\tau$  — время,  $r_i$  — скорость химической реакции, характеризующая изменение концентрации исходного вещества в принятом объёме [3].

Время нахождения в реакторе, полученное вышеуказанным способом, в данном случае является временем смешения, но в рамках модели так же может быть получено из статистических данных. Полученное время дополняется временем необходимым для загрузки реагентов и выход реактора на технологический режим.

В модели учитываются материальные технологические потери, связанные с выгрузкой вещества из реактора в резервуар для отстаивания, а так же потери связанные с фасовкой по потребительским тарам. Статистическим способом определена часть объема готового продукта, которая остаётся на стенках труб, резервуаров и реакторов

Сформированы зоны ответственности для персонала. Собрана статистика по времени обслуживания оборудования.

В большинстве рецептов загрузка компонентов проходит в несколько стадий, при этом после каждой загрузки происходит перемешивание. Модель учитывает значения занятости реакторов и контролирует свободный персонал в каждый момент времени. В рамках модели учитывается время задержки на загущение или разбавление при возможном отклонении показателя вязкости от нормы.

Процессы фасовки и упаковки готового изделия выполняется автоматически, что отражено в модели. Транспортировка пустых и наполненных бутылок осуществляется по конвейеру. Модель контролирует объем приготовленного продукта, количество наполненных бутылок и заполненных коробок.

Предложенная модель, реализованная на базе программного обеспечения «AnyLogic», позволяет подключать базы данных, для выполнения расчетов основываясь на известных статистических данных, создавать любые дополнительные технологические процессы реализуемые сочетанием созданных агентов, оценивать визуально и статистически производственные процессы.

С помощью реализованной имитационной модели выполнена оценка загруженности персонала в рамках различных вариантов производственного процесса. При использовании одного реактора-смесителя на 500 литров загруженность обслуживающего персонала варьировалась в пределах от 31 до 73%. При использовании двух смесителей равного объёма 500 литров загруженность закрепленного персонала находилась в пределах от 48 до 92%. При использовании смесителя объёмом 1000 литров загруженность персонала находилась в пределах от 28 до 68%. При использовании в процессе двух различных по объёму смесителей на 500 литров и смесителя на 1000 литров загруженность закрепленного персонала находилась в пределах от 44 до 93%. При использовании в технологическом процессе всех трех смесителей загруженность рабочих находилась в пределах от 60 до 96%.

Полученная модель позволила сравнить средние показатели загруженности персонала по различным видам рецептов и сформировать оптимальные зоны ответственности персонала. Сделаны выводы об эффективности различных подходов к реализации процесса, в частности выявлены возможности в оптимизации потерь за счет изменения технологической карты процесса для ряда рецептов. Реализована схема оптимальной загрузки оборудования, учитывающая возможность параллельного производства ряда рецептов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kagermann, H., W. Wahlster and J. Helbig, eds., 2013: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group
2. Акопов А. С., Имитационное моделирование: учебник и практикум/ А. С. Акопов. - М: Изд-во Юрайт, 2014
3. Воронцов К.Б., Химические реакторы: учебное пособие / Воронцов К. Б. - Москва : Эдитус, 2017

## СЕКЦИЯ 5. «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРЕПОДАВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ДИСЦИПЛИН В ТЕХНИЧЕСКИХ УНИВЕРСИТЕТАХ»

УДК 378.1

### ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В КОНТЕКСТЕ МАГИСТЕРСКОЙ ПОДГОТОВКИ ENGINEERING EDUCATION IN THE CONTEXT OF MASTER'S DEGREE

**Елена Сергеевна Бокова, Сергей Геннадьевич Дембицкий,  
Наталья Викторовна Евсюкова  
Elena S. Bokova, Sergey G. Dembitskiy, Nataliy V. Evsuykova**

*Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва  
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow  
(e-mail: ommgudt@yandex.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрено состояние высшего инженерного образования в современных условиях. Проанализированы новые тенденции в формировании инженерного мышления, показана необходимость внедрения новой компетентностной парадигмы высшего инженерного образования в России в соответствии с Болонским процессом. Определена роль магистратуры в инженерном образовании.

*Abstract:* Position of higher engineering education in modern conditions is observed. New tendencies in the engineering thinking formation are analyzed, need of introducing of a new higher engineering education competence paradigm in Russia in accordance with the Bologna process is shown. Magistracy's part in TQ engineering education is determined.

*Ключевые слова:* высшее образование, магистратура, новые тенденции в образовании, компетентный подход.

*Key words:* higher education, master's degree, new trends in education, competent approach

История государственного инженерного образования в России, насчитывающая более трех веков, долгое время являлась безальтернативной основой подготовки технических кадров высшей квалификации. Несмотря на тяжелейшие годы революции, Гражданской и Великой отечественной войн, трудные послевоенные периоды разрухи, российская научная инженерная школа успешно развивалась, что не раз доказывалось стремительным рывком инфраструктурного и экономического развития государства в 19, начале и середине 20 веков.

Можно сказать, что бывший Советский Союз получил в наследство от Российской империи сильную и сбалансированную, хорошо оснащенную фондами систему технического образования, поддержка и развитие которой базировалось, как правило, не на нововведениях, а на сохранении исторических образовательных традиций при определенном расширении «социальной базы» образования [1].

Согласно классической концепции инженерного образования, инженер – это, прежде всего «специалист», выполняющий в высоко дифференцированном современном хозяйстве определенную квалификационную функцию. Но в современных реалиях быстро развивающейся экономики, постоянных нововведений, всеобщей информатизации, возникновения малых высокотехнологичных мобильных компаний, компетенции инженера вовсе не ограничиваются профессиональными навыками, а требуют исследовательской, организаторской, «командной» и руководящей составляющих, умения работать в мультидисциплинарной среде [2].

К сожалению, в новых реалиях развития России проявились тенденции, свидетельствующие об отходе и профессионального сообщества и властных структур от вековых традиций российского инженерного образования в связи с рядом известных причин,

среди которых переход на уровневую подготовку (бакалавриат, магистратура) в соответствии с принципами Болонской декларации; вступление России в ВТО и конкуренция на мировом рынке инженерного труда; резкое снижение престижа инженерного труда и инженерной профессии; отсутствие общих требований к квалификации специалистов в области техники и технологии, профессиональных стандартов, учитывающих переход на уровневую подготовку; рыночные отношения с работодателями; противоречие между прежней системой подготовки инженеров и новыми требованиями к ним со стороны работодателей; стареющая материальная и кадровая база вузов; небольшое количество предприятий, оснащённых современным оборудованием, позволяющих обеспечить качественную практику будущих инженеров и стажировки вузовских преподавателей и др. [3, 4].

Подписанная в 2003 году и полностью утверждённая в 2011 году Болонская система должна была обеспечить конвертируемость российских дипломов и академическую мобильность студентов и преподавателей, востребованность специалистов с высшим образованием как на рынке труда в собственной стране, так и в других странах. Предполагалось, что вхождение РФ в общеевропейскую образовательную зону придаст мощный импульс развитию интеграционных процессов отечественного высшего образования и будет способствовать повышению его качества.

Однако опыт практической деятельности показал, что разница между бакалавром и специалистом гораздо больше, чем год дополнительного обучения, за который в специалитете студент прибавляет в компетентности почти на 40-50 %. Но есть магистратура, где имеется дополнительный год по сравнению со специалитетом.

Существует определенный скептицизм по поводу эффективности магистратуры и ее альтернативы полноценному инженерному образованию, однако все зависит от идеологии и принципов реализации магистерской подготовки.

По мнению экспертов в области технического образования для успешной реализации новой парадигмы современное инженерное образование должно включать следующие составляющие: этико-гуманистический (усиление внимания к проблемам общечеловеческого, социокультурного значения, к анализу моральной ответственности будущих специалистов за последствия своей профессиональной деятельности); философско-методологический (выявление и всестороннее использование философского анализа содержания различных теоретических положений, способов согласования концептуальных структур с физической реальностью, широкое использование активных методов формирования философских основ мировоззрения); интегративно-культурный (основанный на расширении спектра практического использования межпредметных связей на уровне научной и историко-культурной межпредметной синхронизации и межпредметной корреляции); социально-презентативный компонент (предусматривает корреляцию содержания учебных программ с современным уровнем научно-технического знания, политическими, социальными, экономическими реалиями общества на национальном и планетарном уровнях); эколого-деятельностный компонент (направлен на актуализацию внимания к экологическим аспектам будущей профессиональной деятельности, а также развития цивилизации в целом); креативно-развивающий (последующая замена информативных методов обучения концептуально-аналитическими, способствующими переводу студента из объекта обучения в субъект деятельности, что создает условия для творческого самовыражения личности и обеспечивает креативный, творческий уровень образования) [5,6].

Согласно современным образовательным стандартам, магистратура может быть реализована как академическая, или прикладная, или, что наиболее ценно, сочетать научно-исследовательскую и практико-ориентированную направленность. При таком симбиозе внимание уделяется не только доскональному знанию того или иного технологического процесса, но и умению его организовывать и экономически обосновывать, обеспечивать производительность труда и безотходность технологического процесса и др. Все это в совокупности позволяет подготовить студента к работе на производстве, а саму магистратуру превратить в образовательную площадку для подготовки элитных, системно организованных,

коммуникативных, рефлексирующих, кадров, способных обеспечить научно-технологический, социально-экономический прогресс всего общества и функционирование наукоемких производств.

Следование вышеизложенной идеологии не возможно без перехода от линейного принципа построения учебного процесса к разветвленному, где на первый план выходит междисциплинарный подход и, в определенной степени, теряется роль выпускающей кафедры, когда она вместо привычного методически-образовательного центра превращается в центр координации образовательного и научно-исследовательского процесса.

Вторым важнейшим элементом новой образовательной парадигмы является компетентностный подход, для реализации которого в процессе обучения необходимо ориентироваться не только на практическую деятельность выпускника, но и на конкретные компетентностные модели описания профессиональной деятельности, которые формируют не только командный дух в инженерии умение понимать и уважать друг друга, но и дают навыки сквозного проектирования, командных дедлайнов, разделения труда, живой конкуренции [7].

