МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ТРЕТИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОСЫГИНСКИЙ ФОРУМ «СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК»

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СИМПОЗИУМ «ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ», ПОСВЯЩЕННЫЙ 110-ЛЕТИЮ А.Н. ПЛАНОВСКОГО (ISTS «EESTE-2021»)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

(ТОМ 1)

МОСКВА
20 И 21 ОКТЯБРЯ 2021 ГОДА

Проводится в соответствии с планом мероприятий по проведению Годов российско-китайского научно-технического и инновационного сотрудничества
Распоряжение Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2020 г. № 1020-р

УДК 66.02(06)
П 42

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ : сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященного 110-летию А.Н. Плановского (ISTS «EESTE-2021»): Т. 1 / М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2021. – 424 с.

ISBN 978-5-00181-165-7

В сборник включены научные материалы российских и зарубежных ученых, в которых приводятся результаты научных исследований энергоресурсоэффективных процессов и технологических систем, рассматриваются современные пути повышения энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности.

ISBN 978-5-00181-165-7

УДК 66.02(06)

© ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2021
© Авторы статей, 2021

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СИМПОЗИУМ «ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ», ПОСВЯЩЕННЫЙ 110-ЛЕТИЮ А.Н. ПЛАНОВСКОГО (ISTS «EESTE 2021»)

ПРОВОДИТСЯ В РГУ ИМЕНИ А.Н. КОСЫГИНА В РАМКАХ ТРЕТЬЕГО МЕЖДУНАРОДНОГО КОСЫГИНСКОГО ФОРУМА «СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК» 20 И 21 ОКТЯБРЯ 2021 ГОДА

Организаторами Симпозиума являются:

- Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
- Министерство промышленности и торговли Российской Федерации
- Российская академия наук
- Российский Союз научных и инженерных общественных объединений
- Всекитайская Ассоциация по науке и технике (CAST)
- Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)
- Российское химическое общество имени Д. И. Менделеева
- Российская инженерная академия
- Евразийский информационно-аналитический консорциум
- Комитет РосСНИО по проблемам энергоресурсоэффективных химических технологий
- Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова РАН
- Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси
- Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
- Московский государственный университет пищевых производств
- Московский политехнический институт
- Институт системного программирования имени В. П. Иванникова РАН
- Институт химических реактивов и особо чистых химических веществ
- Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
- Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

Рабочие языки Симпозиума: русский и английский.
Материалы публикуются в авторской редакции.

ПРОГРАММНЫЙ (НАУЧНЫЙ) КОМИТЕТ МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СИМПОЗИУМА «ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ», ПОСВЯЩЕННОГО 110-ЛЕТИЮ А.Н. ПЛАНОВСКОГО (ISTS «EESTE 2021»)

Президент Симпозиума:

Президент Международного и Российского Союзов научных и инженерных общественных объединений, член Президиума РАН,

академик РАН **Гуляев Юрий Васильевич**

Председатель программного (научного) комитета:

Вице-президент РХО им. Д.И. Менделеева, сопредседатель Комитета РосСНИО по проблемам энергоресурсоэффективных химических технологий,

профессор **Кулов Николай Николаевич**

Сопредседатели программного (научного) 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**

Член правления РХО имени Д.И. Менделеева, директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики,

академик РАН **Мешалкин Валерий Павлович**

Директор института системного программирования имени В.П. Иванникова РАН, академик РАН **Аветисян Арутюн Ишханович**

Директор Института общей и неорганической химии имени Н.С.Курнакова РАН, член-корреспондент РАН **Иванов Владимир Константинович**

Вице-президент Китайской ассоциации нефтяной и химической промышленности, член Академического консультативного комитета Китайской Академии Наук, академик Китайской Академии Наук **Дуань Сюэ**

Член Правления Китайского химического общества, Председатель Научного Комитета Государственной лаборатории переработки тяжелой нефти, академик Китайской Академии Наук **Чуньмин Сюй**

Учёный секретарь программного (научного) комитета:
профессор РГУ имени А.Н . Косыгина, учёный секретарь Комитета РосСНИО по проблемам энергоресурсоэффективных химических технологий
Кошелева Мария Константиновна
(тел. моб. 8 (926) 355 04 48, e-mail: oxtpaxt@ya.ru).

Информационное обеспечение Симпозиума на сайтах
http://www.eeste.org, http://www.rusea.info,
https://www.chem-com.ru, http://www.kosygin-rgu.ru, https://etpeb.ru

Состав программного (научного) комитета:

Абиев Р.Ш. проф. (Россия)
Аветисян А.И. акад. РАН (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)
Берентгартен М.Г. проф. (Россия)
Бинь Инь проф. (Китай)
Блиничев В.Н. проф. (Россия)
Бокова Е.С. (Россия)
Вошкин А.А. проф. (Россия)
Генералов М.Б. проф. (Россия)
Грунский В.Н. 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)
Дьяконов С.Г. проф. (Россия)
Иванов В.В. чл.-корр. РАН (Россия)
Иванов В.К. чл.-корр. РАН (Россия)
Кильдеева Н.Р. проф. (Россия)
Клинов А.В. проф. (Россия)
Кобраков К.И. проф. (Россия)
Кошелева М.К. проф. (Россия)
Кулов Н.Н. проф. (Россия)
Лабутин А.Н. проф. (Россия)
Леонтьев Л.И. акад. РАН (Россия)
Лесовик В.С. чл.-корр. РААСН (Россия)
Липин А.Г. проф. (Россия)
Лукачевский Б.П. д-р. (Россия)
Мажуга А.Г. проф. (Россия)
Мешалкин В.П. акад. РАН (Россия)
Мизонов В.Е. проф. (Россия)
Ольшанская Л.Н. проф. (Россия)
Остриков А.Н. проф. (Россия)
Павлюкевич Н.В. чл.-корр. НАН Р. Беларусь (Беларусь)
Равичев Л.В. проф. (Россия)
Рудобашта С.П. проф. (Россия)
Силаков А.В. (Россия)
Таранцева К.Р. проф. (Россия)
Федосов С.В. акад. РААСН (Россия)
Фролкова А.К. проф. (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)
Alves-Filho O. prof. (Norway)
Berthiaux Henri prof. (France)
Chen Lei dr. (China)
Chunming Xu acad. (China)
Dang Vu Minh prof. (Vietnam)
Ditl P. prof. (Czech Rep.)
Duan Xue acad. (China)
Faïçal Larachi prof. (Canada)
Fletcher David prof. (Australia)
Gong K.E. prof. (China)
Jirout T. prof. (Czech Rep.)
Jürgen Brandner prof. (Germany)
Kanga Marlene dr. (Australia)
Kiefer Thomas prof. (Germany)
Kiwi-Minsker Lioubov prof. (Switzerland)
Krawczyk J. prof. (Poland)
Levitsky S. prof. (Israel)
Mechtcherin Victor prof. (Germany)
Mujumdar Arun S prof. (Canada, Singapore)
Murzin Dmitry Yu. prof. (Finland)
Okoh Anthony I. Prof. (South Africa)
Poliakoff Martyn prof. (UK)
Poux Martine prof. (France)
Ribatski Gerhardt prof. (Brazil)
Rieger F. prof. (Czech Rep.)
Ritunesh Kumar prof. (India)
Simmons Mark prof. (UK)
Smechowski Krzysztof prof. (Poland)
Środulska-Krawczyk Małgorzata prof. (Poland)
Tapio Salmi prof. (Finland)
Volker Hessel prof. (Netherlands)
Woerner Martin prof. (Germany)

ОГЛАВЛЕНИЕ

СЕКЦИЯ 1. «ТЕОРИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ, МАССООБМЕННЫХ, ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ДРУГИХ ПРОЦЕССОВ»

В. Е. МИЗОНОВ, Е. В. БАСОВА, А. В. МИТРОФАНОВ, Е. А. ШУИНА
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В НЕЛИНЕЙНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ И/ИЛИ ХИМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ 15

В. Ю. НЕВИНИЦЫН, А. Н. ЛАБУТИН, Г. В. ВОЛКОВА
СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМ РЕАКТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПОВ И МЕТОДОВ СИНЕРГЕТИКИ 19

С. В. ФЕДОСОВ, С. Н. НИКИШОВ, М. О. БАКАНОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОСТЕКЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.... 23

С. В. ВОРОБЬЕВ, И. В. ПОСТНИКОВА, В. Н. БЛИНИЧЕВ
КИНЕТИКА ИСТИРАНИЯ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ..... 29

С. П. БОБКОВ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ 34

А. А. ЛИПИН, А. Г. ЛИПИН
ДВУХЗОННАЯ СУШКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕМ МАТЕРИАЛЕ 38

С. В. ВЕНДИН, А. Ю. МАМОНТОВ, Ю. Н. УЛЬЯНЦЕВ
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ БИОГАЗОВОМ РЕАКТОРЕ..... 41

Н. М. ШАРПАР, Л. И. ЖМАКИН, А. Н. СОРОКИН
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОЗДУШНОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ..... 45

А. В. КЛИНОВ, И. М. ДАВЛЕТБАЕВА, А. В. МАЛЫГИН, А. Р. ХАЙРУЛЛИНА, С. Э. ДУЛМАЕВ
ОБЕЗВОЖИВАНИЕ СПИРТОВ ЭКСТРАКТИВНОЙ РЕКТИФИКАЦИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМИНОЭФИРОВ БОРНОЙ КИСЛОТЫ 49