Так, например, конкурентные возможности магистрантов по трудоустройству на современном рынке труда усиливает знание иностранных языков, информационных технологий, современного технологического и компьютерного оборудования, этики делового общения, корпоративной культуры, готовность и умение работать в команде, и нести ответственность за принятые решения. Очевидно, что формирование таких компетенции не возможно только при изучении профессиональных инженерных дисциплин. Для этого нужен комплексный междисциплинарный подход, примером реализации которого является набор курсов, предусмотренный Учебными планами по подготовке магистров в «Российском государственном университете им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)» одинаково значимых для всех направлений магистерской подготовки, не зависимо от профессиональной направленности. К таким дисциплинам Учебного плана относятся Деловой иностранный язык, Этика и психология профессиональной деятельности, Экономический анализ и управление производством, Язык деловых межкультурных коммуникаций, Теория эффективного лидерства и командный менеджмент.

Все вышеперечисленное не возможно без тесного взаимодействия высших учебных заведений и предприятий. Теоретической базой для такого взаимодействия, безусловно, являются новые образовательные стандарты ФГОС ВО 3++, ориентированные на Профессиональные стандарты. Практическая же сторона вопроса их реализации во многом зависит от готовности к коммуникации научного вузовского сообщества и современных производителей. В идеале бизнесмены и производители должны выступать заказчиками образовательных программ, которые рассчитаны на решение конкретных задач по модернизации производств и их научно-технической базы, преподаватели должны перестроиться и быть готовы внедрять свои разработки в производственный процесс, инженеры предприятий активно участвовать в образовательной деятельности по подготовке профессионально-ориентированных кадров [8].

Одной из форм такого взаимодействия может быть концепция дуального образования по подготовке инженерных кадров, которая комбинирует теоретическое обучение в учебном заведении (30-40% учебного времени) и практическое обучение на производственном предприятии (60-70% учебного времени). Для ВУЗа это возможность сделать выпускников и образовательные программы конкурентоспособными, для предприятия возможность подготовить кадры, снизить расходы на поиск, обучение и адаптацию сотрудников. Главным принципом данной системы обучения является равная ответственность ВУЗа и предприятий за качество подготовки специалистов. Важным преимуществом – независимость оценки результатов обучения и подготовки кадров.

В рамках концепции дуального образования особую роль приобретает производственная практика и возможность ее прохождения на реальных предприятиях. Именно во время таких практик инженерные работники формируют у студентов компетенции

связанные с коммуникабельностью, умением принимать решения и нести за них моральную и социальную ответственность [9].

Еще одним решением по интеграции образования науки и производства является «целевой» прием, в рамках которого ВУЗ совместно с работодателем формирует индивидуальную траекторию обучения студента. В данном случае работодателю выгоднее «инвестировать» средства в образование, т.к. в результате он получает работника, хорошо знающего конкретное производство. Студент помимо профессионального опыта получает социальную адаптацию, поскольку проверку своих позиций проходит в режиме «реального времени» на действующем предприятии.

### **Выводы**

В работе рассмотрено состояние высшего инженерного образования в современных условиях. Проанализированы новые тенденции в формировании инженерного мышления, показана необходимость внедрения новой компетентностной парадигмы высшего инженерного образования в России в соответствии с Болонским процессом. Определена роль магистратуры в инженерном образовании. Описаны механизмы трансформации новых образовательных стандартов в практико-ориентированную подготовку магистров.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сапрыкин Д.Л. Инженерное образование в России: история, концепция, перспективы // Высшее образование в России. 2012. №1. С. 125-137.
2. Огородова Л.М., Кресс В.М., Похолков Ю.П. Инженерное образование и инженерное дело в России: проблемы и решения // Инженерное образование. 2012. №11. С. 18-23.
3. Интернет ресурс: <https://www.ucheba.ru/article/623>
4. Соловьев В.П., Перескопова Т.А. Техническое образование в России: проблемы, пути решения // Инженерное образование. 2018. №24. С. 30-40.
5. Баранникова Е.Г. Высшее инженерное образование в России в контексте Болонского процесса // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. 2010. № 1 (22). С. 78-82.
6. Ким И.Н. О влиянии Болонского процесса на развитие высшего образования в России // Инженерное образование. 2017. №22. С. 96-100.
7. Байденко В. И. Компетенции в профессиональном образовании (К освоению компетентностного подхода // Высшее образование в России. 2004. № 11(04). С. 3 – 14.
8. Богоудинова Р.З., Казакова У.А. Инженерная педагогика в системе формирования надпрофессиональных компетенций линейного инженера // Инженерное образование. 2018. №24. С. 45-51.
9. Корякин С.И., Полупан К.Л. Инновационные подходы к разработке образовательных программ инженерного профиля // Инженерное образование. 2015. №17. С. 6-12.

УДК 66.011

**ПРИМЕНЕНИЕ НОВЕЙШИХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБУЧЕНИИ  
СТУДЕНТОВ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ В  
РХТУ ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА  
APPLICATION OF LATEST COMPUTER TECHNOLOGIES IN STUDENTS'  
EDUCATION IN CHEMICAL TECHNOLOGY DISCIPLINES MENDELEEV  
UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY OF RUSSIA**

**Елена Павловна Моргунова, Мария Григорьевна Давидханова, Томаш Николаевич  
Гартман, Владимир Николаевич Грунский, Леонид Владимирович Равичев  
Elena P. Morgunova, Mariya G. Davidkhanova, Tomasz N. Gartman, Vladimir. N. Grunsky,  
Leonid V. Ravichev**

*Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, Москва  
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russia, Moscow  
(e-mail: morgun@muctr.ru)*

*Аннотация:* Процесс обучения студентов химико-технологическим дисциплинам в обязательном порядке должен включать использование компьютерных технологий при решении задач, рассматриваемых в изучаемых курсах. На примере кафедр факультета Инженерной химии (ФИХ) РХТУ им. Д.И. Менделеева представлен опыт использования пакетов компьютерных программ в учебном процессе.

*Abstract:* The process of teaching students to disciplines of chemical technology must include the use of computer technology in solving of the problems considered in the courses under study. On the example of the departments of the Faculty of Engineering Chemistry (FIH) of the Mendeleev University of Chemical Technology of Russia presented the experience of using software packages in the educational process.

*Ключевые слова:* инженерные дисциплины, химико-технологическое образование, компьютерные технологии, пакеты прикладных программ..

*Keywords:* engineering disciplines, chemical technology education, computer technology, application packages.

Современный подход к разработке и модернизации химико-технологических процессов предполагает широкое применение пакетов компьютерных программ, которые позволяют решать обширный спектр задач – исследования этих процессов, их усовершенствования и проектирования. К таким программным пакетам, в частности относятся как коммерческие пакеты для графического представления химических производств (например, КОМПАС, AUTOCAD), так и коммерческие пакеты для моделирования, оптимизации и синтеза химико-технологических процессов (например, CHEMCAD, HYSYS, ASPEN, PRO-II). В связи с этим процесс обучения студентов химико-технологическим дисциплинам в обязательном порядке должен включать использование компьютерных технологий при решении задач, рассматриваемых в изучаемых курсах.

Осуществление поставленных задач связано с решением целого комплекса организационных, материально-технических и учебно-методических задач, к которым относятся:

- обеспечение эффективной системы повышения квалификации преподавателей в области новейших компьютерных технологий;

- коррекция учебных программ курсов таким образом, чтобы ко времени изучения конкретной химико-технологической дисциплины студент был готов к применению компьютерных технологий, т.е. усвоил такие курсы, как информатика, вычислительная математика, компьютерная графика, моделирование и оптимизация;

- переработка программ курсов с учетом использования компьютерных технологий, в частности необходимо расширить разделы дисциплин с учетом того, что в связи с применением новейших ресурсов информатики и вычислительной техники появляется возможность изучать их более современные теоретические и практические аспекты;

- коррекция и разработка новых лабораторных практикумов с учетом выполнения работ с применением новейших компьютерных технологий;

- оснащение лабораторий современными компьютерами и программными обеспечением для выполнения лабораторного практикума;

В РХТУ им. Д.И. Менделеева общие проблемы при решении этих задач как для общих так и для выпускающих кафедр связаны с материально-техническим обеспечением, отсутствием требуемой квалификации преподавателей, отсутствием должной готовности студентов к освоению информации как в конкретной предметной области, так и в области компьютерных технологий. Кафедры стремятся решить указанные проблемы путем привлечения к учебному процессу молодых преподавателей, аспирантов и магистрантов, успешно владеющих компьютерными технологиями, и на основе сотрудничества с инжиниринговыми, проектными и исследовательскими организациями.

Обеспечение высоких показателей ресурсосбережения на химических производствах имеет важнейшее значение в химической технологии. Крупнотоннажные производства нефтехимического комплекса, использующие в качестве сырья и топливно-энергетических ресурсов большие объемы нефти и природного газа, а также попутного нефтяного газа представляют собой сложные непрерывные энерго- и ресурсоемкие химико-технологические системы. Для подготовки исходных данных для проектирования указанных производств требуется применение специальных подходов, а также процедур и алгоритмов компьютерного моделирования химических реакторов с гетерогенно-каталитическими реакциями в газовой фазе. Наиболее быстрое и эффективное решение перечисленных задач может быть получено при выполнении следующих условий: корректная инженерно-технологическая постановка исходной задачи анализа всех процессов химического производства; разработка специальных подходов, процедур и алгоритмов компьютерного моделирования химических реакторов и химико-технологических систем для компьютерного анализа различных вариантов технологического и конструкционного оформления химико-технологических процессов и систем.

В настоящее время для решения указанных задач компьютерного моделирования химических реакторов и сложных химико-технологических систем широко используются пакеты моделирующих программ (ПМП) Aspen, Hysys, PRO-II и CHEMCAD, которые позволяют быстро и надежно создавать компьютерные модели как отдельных процессов, так и сложных химических производств в целом. С помощью этих пакетов программ решаются задачи анализа и оптимизации действующих производств, а также задачи синтеза энерго- и ресурсосберегающих технологических схем новых проектируемых производств.