А. В. МИТРОФАНОВ, В. Е. МИЗОНОВ, С. В. ВАСИЛЕВИЧ, М. В. МАЛЬКО
ОПЫТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ 54

С. В. ВАСИЛЕВИЧ, М. В. МАЛЬКО, А. В. МИТРОФАНОВ
ОПЫТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ 58

В. Е. РУМЯНЦЕВА, В. С. КОНОВАЛОВА, А. В. ОСЫКО
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КИНЕТИКУ МАССОПЕРЕНОСА В БЕТОНЕ ПРИ ЖИДКОСТНОЙ КОРРОЗИИ..... 62

М. С. ИВАНОВ, А. Е. ПОЛЯКОВ
ДЕФОРМИРОВАНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫХ ПОЛЯХ 66

О. Н. ФИЛИМОНОВА, М. В. ЕНЮТИНА, А. С. ВИКУЛИН, А. В. ИВАНОВ
ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ МАССООБМЕН В ГРАНУЛАХ НЕОДНОРОДНО-ПОРИСТОГО АДСОРБЕНТА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ МАКРО- И МИКРОДИФФУЗИОННЫМ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕНОСА 71

Я. И. БУЛАНОВ, А. В. КУРДЕНКОВА
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СВОЙСТВА ПАРААРАМИДНЫХ ТКАНЕЙ 74

А. В. ГАВРИЛОВ, Е. В. НОСОВА
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ 79

А. В. КУРДЕНКОВА, Я. И. БУЛАНОВ
КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТКАНЕЙ ДЛЯ СПЕЦОДЕЖДЫ РАБОТНИКОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ 83

М. М. САФАРОВ, Н. Э. ДЖУМАЕВА, М. ДЖАББОРЗОДА, Б. М. МАХМАДИЕВ
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОЛУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ 87

С. П. РУДОБАШТА, Г. А. ЗУЕВА, В. М. ДМИТРИЕВ
МАССОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СУШКЕ ЯДЕР И ОБОЛОЧЕК СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА 90

С. Ф. СОЛОНАРЬ
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАССОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ К-300-240 94

П. С. ВАСИЛЬЕВ, П. В. ТИШИНА
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ С ТАРЕЛКАМИ ИЗ ВЫСОКОПОРИСТОГО ПРОНИЦАЕМОГО ЯЧЕИСТОГО МАТЕРИАЛА 98

О. Р. ДОРНЯК, А. Б. НЕДОНОСКОВ
МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-НАГРЕВА ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИОННОГО ШВА .. 103

М. И. СЛЮСАРЕВ, В. И. РЯЖСКИХ, А. А. БОГЕР, А. М. КОКАРЕВ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ ПОЛУЧЕНИЯ АЗОТА 106

А. С. БЕЛОУСОВ, В. Ю. АБРАМИН
МОДЕЛЬНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛОНОВ 109

М. В. МАЛЬКО, С. В. ВАСИЛЕВИЧ, А. В. МИТРОФАНОВ, Н. С. ШПЕЙНОВА
НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКЦИИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ 113

Э. П. ДЯЧЕНКО, М. И. ИВАНОВА, М. М. ДЯЧЕНКО
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОСЦИЛЛИРУЮЩИХ РЕЖИМОВ СУШКИ 118

О. Р. ДОРНЯК, А. И. НОВИКОВ
ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ СЕМЯН СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ПОГРУЖЕНИЕМ В ЖИДКОСТЬ 122

В. М. ПОПОВ, О. Р. ДОРНЯК
РАСЧЕТ СБЛИЖЕНИЯ ПЛОСКИХ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ 125

В. П. ЖУКОВ, А. Е. БАРОЧКИН, М. С. БОБРОВА
ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ СИСТЕМАХ С МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ 131

Ю. Г. ЧЕСНОКОВ
ПУЛЬСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ ПРАНДТЛЯ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ ПО ДАННЫМ ПРЯМОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 135

А. Н. КАРЕВ, М. П. ТЮРИН
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ 137

В. В. ЕРОФЕЕВ, А. Г. ИГНАТЬЕВ, И. П. ТРОЯНОВСКАЯ, Д. В. БАЗАНОВА, Р. Г. ШАРАФИЕВ, Р. А. ГИЛЬМАНШИН
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ 140

Л. МУСАБЕКОВА
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФФУЗИОННО-ОГРАНИЧЕННОЙ АГРЕГАЦИИ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ 145

Ш. Р. САФАРОВ, Х. Х. ОЙМАТОВА, М. М. САФАРОВ, ДЖ. Ф. СОБИРОВ
РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТАЛЬПИИ ТЕРНАРНЫХ СИСТЕМ ПРИ ВЛИЯНИИ НАНОПОРОШКА ГИДРАЗИНА 149