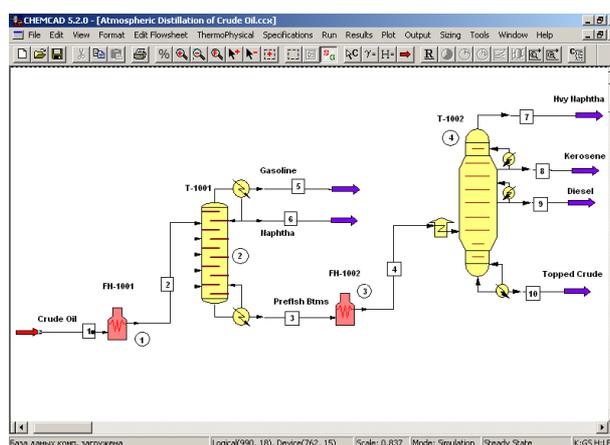
Однако применение вышеперечисленных пакетов программ не позволяет решать целый ряд задач компьютерного моделирования химических производств, как например, задачи нахождения кинетических констант гомо- и гетерогенно-каталитических реакций в жидкой и газовой фазе, процессы в сушильных аппаратах, кристаллизаторах различных конструкций и т.п. Для решения таких задач необходимо использовать пакеты компьютерной математики (ПКМ) – MATLAB, MATCAD, MAPLE и GAMS, а также разрабатывать процедуры интеграции модулей из ПКМ в ПМП для расчета конкретных процессов химической технологии.

В связи с этим разработка и использование совместных подходов применения СКМ и ПМП является актуальной научной задачей, решение которой имеет важное значение в химической технологии для повышения энерго- и ресурсоэффективности действующих производств и проектирования новых технологических схем.

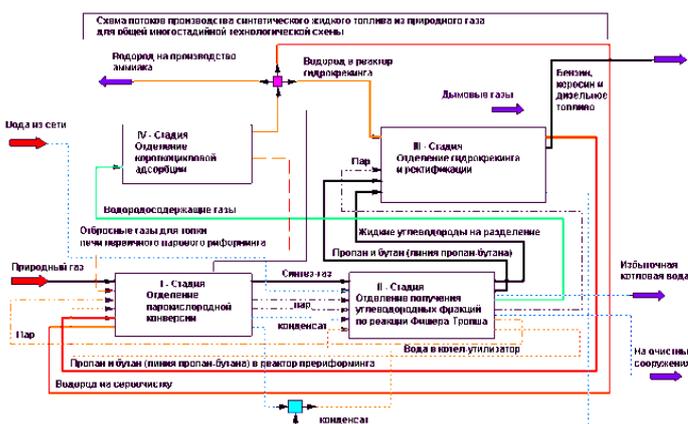
Задача разработки специальных подходов, а также процедур и алгоритмов компьютерного моделирования сложных химических процессов с гетерогенно-

каталитическими реакциями в жидкой и газовой фазе для последующего включения данных моделей в модели химико-технологических систем с совместным применением ПКМ и ПМП относится к классу наиболее трудоемких задач, так как при их решении необходимо, прежде всего, осуществлять приобретение и переработку знаний о функционировании каждого химико-технологического процесса и производства в целом.

Поэтому на кафедре информатики и компьютерного моделирования РХТУ им. Д.И. Менделеева и разрабатываются разнообразные специальные процедуры интеграции модулей ПКМ в ПМП с целью решения всевозможных практических задач проектирования и модернизации химических производств (рисунок 1).



а)



б)

а) Пакет моделирующих программ ХЕМКАД – для анализа, оптимизации и синтеза нефтеперерабатывающих производств (разделение нефти); б) Расчёт и оптимизация многостадийных технологических схем с большим числом единиц оборудования (Производство синтетического жидкого топлива).

**Рисунок 1 – Примеры использования моделирующих программ**

На кафедре процессов и аппаратов химической технологии РХТУ им. Д. И. Менделеева создан многофункциональный лабораторный комплекс с автоматизированным сбором информации для проведения экспериментов по гидродинамике одно- и двухфазных потоков (рисунок 2).

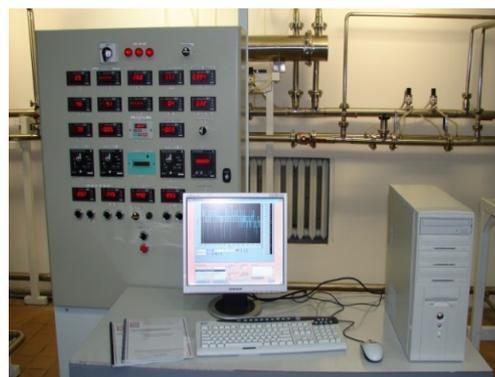
Комплекс представляет собой технологическую систему, включающую замкнутый жидкостной и газовый контуры. В качестве рабочих сред используются вода и воздух. Жидкостной контур включает в себя центробежный насос, кожухотрубный теплообменник, колонну с ситчатыми тарелками и прямой участок трубопровода с регулирующей и измерительной аппаратурой. Газовый контур состоит из компрессора, патронного фильтра и измерительных устройств. С помощью контроллеров управляющая и измерительная системы комплекса соединены с компьютером, специальная программа которого позволяет автоматически получать и обрабатывать данные экспериментов в реальном времени в виде графиков таблиц и диаграмм.

Каждому реальному аппарату, прибору, измерительному устройству в технологической системе поставлен в соответствие виртуальный аналог в программной среде LabVIEW. Эта программная среда и используемые измерители-регуляторы дают возможность управлять экспериментом с помощью компьютера, задавать все необходимые параметры процессов. Например, задавая значение расхода воздуха в колонне, система может автоматически посылать управляющее воздействие на исполнительный механизм затвора и контролировать этот параметр по величине гидродинамического сопротивления. Кроме того, можно создать полностью автоматическую систему которая будет регистрировать значения

параметров процесса, сравнивать их с заданными пользователем и посылать соответствующие воздействия.



а)



б)

а) Многофункциональный гидродинамический комплекс с автоматизированным сбором информации; б) Внешний вид пульта управления.

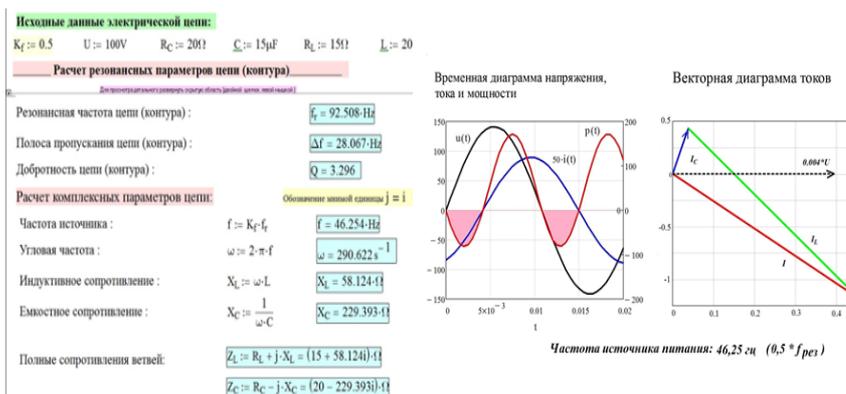
**Рисунок 2 – Учебная лаборатория кафедры процессов и аппаратов химической технологии**

Гибкость и многофункциональность гидродинамического комплекса в сочетании с программной средой Lab VIEW позволяет с легкостью выполнять множество операций. Основным достоинством разработанного комплекса является возможность простого и наглядного наблюдения за ходом гидродинамического процесса, детального знакомства с устройством узлов и аппаратов схемы, автоматизированного сбора данных и анализа результатов, что является разумным сочетанием реальной и виртуальной составляющей в процессе подготовки химика-технолога.

При изучении электрических цепей в лабораторном практикуме по курсу «Электротехника и электроника» используется экспериментальный и расчетный методы (рисунок 3).

### Содержание лабораторной работы

1. Постановка задачи, разбор контрольного примера электрической цепи
2. Имитационное моделирование схемы в среде MultiSim.
3. Математическое моделирование схемы в среде MathCad или MatLab или Excel
4. Исследование схемы в среде имитационного и математического моделирования.
5. Формирование отчета в электронном виде (безусловно) и в печатном виде (по согласованию).



**Рисунок 3 – Содержание и этапы выполнения лабораторной работы**

В расчетном методе вычисление основных параметров различных режимов электрических цепей производится на компьютере в любой среде, например: MathCad, MultiSim и других. MultiSim является узкоспециализированной системой моделирования процессов в электрических цепях, основным достоинством которой является высокий уровень автоматизации при моделировании: автоматическое решение систем уравнений, автоматическая подсистема сбора и хранения результатов и автоматическая подсистема графического отображения результатов. MathCad универсальная система моделирования, которая позволяет моделировать любые процессы, в том числе и электротехнические. Обе

системы прекрасно дополняют друг друга, углубляя понимание физических основ процессов, позволяя избежать грубых ошибок путем сравнения результатов моделирования.

На научно-методической основе изучения курса «Общая химическая технология» является математическое моделирование химико–технологических процессов, и потому лабораторные работы могут быть представлены как вычислительные эксперименты с целью развития навыков исследования химико-технологических процессов. Лабораторный практикум по курсу «Общая химическая технология» – это пакет прикладных программ «ОХТ\_LAB», специально созданный для учебных целей, в котором каждая программа представляет собой проблемно–ориентированную систему для автоматизации сложных вычислений, содержит краткий учебный материал, методические указания и инструкции для пользователя.

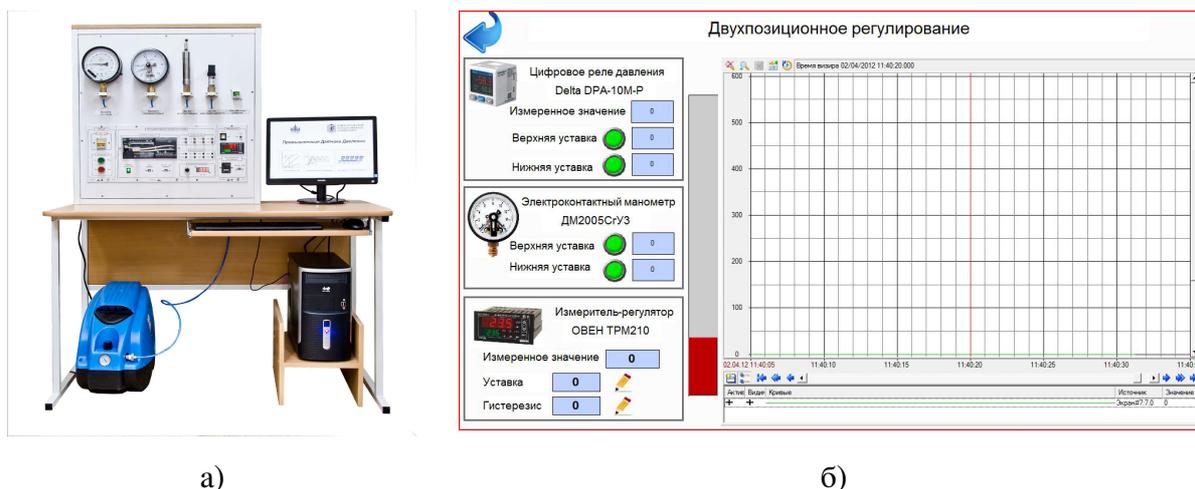
Интеллектуальная нагрузка по постановке задачи и анализу результатов исследования процессов перенесена на пользователя–обучающегося. Работа с программой ведется в диалоговом режиме посредством дружественного интерфейса, включающего панель меню, пояснения по порядку работы с программой и необходимые комментарии. Предусмотрена защита от ошибочных несанкционированных действий, причем обучающийся сам должен определить причину отказа вычислений.

В составе программного комплекса «ОХТ\_LAB» особое место занимает программа LabOХТ-Trener. При работе с этой программой реализуются универсальные компетенции УК–1 (системное и критическое мышление) и УК–2 (разработка и реализация проектов). Обучающийся должен восстановить регламентную работу химико-технологического процесса производства азотной кислоты на основе определения причин, вызвавших нарушение технологического режима, и выбора управляющих воздействий. При этом практически применяются и закрепляются знания, полученные при изучении дисциплин «Общая химическая технология» (ОХТ), «Системы управления химико-технологическими процессами» (СУХТП), «Автоматизированное управление химико-технологическими системами» (АУХТС).

В отличие от лицензионных проприетарных программных комплексов таких, как ChemCAD, MATLAB, LabVIEW, LabOХТ-Trener не требует мощных вычислительных средств. Благодаря малому размеру реализуется на любой вычислительной платформе; имеет простой, удобный и интуитивно понятный интерфейс. Работа с программой не требует навыков программирования и знания языков программирования, в то же время может быть легко модифицирована с учетом развития технологии и систем управления в этой области или в соответствии с поставленной задачей.

Лабораторный практикум по СУХТП, реализованный на основе компьютеризированных учебно-исследовательских стендов, служит для развития умений и навыков в практической инженерно-исследовательской работе по управлению важнейшими технологическими параметрами, характеризующими состояние химико-технологических процессов, такими как температура, давление, расход, уровень.

Так, например, лабораторный учебно-исследовательский стенд «Промышленные датчики давления» ПДД-СК (рисунок 4) позволяет исследовать: статические и динамические характеристики датчиков давления различных типов; принципы цифровой передачи данных с применением промышленных протоколов; управление системой стабилизации давления с использованием ПИД-регулятора; управление системой поддержания давления с использованием программируемого промышленного контроллера. Персональный компьютер – одно из составных звеньев лабораторного стенда, используется для написания программ и записи их в программируемый контроллер, а так же является базой для функционирования SCADA-системы.



а) Внешний вид стенда; б) Внешний вид экрана «Двухпозиционное регулирование»

**Рисунок 4 – Лабораторный стенд «Промышленные датчики давления» ПДД-СК**

### Выводы

Используемые при разработке химико-технологических процессов пакеты компьютерных программ постоянно совершенствуются и обновляются, что в свою очередь требует от пользователей быть готовыми к приобретению и освоению их новейших версий. Это требование в равной степени относится и коммерческим организациям и к университетам, что в силу их специфических особенностей, в частности ограниченности материальных средств и необходимости постоянной коррекции программ обучения дисциплинам в связи систематическими изменениями программных пакетов, часто усложняет задачу своевременного приобретения новейших программ.

Тем не менее, это обстоятельство имеет принципиальное значение, так как работодатели при трудоустройстве выпускников университетов заинтересованы в специалистах химиках-технологах, которые владеют новейшими компьютерными технологиями и навыками работы с различными пакетами программ для решения актуальных задач химической технологии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перерва О. В., Гартман Т. Н. Компьютерное моделирование статических и динамических режимов работы ректификационных установок: практическое руководство для технологов и проектировщиков. – М.: ДеЛи плюс, 2016. – 206 с.
2. Дмитриев Е. А., Ковалев Ю. Н., Кузнецова И. К., Тарасова Т. А., Моргунова Е. П. Многофункциональный гидродинамический комплекс с автоматизированным сбором информации // Химическая промышленность, 2008, № 1. С. 41–45.
3. Л. В. Равичев, В. Я. Логинов, Ю. А. Беляева, Ю. А. Комиссаров. Электротехника и основы электроники. Лабораторный практикум. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2018. - 76 с.
4. Общая химическая технология. Химико-технологические системы. Лабораторный практикум.: учеб. пособие/ Г. М. Семенов, Ю. Л. Вяткин, М. Г. Давидханова, В. И. Ванчурин, В. Н. Грунский, В. И. Игнатенков, Е. В. Сучкова, Т. А. Тарасенко, А. П. Федосеев. - М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2017. – 112 с.
5. Беспалов А. В., Грунский В. Н., Харитонов Н. И., Золотухин С. Е., Садиленко А. С., Сальникова О. Ю. Системы управления химико-технологическими процессами. Лабораторный практикум: учеб. пособие: в 4 ч. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2016. – 84 с., 2019. – 75 с.

УДК 744

## МЕТОДИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРЕПОДАВАНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКИ METHODS AND ORGANIZATION OF TEACHING ENGINEERING GRAPHICS

**Вера Михайловна Акулич**  
**Vera M. Akulich**

*Межгосударственное образовательное учреждение  
высшего образования «Белорусско-Российский университет»,  
Республика Беларусь, Могилев  
Interstate institution of higher education “Belarusian-Russian University”,  
Republic of Belarus, Mogilev  
(e-mail: bru @ bru. mogilev. By)*

*Аннотация:* Рассмотрена методика преподавания инженерной графики, основанная на системном и рациональном использовании наглядных учебно-методических и тестовых разработок.

*Abstract:* The paper deals with teaching methods of engineering graphics which is based on systematic and efficient use of visual study guides and tests.

*Ключевые слова:* инженерная графика, проекционное черчение, контроль знаний.

*Keywords:* engineering graphics, projection drawing, knowledge assessment and monitoring.

Основу общеинженерной подготовки специалистов составляет инженерная графика. Одним из разделов инженерной графики, после начертательной геометрии, как теоретической основы черчения, является техническое черчение. Техническое черчение базируется на изучении общих правил оформления текстовых документов и чертежей.

Целью изучения дисциплины является ознакомление студентов со стандартами ЕСКД и получение компетенций по применению соответствующих стандартов при разработке конструкторской документации.

Многообразие форм и методов позволяют совершенствовать методику преподавания инженерной графики для студентов технических специальностей [1].

Применение инновационных технологий в процессе обучения позволяет добиваться высокого уровня наглядности преподаваемого материала, значительно влияет на контрольно-оценочные функции занятий.

Важен последовательный переход от изучения линий чертежа, элементов геометрического черчения, нанесения размеров до освоения проекционного черчения – основных правил изображения предметов на чертеже (видов, разрезов, сечений, аксонометрических проекций) [2].

Для этого разработан тематический мультимедийный курс к практическим занятиям по проекционному черчению, с изображением 3D-моделей технических деталей. Разработаны методические указания по выполнению и оформлению графических работ. Выполнение аксонометрических проекций по комплексным изображениям выполняется по соответствующим методическим рекомендациям [3].

Содержательная основа предлагаемых задач помогает поэтапному освоению проекционного черчения и способствует улучшению самостоятельной работы студентов. Для полного погружения в процесс изучения данного раздела инженерной графики разработаны и выполнены с помощью графической системы Компас- 3D индивидуальные графические задания, каждый вариант которых состоит из четырех задач.

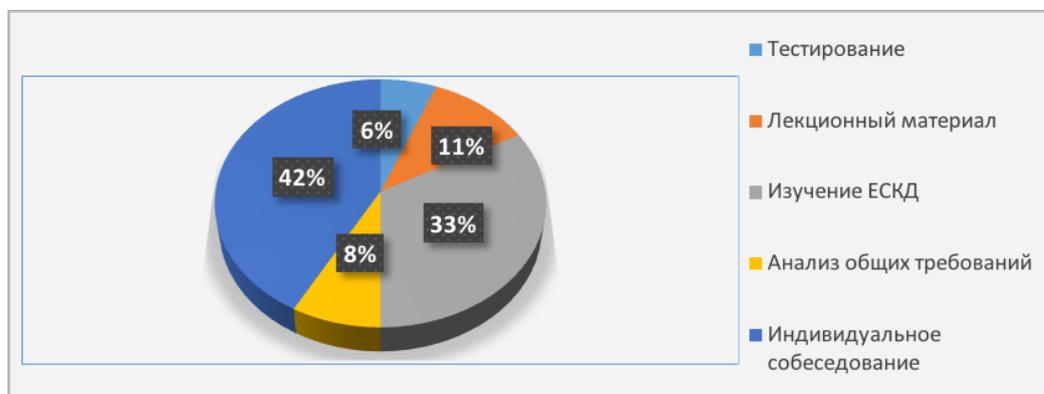
Задача 1. Дано изображение детали в изометрической проекции с указанием размеров. Построить три вида (три проекции геометрических тел, основанные на проектировании точек, линий и плоских фигур на три плоскости проекций).

Задача 2. Дана фронтальная проекция геометрического тела с двойным проницанием. Достроить горизонтальную и построить профильную проекции различных поверхностей (призм, пирамид, цилиндров, конусов).

Задача 3. Даны вид спереди и вид сверху. Построить вид слева, выполнить фронтальный и профильный разрезы (соединение половины вида с половиной разреза), построить натуральную величину указанного наклонного сечения.

Задача 4. Даны вид спереди и вид сверху. Построить вид слева, выполнить указанные сложные разрезы. Построить аксонометрическое изображение детали с вырезом по осям координат.

В целях усовершенствования индивидуального контроля и динамики усвоения студентами учебного материала разработан комплексный подход к рациональному распределению аудиторного времени по этапам изучения темы, порядок их прохождения и предметное содержание. Проведен анализ затрат аудиторного учебного времени практического занятия на различные виды учебно-педагогической деятельности (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Диаграмма распределения учебного времени практического занятия.**

Составлена оптимальная структура практического занятия, которая включает:

- входное тестирование по материалу, пройденному на предыдущем занятии (карты программированного контроля по определенной тематике);
- повторение теоретического материала (основные положения соответствующего раздела мультимедийной лекции);
- изучение ЕСКД (комплект мультимедийных слайдов, учебная и справочная литература);
- анализ общих требований по выполнению графической работы (стенды, плакаты, методические пособия и указания);
- индивидуальное собеседование и анализ персональных вариантов заданий (комплект графических заданий).

Для определения за сравнительно короткие промежутки времени результативности познавательной деятельности студентов и оценки качества достижения каждым студентом целей изучения целесообразно применять тесты. Разработана система тестового контроля знаний и методика ее использования в учебном процессе при помощи карт программированного контроля [4].

Для этого разработаны карты программированного контроля по темам:

- точки на поверхностях;
- начертания и основные назначения линий чертежа (ГОСТ 2.303-68 «Линии»);
- правила изображения предметов на чертежах (ГОСТ 2.305-2008 «Изображения-виды, разрезы, сечения»);

- правила нанесения размеров (ГОСТ 2.307-2011 «Правила нанесения размеров и предельных отклонений»);
  - аксонометрические проекции (ГОСТ 2.317-69 «Аксонометрические проекции») [5].
- Оформление вопросов и ответов тематических карт программированного контроля было выполнено в программах КОМПАС-3D, VISIO, AutoCAD и представлены на рисунке 2.

№	Условие задачи	Ответы			
		1	2	3	4
1	Какой линией обозначают сечение плоскости для разрезов и сечений?	Отличной толстой осевой	Отличной тонкой осевой	Штриховой	Разомкнутой
2	Определите название плоского разреза?	Параллельный	Ломаный	Местный	Фронтальный
3	На каком чертеже сечение плоскости указано правильно?				
4	На каком чертеже сечение выполнено правильно?				
5	На каком чертеже правильно выполнен фронтальный разрез?				
6	На каком чертеже правильно выполнено совмещение параллельных разрезов с параллельными сечениями?				

№	Условие задачи	Ответы			
		1	2	3	4
1	На каком чертеже верно построены оси в от. 100° в прямоугольной изометрии?				
2	Чему равны коэффициенты искажения в аксонометрии в проекционной диаметры?	$k_x = k_y = k_z = 1$	$k_x = k_z = 1$ $k_y = 0,5$	$k_x = k_y = k_z = 0,5$	$k_x = k_y = 2$ $k_z = 0,5$
3	На каком чертеже правильно построены штриховые в прямоугольной изометрии?				
4	На каком чертеже верно построены б - деление в от. 100° в прямоугольной изометрии?				
5	На каком чертеже правильно построены оси в аксонометрии диаметры?				

Рисунок 2 –Карты программированного контроля.

Практические занятия начинаются с проведения теста (пятиминутки), который содержит в себе функции контроля и обучения. Такая методика повышает эффективность организации учебного процесса и при этом улучшает качество знаний [6].

Полученные результаты опроса при собеседовании, тестового контроля знаний и качества выполнения индивидуальных графических заданий позволяют анализировать динамику процесса обучения каждого студента, объективно оценить успешность овладения конкретными знаниями и отдельными разделами учебной дисциплины.

Системное использование наглядных учебно-методических разработок при построении ортогональных и аксонометрических изображений простых предметов способствует развитию пространственного воображения, необходимого для формирования у студентов конструкторско-технических навыков.

### Выводы

Предложенная методика полностью охватывает тематику и объем программы дисциплины «Инженерная графика» по разделу проекционного черчения и способствует детальному изучению и успешному освоению учебного материала, что позволяет совершенствовать преподавание инженерных дисциплин в техническом университете.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулич В. М. Комплексный подход к организации учебного процесса на кафедре инженерной графики // «Качество подготовки специалистов в техническом вузе: проблемы, перспективы, инновационные подходы»: сб. науч. трудов. Могилев: УО МГУП, 2010. С. 49-51.
2. Новичихина, Л. И. Справочник по техническому черчению [Текст]: справочное издание/ Л.И. Новичихина. – 2-е изд., стереотипное. – Минск: Книжный дом, 2008.– 312 с.
- 3.Изображения- виды, разрезы, сечения. Методические указания / сост. В.М. Акулич, С.П. Хростовская. – Могилев: УО «МГУП», 2009. –50 с.
4. Акулич В. М. Комплексный подход к организации системы контроля знаний студентов // Тезисы докладов II Международной научно-методической конференции

«Качество подготовки специалистов в техническом университете: проблемы, перспективы, инновационные подходы. Могилев: УО МГУП, 2014. С. 51.

5. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие правила выполнения чертежей: [Сборник]. – М.: Издательство стандартов, 2011. – 60 с.

6. Акулич В.М. Совершенствование технологии обучения и организация учебного процесса // Материалы III Международной научно-методической конференции «Качество подготовки специалистов в техническом вузе: проблемы, перспективы, инновационные подходы». Могилев: УО МГУП, 2016. С. 20-21.

УДК 378

**О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СОЮЗА НИО ПО ПОВЫШЕНИЮ КОМПЕТЕНЦИЙ УЧЕНЫХ  
И ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ  
ON THE ACTIVITY OF THE USEA ON INCREASING THE COMPETENCE OF  
SCIENTISTS AND TECHNICAL SPECIALISTS**

**Сергей Петрович Друкаренко, Мария Вячеславовна Воробьева  
Sergei P. Drukarenko, Maria V. Vorobeva**

*Международный и Российский союзы научных и инженерных общественных объединений,  
Россия, Москва  
International and Russian Unions of scientific and engineering associations, Russia, Moscow  
(e-mail: usea1866@gmail.com)*

*Аннотация:* Рассмотрены вопросы деятельности научно-технических общественных объединений по повышению компетенций ученых и инженеров в условиях перехода к цифровой экономике

*Abstract:* The article deals with issues of the activities of scientific and technical public associations to improve the competence of scientists and engineers in the transition to a digital economy

*Ключевые слова:* Русское техническое общество, научно-технические общества, Международный и Российский Союзы научных и инженерных общественных объединений.

*Keywords:* Russian Technical Society, scientific and technical societies International and Russian Unions of scientific and engineering associations

В современном мире лидерство обеспечивается технологическим превосходством, и контроль над технологиями становится так же актуален, как и контроль над вооружениями, а потому будущее России - в создании и реализации конкурентоспособных на мировом рынке техники и технологий, подготовке лучших в мире инженеров и исследователей. Это лидерство поддерживается не только сырьевыми ресурсами, передовыми технологиями, разработками, а главное - высококвалифицированными специалистами, обладающими стратегическим мышлением, креативностью, научно-технологическим творчеством, которое опережает свое время.

Мир вступил в шестой технологический уклад [1]. Его контуры уже складываются в развитых странах мира, в первую очередь в США, Японии и КНР, и характеризуются нацеленностью на развитие и применение наукоемких, высоких технологий. Это био- и нанотехнологии, геновая инженерия, мембранные и квантовые технологии, цифровые технологии, фотоника, микромеханика, термоядерная энергетика — синтез достижений на этих направлениях должен привести к созданию, например, квантового компьютера, искусственного интеллекта и в конечном счёте обеспечить выход на принципиально новый уровень в системах управления государством, обществом, экономикой.

Как отметил Владимир Путин: «Наличие собственных передовых технологий – это ключевой фактор суверенитета и безопасности государства, конкурентоспособности

отечественных компаний, важное условие роста экономики и повышения качества жизни наших граждан».

Развитие информационных (цифровых) технологий обусловило появление таких понятий, как «информационное общество», «цифровая экономика», «цифровая трансформация» и т.п.

Цифровая экономика кардинально меняет рынок труда, цифровые технологии дают новые возможности организации и развития бизнеса, труд человека постепенно заменяется трудом роботов. В связи с этим в ближайшем будущем, видимо станет нормой регулярная смена профессии, да и работа в одной профессиональной сфере всё больше требует готовности специалиста к постоянному обучению. Концепция непрерывного образования предполагает, что жизнь человека не делится строго на период обучения и период работы, а обучение является постоянным процессом на протяжении всей его жизни.

Согласно принятой в 2017 году Правительством Российской Федерации программе «Цифровая экономика Российской Федерации», к 2025 году система образования в России должна быть настроена так, чтобы готовить достаточное количество грамотных пользователей информационных технологий, обладающих необходимыми в XXI веке компетенциями.

Основой цифровой экономики являются высококвалифицированные кадры. В первую очередь речь идет о разработчиках IT-производства. Потребность в этих кадрах возрастает с каждым днем. О кадровом дефиците в секторе информационных технологий говорит тот факт, что в России имеется всего 350 тыс. IT-специалистов высокой квалификации, в то время как для выполнения программы «Цифровая экономика» и задач импортозамещения в сфере информационных технологий число таких специалистов должно составлять 3 - 5% от числа всех работающих, как в развитых странах мира [2].

В настоящее время существующая в России образовательная система не успевает за темпами изменения потребностей стремительно развивающегося промышленного производства на базе нового технологического уклада. Система дополнительного образования все еще остается недостаточно развитой. По данным национального университета "Высшая школа экономики" (ВШЭ) Россия по получению населением дополнительного образования находится на 29 месте из 31 среди европейских стран [3].

Для развития инновационной промышленности и импортозамещения стране нужны специалисты мирового уровня. Сейчас как никогда остро стоит вопрос о повышении квалификации кадров. Проблема модернизации системы подготовки и переподготовки кадров требует консолидации усилий ученых, органов власти, а также общественности, интересы которой выражают общественные организации.

Союз научных и инженерных общественных объединений (Союз НИО), 150-летний юбилей которого научно-техническая общественность торжественно отметила в 2016 году, является старейшей в России научно-технической организацией, ведущей свою историю от Русского технического общества (в советское время Всесоюзный совет научно-технических обществ (ВСНТО)).

Согласно Уставу РТО, одной из важнейших его задач было «содействие к распространению технического образования». Для этого в 1868 году при РТО была образована Постоянная комиссия по техническому образованию, которая впервые в истории России занялась созданием системы профессионального технического образования, проблемой подготовки квалифицированных рабочих кадров, в том числе и вопросами профессионального образования для женщин. Первый председатель Постоянной комиссии по техническому образованию Е.Н.Андреев, один из учредителей РТО, утверждал, что «первая основа технического образования есть образование общее не только в смысле грамотности, но и в смысле некоторого общего нравственного и умственного развития» [4].

Союз НИО продолжает и развивает традиции по консолидации научно-технической общественности, следуя цели РТО "содействовать развитию техники и технической

промышленности в России", постоянно уделяет внимание поддержке одаренных и талантливых инженеров, ученых, специалистов и техников.

Международный Союз НИО состоит из 10 национальных научно-инженерных объединений и 35 профессиональных обществ и ассоциаций, среди которых Российское геологическое общество, Ядерное общество России, Российское научно-техническое общество судостроителей имени академика А.Н.Крылова, Российское НТО радиотехники, электроники и связи имени А.С.Попова, Тоннельная ассоциация России, Ассоциация технических университетов (АТУ), Ассоциация инженерного образования России, Ассоциация инженерных вузов и другие. Каждая из этих ассоциаций является крупной и авторитетной организацией. В АТУ, например, входит более 120 вузов, как российских, так и из стран СНГ. Российский Союз НИО состоит из 23 российских научно-технических обществ, имеет 25 региональных организаций и отделений и 19 домов науки и техники в крупных городах России (Красноярск, Тула, Екатеринбург, Тюмень, Саранск, Ярославль и др.).

Союз НИО проводит активную работу по поддержанию партнерских связей с инженерными и академическими сообществами различных стран. принимает постоянное участие в деятельности руководящих органов Всемирной федерации инженерных организаций (WFEO).

Союз НИО, являясь членом Европейской федерации национальных ассоциаций инженеров (FEANI), имеет право вести Российский национальный регистр инженеров-профессионалов и право представлять в FEANI кандидатуры российских инженеров для получения ими статуса (звания) Европейский инженер.

Для организации этой работы в России при Союзе НИО создан Российский мониторинговый комитет FEANI, основной задачей которого является организация и проведение работ по аккредитации образовательных программ и отбору кандидатов для включения в Российский национальный регистр инженеров-профессионалов FEANI.

Международная профессионально-общественная аккредитация образовательных программ позволяет вузам существенно повысить качество образования, активизировать деятельность вуза в области академической мобильности студентов и преподавателей, повысить престиж вуза в России и мире, повысить привлекательность вуза для отечественных и зарубежных абитуриентов и работодателей. Создание и развитие интегрированной в международные структуры национальной системы сертификации и регистрации профессиональных инженеров (регистры FEANI, APES и другие) способствует устранению различного рода барьеров между инженерами разных стран [5].

Первостепенное внимание уделяется Союзом НИО работе со студенческой молодежью. За счет средств Союза НИО ежегодно выделяется 8 стипендий имени В.Г.Шухова для студентов-отличников ведущих технических вузов России.

Компетенции ученых и специалистов требуют непрерывного обновления и подтверждения, так как скорость появления нового знания быстро возрастает. Этому способствуют партнерство и научное взаимодействие, различные формы коммуникации между учеными и обществом.

Союз НИО организует коммуникационные площадки и проводит крупные научно-технические мероприятия, съезды, международные конференции, форумы, конгрессы, симпозиумы, семинары с целью обмена новейшими знаниями, выбора направлений исследований и оценки их результатов, внедрения современных технических решений и новых технологий, выявления и формирования общественного мнения по актуальным научно-техническим проблемам.

Одним из наиболее интересных таких мероприятий является Межведомственный семинар по проблемам научно-технологического развития России, проводимый Союзом научных и инженерных общественных объединений совместно с Российской академией наук. Сопредседатели семинара: Гуляев Юрий Васильевич - академик РАН, член Президиума РАН, президент Российского Союза научных и инженерных общественных объединений и Иванов Владимир Викторович - член-корреспондент РАН, заместитель президента РАН. Семинар

был организован в целях содействия решению задач в области научно-технологического развития, поставленных перед Российской академией наук и российским научно-экспертным сообществом в целом.

В выявлении лучших инженеров страны, популяризации инженерного искусства, пропаганде достижений и опыта, привлечению внимания общественности к проблемам инженерного дела в России существенную роль играют проводимые Союзом НИО ежегодно Всероссийский конкурс «Инженер года» и конкурс по присуждению молодежной премии «Надежда России». Всероссийский конкурс «Инженер года» проводится с 2000 года, а конкурс «Надежда России» - с 2009 года. Конкурсы являются крупнейшим социальным проектом, реализуемым в России с целью выявления и распространения передового опыта и достижений инженерных кадров, лучших в своей сфере деятельности.

Современные ученые и инженеры должны постоянно совершенствоваться в своей профессиональной деятельности. Как показывают последние исследования, в настоящее время мотивация к учебе среди взрослых россиян недостаточная, и главная причина этого - отсутствие внутренней потребности. Для того чтобы непрерывное образование становилось жизненной нормой, должна развиваться структура непрерывного образования, в том числе в режиме онлайн, а также изменяться отношение общества к обучению.

Союзом НИО ведется активная работа, направленная на привлечение внимания общественности к проблемам инженерной и научной деятельности, а также непрерывного образования. Развивается идея разработки информационно-коммуникационной платформы для открытого обмена новыми знаниями и распространения электронных образовательных ресурсов в рамках сети.

Большая роль отводится развитию регионального сетевого подхода путем развития структуры домов науки и техники с участием в их работе образовательных, социокультурных и бизнес-организаций. Дома науки и техники Союза НИО ведут подготовку и переподготовку кадров, обеспечивая возможности системы дополнительного образования для специалистов различного уровня подготовки, проводят научно-технические конференции, семинары и круглые столы по актуальным вопросам науки и техники.

Распространение новых идей в различных отраслях производства, в различных областях техники, невозможно без постоянных контактов между специалистами, постоянных связей между инженерами и учеными, в том числе с помощью издания научной и научно-популярной литературы, периодических изданий.

Несомненно, в условиях глобализации, важное место в деятельности Союза НИО занимает международное сотрудничество с целью формирования единого научно-технологического и образовательного пространства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазьев С.Ю. Рывок в будущее. Россия в новых технологическом и мирохозяйственном укладах. («Коллекция избранного клуба»). – М.: Книжный мир, 2018. – 768 с.
2. Волков В.И. Цифровая экономика: стартовое состояние, проблемы: сб. матер. Второй Междунар. науч.-практич. конф. -Москва, 2018 .-С. 107-114.
3. Статистические сборники ВШЭ. Индикаторы образования: 2017 URL: <https://www.hse.ru/data/2017/06/29/1171183175/IO%202017.%201.%20Obrazovatel'nyj%20potencial%20naselenija.pdf>
4. Кошман Л.В.. Город и городская жизнь в России XIX столетия: Социальные и культурные аспекты. 2008
5. Ситцев В.М., Друкаренко С.П., Бокша О.Г. РТО-ВСНТО-Союз НИО: традиции, настоящее, будущее. // Наука и технологии в промышленности. . 2015. № 4. с.45 – 55.

УДК 378.4

**ИННОВАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ  
ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ И ПЕРЕРАБОТКЕ ВОЛОКНИСТЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

**INNOVATIVE ASPECTS OF TRAINING SPECIALISTS FOR ENTERPRISES  
PRODUCING AND PROCESSING FIBROUS MATERIALS**

**Светлана Владимировна Петрова-Куминская, Ирина Александровна Будкоте,  
Леонид Александрович Щербина  
Sviatlana V. Piatrova-Kuminskaya, Iryna A. Budkute, Leonid A. Shcherbina**

*Могилевский государственный университет продовольствия, Республика Беларусь, Могилев  
Mogilev State University of Food Technologies, Republic of Belarus, Mogilev  
(e-mail: htvms@tut.by)*

*Аннотация:* В статье изложены принципы современной модели подготовки специалистов для предприятий Республики Беларусь по производству и переработке волокнистых материалов, принятой на кафедре химической технологии высокомолекулярных соединений Могилевского государственного университета продовольствия.

*Abstract:* The article describes the principles of a modern model of training specialists for the enterprises of the Republic of Belarus for production and processing of fibrous materials, adopted by the Department of Chemical Technology of Macromolecular Compounds of the Mogilev State University of Food Technologies.

*Ключевые слова:* инновация, учебный процесс, инженер.

*Keywords:* innovation, educational process, engineer.

Ключевой фигурой современной инновационной экономики является инженер, способный генерировать новые идеи и их реализовывать [1]. Поэтому традиционная лекционно-семинарская система построения образовательного процесса устарела или, по крайней мере, является недостаточной для подготовки в высших учебных заведениях выпускников, претендующих на звание инженера. Подготовку творческих специалистов можно осуществить только лишь при условии применения инновационных методов преподавания. Кроме того, в настоящее время работодатели при выборе молодых специалистов большое внимание уделяют не только уровню их знаний, но также практическим умениям и навыкам. В связи с этим, в отличие от традиционных форм образования, ориентированного на усвоение теоретических знаний, в современных условиях образовательный процесс в любом вузе должен быть направлен на практико-ориентированную подготовку, которая невозможна без приобретения опыта профессиональной деятельности [2].

Учитывая актуальность и важность формирования у будущих специалистов указанных качеств, назрела необходимость перехода на разноплановую систему подготовки инженеров, предусматривающей различные динамичные, творческие и практико-ориентированные формы ведения учебного процесса.

В связи с этим на кафедре химической технологии высокомолекулярных соединений (ХТВМС) Могилевского государственного университета продовольствия, которая готовит инженеров-химиков-технологов по специальности «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий», реализуются следующие приоритетные подходы при формировании образовательного процесса:

– привлечение студентов к участию в научно-исследовательских работах, представляющих интерес для предприятий Белорусского государственного концерна по производству и реализации товаров легкой промышленности («Беллегпром») и Белорусского государственного концерна по нефти и химии («Белнефтехим»);

- выполнение учебных научно-исследовательских и дипломных работ в рамках совместных инновационных проектов с предприятиями;
- выполнение курсовых и дипломных проектов, направленных на решение конкретных вопросов модернизации и реконструкции действующих производств, на совершенствование ассортимента и повышения качества выпускаемой промышленными предприятиями химической и текстильной промышленности;
- обеспечение углубленной практической подготовки студентов (специалистов) на производственной базе предприятий концернов;
- привлечение ведущих и опытных специалистов предприятий к подготовке специалистов (для руководства и соуправления курсовых и дипломных проектов, чтения лекций по современным и актуальным технологиям в области производства химической и текстильной продукции);
- функционирование филиалов кафедры ХТВМС на предприятиях.

Все учебные дисциплины, начиная с младших курсов, реализованы в варианте учебно-исследовательских работ и включают элементы исследований, причем значимость этого аспекта обучения непрерывно возрастает по мере перехода студентов на старшие курсы. Кроме того, учебный план включает дисциплину «Учебно-исследовательская работа студентов» (УИРС), целью которой является формирование у студентов знаний, умений и навыков организации и выполнения экспериментальных научно-исследовательских (в том числе инновационных) работ. Преимущественной является такая организация УИРС, когда конкретное исследование непосредственно увязывается с курсовым проектированием и продолжается в рамках дипломного проектирования.

В преподавании некоторых специальных дисциплин используется «метод проектов» и элементы «управляемой научно-исследовательской работы». Это комплексные методы обучения, предоставляющие будущим специалистам возможность проявить самостоятельность в планировании, организации и контроле своей учебно-познавательной деятельности. При этом преподаватель предлагает на выбор студентам несколько научно-практических задач (проектов), требующих решения. При выполнении студентам приходится проводить поиск априорной научно-технической информации из отечественных и иностранных источников, планировать и выполнять эксперимент, оформлять отчет и представлять результаты выполнения проекта для обсуждения в студенческой группе и/или на студенческой конференции.

Кроме того, на кафедре ХТВМС распространена практика привлечения студентов (даже младших курсов) к участию в научно-исследовательских работах, представляющих интерес для предприятий. Причем, некоторые из этих работ проходят в исследовательских центрах (лабораториях) предприятий.

По курсовому и дипломному проектированию на кафедре внедрены новые, ставшие для кафедры уже традиционными, формы организации образовательного процесса, приближающие его к потребностям производства. В частности, разработка тематик дипломных и курсовых проектов, которая ежегодно обновляется, осуществляется совместно с ведущими специалистами предприятий химической и текстильной промышленности. Задания на курсовые и дипломные проекты содержат научно-исследовательский раздел.

В целом, основная концепция кафедры ХТВМС в плане подготовки молодых специалистов для промышленности Республики Беларусь заключается не только в передаче знаний от преподавателей к студентам, но и в развитии у них аналитического мышления, умения находить причинно-следственные связи, в формировании навыков по разработке и оптимизации химико-технологических процессов. Кроме того, образовательный процесс на кафедре подразумевает обязательное освоение современных информационных технологий и иностранного языка.

В этом плане особенностью подготовки студентов на кафедре ХТВМС является возможность более глубокого освоения ими иностранного языка в формате факультатива (64

часа). Акцент при этом делается на изучение особенностей технической лексики, связанной с производством и отделкой волокнистых материалов. При этом студенты выполняют перевод научно-технических статей из ведущих мировых научных журналов, зачастую имеющих непосредственное отношение к теме научно-исследовательских работ, проводимых ими в рамках УИРС или других дисциплин.

Практико-ориентированное обучение непосредственно связано с проведением учебной, производственной и преддипломной практик студентов с целью их погружения в профессиональную среду. С целью минимизации продолжительности адаптации молодых специалистов на производстве и снижения непроизводительных затрат предприятия на дообучение выбор места второй технологической и преддипломной практик связан с предполагаемым местом будущей работы студента.

Для обеспечения эффективной профессиональной подготовки инженеров-химиков-технологов организованы филиалы кафедры ХТВМС на ОАО «Могилевхимволокно» и ОАО «Моготекс», которые, по большому счету, являются учебными и научными центрами. Здесь осуществляется образовательный процесс: проводятся лекционные, практические, лабораторные занятия по всем специальным дисциплинам, научно-исследовательская работа. Местонахождение филиалов значительно облегчает доступ студентов на действующие производства, где продолжается практико-ориентированное обучение посредством технических экскурсий и всех видов практик. Проведение учебного процесса на действующем предприятии позволяет будущим специалистам не только осваивать теоретический материал, проводить лабораторные исследования, но и осваивать технологические процессы, знакомясь с действующими производствами. Ряд учебных занятий по отдельным дисциплинам проводятся в учебных классах и цехах «Могилевхимволокно» и ОАО «Моготекс». Такой формат, безусловно, позволяет эффективнее готовить будущих специалистов.

Важнейшим моментом, повышающим качество и практическую ориентированность подготовки инженеров-химиков-технологов, является наличие возможности привлечения специалистов предприятий к проведению учебного процесса в форме лекций, практических занятий, экскурсий, практик, курсового и дипломного проектирования, приема государственных экзаменов и защиты дипломных проектов. Государственные экзаменационные комиссии по защите дипломных проектов и работ отмечают, что активное внедрение новых форм и методов организации учебного процесса, осуществляемое кафедрой ХТВМС совместно с кадровыми, технологическими и другими службами предприятий, является эффективным, перспективным и соответствующим целям и задачам экономического развития Республики Беларусь.

В определенной степени новое дыхание работа по поиску и внедрению современных методов обучения получила с началом в декабре 2013 г. участия кафедры ХТВМС в проекте «Университет и промышленность для модернизации сектора текстильного производства в Беларуси» в рамках международной программы Tempus. Одним из новых направлений формирования учебного процесса стало налаживание обратной связи со студентами, реализуемой в формате анкетирования, для выявления существующих проблем по различным аспектам обучения. С целью максимального соответствия уровня подготовки кадров потребностям текстильной промышленности введена процедура анкетирования выпускников и сотрудников предприятий, являющихся работодателями, на предмет оценки их удовлетворенности качеством образовательных услуг, предоставляемых университетом. Теперь результаты анкетирования являются базой для разработки мероприятий, во-первых, по совершенствованию самого образовательного процесса, во-вторых, по усилению взаимодействия между университетом и предприятиями. В настоящее время университет принимает участие в программе Erasmus+, которая предлагает большие возможности для академической мобильности студентам и преподавателям.

### **Выводы**

Таким образом, инновационная направленность подготовки специалистов заключается в применении современных педагогических технологий, стимулировании самостоятельности и креативности мышления у студентов посредством постановки перед ними нестандартных задач, максимального вовлечения в научно-исследовательскую работу, что позволяет формировать у будущих специалистов инженерное мышление. Реализация указанных инновационных подходов в учебном процессе позволяет университету поднять уровень подготовки специалистов для предприятий Республики Беларусь по производству и переработке волокнистых материалов на новый уровень и выпускать инженеров, способных работать в условиях современной экономики.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Подлесный С.А., Козлов А.В. Формирование компетенций в области генерирования новых идей – основа комплексной подготовки инженеров // Инженерное образование. 2013. № 3. С. 6-11.

2. Ельцов В.В., Скрипачев А.В. Проект «FORMULA-STUDENT» как площадка для практико-ориентированной инженерной подготовки выпускников вуза // Инженерное образование. 2013. № 3. С. 12-19.

УДК 621.3037.3

### **ИННОВАЦИИ В РАЗРАБОТКАХ ПРОГРАММ В ОБЛАСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОЛОГИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ**

### **INNOVATION IN THE DEVELOPMENT OF PROGRAMS IN THE FIELD OF EDUCATION AND SCIENCE THROUGH THE METHODOLOGY OF TRANSFORMATION OF EXPERTISE**

**Татьяна Юрьевна Васильева**  
**Tatiana Yu. Vasil'eva**

*Московский авиационный институт, (национальный исследовательский университет),  
Россия, Москва*

*Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia, Moscow  
(e-mail: vtu-74@mail.ru)*

*Аннотация:* В статье описываются современные средства развития и совершенствования научных знаний с помощью новейших технологий, а также – возможные пути модернизации существующих методологий обработки экспертных знаний в области образования и науки.

*Abstract:* This article describes the existing tools of development and improvement of scientific knowledge with modern technologies and possible ways of modernization of existing methodologies for the processing of expert knowledge in the field of education and science.

*Ключевые слова:* научные знания, методология, экспертные знания.

*Keywords:* the scientific knowledge, methodology, expertise.

Развитие государства требует обновления организационных механизмов всех уровней системы образования и их соответствия перспективным тенденциям экономического развития и общественным потребностям. Следовательно, модернизация системы образования бесспорно является фактором благополучия граждан страны.

Базовым элементом глобальной конкуренции, требующей постоянного обновления технологий, ускоренного освоения инноваций, быстрой адаптации к запросам и требованиям изменяющегося мира является конкуренция различных систем образования [1].

Фундаментальные и прикладные исследования, проводимые учащимися и преподавателями возможны при наличии отличного высшего образования, а научные исследования - это важнейший ресурс и инструмент освоения студентами компетентностей поиска, анализа и освоения информации. Государственная политика Российской Федерации направлена на постоянное совершенствование образования.

Важно отметить, что повышение доступности качественного образования, соответствующего требованиям инновационного развития экономики, современным потребностям общества и каждого гражданина - стратегическая цель государственной политики в области образования [2].

Для этого были поставлены следующие приоритетные задачи:

1. Модернизация структуры образовательных учреждений в соответствии с задачами инновационного развития, в том числе формирование федеральных университетов, национальных исследовательских университетов; обеспечение компетентностного подхода, взаимосвязи академических знаний и практических умений; увеличение объема средств, направляемых на финансирование научных исследований в вузах;
2. Разработка и внедрение системы сертификации профессиональных квалификаций; поддержка корпоративных программ подготовки и переподготовки профессиональных кадров; создание системы поддержки организаций, предоставляющих качественные услуги непрерывного профессионального образования;
3. Создание системы образовательных услуг, обеспечивающих раннее развитие детей независимо от места их проживания, состояния здоровья, социального положения; создание системы выявления и поддержки одаренных детей и талантливой молодежи; развитие финансовых инструментов социальной мобильности, включая образовательные кредиты.

Важнейший критерий высокого качества образования, такой, как конкурентоспособность, обеспечит позиционирование нашего государства как одного из лидеров в области экспорта образовательных услуг, а одним из важнейших элементов системы непрерывного образования является популяризация научных знаний. В эпоху возросшего интереса к науке и практическим применениям её достижений создана структуризация компонентов науки:

- методы научно-исследовательской работы;
- понятийный и категориальный аппарат;
- разделение и кооперацию научного труда;
- научные учреждения, экспериментальное и лабораторное оборудование;
- систему научной информации;
- всю сумму накопленных ранее научных знаний.

Определен критерий научности - наука - это не просто совокупность знаний, а деятельность по получению новых знаний, что предполагает:

- существование особой группы людей, специализирующейся на этом, соответствующих организаций, координирующих исследования, а также наличие необходимых материалов, технологий, средств фиксации информации;
- рациональность;
- теоретичность - постижение истины ради самой истины;
- системность.

А также «Популяризация науки», которая представляет собой процесс распространения научных знаний в современной и доступной форме для широкого круга людей (имеющих определенный уровень подготовленности для получения информации).

Таким образом, если для широкой пропаганды науки полезна и важна научная фантастика, то сама фантастика невозможна без серьезной популяризации науки.

Как правило - популярная литература отражает уже известные, вчерашние знания. Спецлитература (даже если удастся найти к ней доступ и прорваться сквозь терминологические дебри) знакомит с сегодняшним, самым современным уровнем знаний. А нужна популярная литература по проблемам завтрашнего дня. Такого класса литературы нет. В какой-то мере эту функцию выполняет фантастика».

Разумеется, наиболее эффективными средствами популяризации науки — источники научно-популярных знаний. Наиболее эффективным средством популяризации науки являются средства массовой информации (СМИ). Благодаря многомиллионным читателям, слушателям и зрителям, наука проникает в широкие массы людей.

Например, научно-популярная лекция обладает двумя важными особенностями — интерактивностью и получением научно-популярной информации напрямую в реальном времени, а не в записи, как в других средствах.

Самой распространенной является научно-популярная литература. Она включает в себя не только книги о науке, предназначенные для широкого круга читателей, но и научно-популярные журналы, которые обычно содержат новости науки, научно-популярные статьи, колонку интересных фактов и фоторепортажи.

Научно-популярные телеканалы и телепередачи, радиостанции, радиопередачи и фильмы предоставляют зрителю в основном развлекательную информацию (компьютерные анимации, занимательные эксперименты, инсценировки и т. д.).

Как только возникает необходимость срочно найти информацию о чем-нибудь, разумеется, мы обращаемся в Интернет — средство, позволившее соединить в себе все предыдущие средства, и более того, сделать их интерактивными. Множество современных программных комплексов для обработки и хранения большого объема информации значительно ускоряют процесс познания научных исследований и технических разработок, однако, в большинстве случаев, требуют специальных навыков и предварительной подготовки работы с ними. Эти вопросы постоянно решаются разработчиками программных комплексов, совершенствующих программы с помощью экспертных модулей, позволяющих частично решать задачи экспертов. Для этого разрабатываются методологии структурирования и формализации знаний экспертов в разных отраслях науки и производств...

И так, для инновационного развития государства особую значимость приобретает политика, связанная с накоплением и усвоением знаний, с развитием научной коммуникации, передачей производственных навыков, формированием сетей поиска и обработки разнородной информации. «Ориентированные фундаментальные исследования», результатом которых является получение средствами фундаментальной науки частных знаний о каком-либо круге явлений природы или общественной жизни, имеющих отчетливое практическое значение и способных, с большой долей вероятности, быть использованными в конкретных прикладных исследованиях. Помимо перечисленных областей может быть также выделена область управленческих знаний, дальнейшая реализация которых в прикладных исследованиях связана с разработкой доктринальных, концептуальных и методических документов.

Например, экспертно-аналитическая деятельность (ЭАД) в обеспечение инновационного развития российской авиационной отрасли в настоящее время в достаточной степени институционализирована. Она проводится на постоянной основе по направлению организациями авиационной промышленности РФ и государственными научными центрами в рамках системных НИР и оперативных заданий Минпромторга России - головного федерального органа власти в области ЭАД, а также на общественных дискуссионных площадках, к которым можно отнести человеческую платформу «Авиационная мобильность и авиационные технологии». Отдельные эксперты входят в различных научно-технических советов, комиссий и выступают на научных конференциях.

Совершенствование механизма выполнения задач и реализации мероприятий по развитию авиационной научной технологии для обеспечения устойчивого инновационного развития авиастроения Российской Федерации, включая:

- определение приоритетных направлений, способов и средств достижения устойчивого инновационного роста авиационной науки и технологий;
- разработку предложений по актуализации нормативной правовой и нормативной базы в области авиастроения, пути совершенствования механизма управления научными исследованиями и создания эффективной системы взаимодействия между научными организациями, интегрированными структурами и потенциальными заказчиками авиационной техники (АТ);
- разработку проекта Комплексного плана научно-исследовательских работ в авиастроении Российской Федерации на период до 2025 года в обеспечение достижения стратегических целей и решения задач Национального плана развития науки и технологий.

Повышение конкурентоспособности АТ российского производства за счет создания и внедрения комплексной системы анализа и контроля конкурентоспособности авиационных организаций и управления конкурентоспособностью продукции [4].

Таким образом, перспективным методом обработки информации об АТ является использование ситуационного или информационно-аналитического центра, позволяющего сконцентрировать и скоординировать различные блоки разнородной информации об АТ, обеспечить её много экранное представление и, предоставить возможность её анализа целой группе - коллективу экспертов (в том числе, и территориально разнесенных). Применение ситуационного центра (СЦ) позволяет достичь цели сокращения времени проведения СП повышения качества и достоверности проектной информации о разрабатываемой АТ.

Основными направлениями деятельности СЦ являются:

– методическая, информационная, программная, аппаратная поддержка коммуникаций на корпоративном уровне и с внешним окружением (партнеры, вышестоящие организации и др.) и обеспечение наглядного представления информации (профильные предметные области: технические средства, программное обеспечение, организация оперативной связи и взаимодействий с внешней средой и др.);

– методическая, информационная, программная, аппаратная поддержка исследований и разработок, проводимая в рамках выполнения контрактов, договоров, соглашений, поручений вышестоящих организаций, заданий руководства, инициативных проектов по тематике профильных предметных областей предприятия-разработчика АТ.

Основные классы задач, решаемых экспертным сообществом при разработке предложений по инновационному развитию российской авиационной отрасли таковы [5]:

1. задачи планирования развития и достижения баланса между объемом решаемых за объемом выделяемых ресурсов;
2. задачи согласования интересов заказчика и производителей АТ, военного, двойне гражданского назначения;
3. задачи планирования развития и определение рационального состава;
4. задачи формирования рационального плана реализации целевой программы, направленной на создание АТ, военного, двойного и гражданского назначения.

### **Вывод**

Современные методы формирования системы непрерывного образования на основе внедрения модульных программных комплексов, разработанных на основе методологии адаптивно-ситуационного управления экспертной информацией, позволяют эффективно использовать человеческий потенциал и создать условия для самореализации граждан на благо, как конкретного человека, так и государства в целом.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Мельников В.П., Васильева Т.Ю. Методология адаптивно-ситуационного управления технологической подготовкой РЭА с применением экспертных моделей. Научно-монографическое издание. Под научной редакцией профессора Мельникова В.П. — Москва: Изд-во БУКИ-ВЕДИ, 2014. — 260 с., Ил.— 1000 экз.
2. Витковски Н., Ортоли С. Ванна Архимеда. Краткая мифология науки.
3. Васильева Т.Ю. Экспертный модуль для программного обеспечения исполнительской системы виртуального производства/«Бизнес – информатика» 2009, №4 (10),с. 25-28.
4. Васильева Т.Ю. Адаптация современных программных средств создания и внедрения корпоративных информационных и управляющих систем к работе в структуре предприятий авиационной промышленности/Международный научно-исследовательский журнал. — Екатеринбург, Часть 1№ 11(18)2013, с 75-79.

Научное издание

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОСЫГИНСКИЙ ФОРУМ**  
**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СИМПОЗИУМ**  
**«ВТОРЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ:**  
**«Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование»,**  
**приуроченные к 100-летию РГУ имени А.Н. Косыгина»**

Сборник научных трудов  
(Том 2)

29 октября – 1 ноября 2019 года

Технический редактор Бородина Е. С.  
Компьютерная верстка и макет Бородина Е. С.

**Материалы публикуются в авторской редакции.**