Н. Н. СИМАКОВ
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ПРЯМО- И ПРОТИВОТОЧНОГО РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАССООБМЕННОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО АППАРАТА 153

В. Н. ХМЕЛЁВ, А. В. ШАЛУНОВ, Р. Н. ГОЛЫХ, В. А. НЕСТЕРОВ
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АГЛОМЕРАЦИИ ЧАСТИЦ PM2,5 В ВОЗДУШНОМ ПРОМЕЖУТКЕ 157

П. В. АКУЛИЧ, Д. С. СЛИЖУК
ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОС В ПРОДУВАЕМОМ СЛОЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ МИКРОВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ 162

Н. В. АЛЕКСЕЕВА, М. К. ДЖУБАРИ
КРИТЕРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ПРОЦЕССА ВОДООЧИСТКИ 167

Р. Н. ГОЛЫХ, А. В. ШАЛУНОВ, В. Н. ХМЕЛЁВ, Р. В. БАРСУКОВ, И. А. МАНЯХИН, Д. А. ИЛЬЧЕНКО, В. Д. МИНАКОВ, В. А. ШАКУРА
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМАХ СО СПЛОШНОЙ ЖИДКОЙ ФАЗОЙ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЯ . 169

А. Г. ЛИПИН, А. А. ЛИПИН
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАПСУЛИРОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОЛИАКРИЛАМИДНЫЕ ОБОЛОЧКИ 174

В. П. МЕШАЛКИН, Э. Р. АБДЕЕВ, Р. И. САИТОВ, И. Р. ЗАРИПОВ, Л. Р. ГУЛЕМОВА
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОГО СВЧ-СПОСОБА ОСУШКИ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОСЛЕ ГИДРОИСПЫТАНИЙ 177

А. И. СОКОЛЬСКИЙ, О. Б. КОЛИБАБА, Р. Н. ГАБИТОВ, Д. А. ДОЛИНИН
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ 182

К. В. ТАРАНЦЕВ, К. Р. ТАРАНЦЕВА
АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИХ ПРОЦЕССЫ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И ДЕЭМУЛЬСАЦИИ В СЛАБОПРОВОДЯЩИХ СПЛОШНЫХ СРЕДАХ..... 187

В. Н. ХМЕЛЁВ, А. В. ШАЛУНОВ, Р. Н. ГОЛЫХ, В. А. НЕСТЕРОВ, А. С. БОЧЕНКОВ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ВОЗДУШНОМ ПРОМЕЖУТКЕ КАК ФАКТОРА БЕСКОНТАКТНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 190

Н. Н. СИМАКОВ
УЧЕТ РАННЕГО КРИЗИСА СОПРОТИВЛЕНИЯ КАПЕЛЬ В ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЯХ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА РАСПЫЛЕННОЙ В ГАЗЕ ЖИДКОСТИ..... 194

А. М. ЦИРЛИН, А. И. БАЛУНОВ
НЕОБРАТИМЫЕ ПОТЕРИ В ПРОЦЕССАХ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ ПОТОКОВ 199

Л. В. РАВИЧЕВ, А. М. ТРУШИН, В. Е. ЯШИН
МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДСТВАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ (CFD) ПЕННОГО РЕЖИМА НА ПРОТИВОТОЧНОЙ ТАРЕЛКЕ 204

СЕКЦИЯ 2. «ТЕХНОЛОГИЯ И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ БЕЗОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ, НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ, ТЕКСТИЛЬНОЙ, ЛЁГКОЙ, ПИЩЕВОЙ, ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ, МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ, МЕДИЦИНСКОЙ, ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ И ДРУГИХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И АПК»

А. В. АКУЛИЧ, В. М. ЛУСТЕНКОВ, А. А. АКУЛИЧ
ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПИЩЕВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДВСТВ НА ОСНОВЕ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ 211

О. Г. БУРДО, И. В. СИРОТЮК, А. В. АКИМОВ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ 216

В. Н. ХМЕЛЁВ, А. В. ШАЛУНОВ, С. А. ТЕРЕНТЬЕВ, В. А. НЕСТЕРОВ
УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ БЕЗ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА 221

О. И. ОДИНЦОВА, А. А. ЛИПИНА, Е. О. ЕСИНА, А. С. СМИРНОВА
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСИИ МИКРОКАПСУЛИРОВАННЫХ АКАРИЦИДНО-РЕПЕЛЛЕНТНЫХ ВЕЩЕСТВ 226

В. И. БЕСШАПОШНИКОВА, О. Н. МИКРЮКОВА, Т. С. ЛЕБЕДЕВА, В. В. ХАММАТОВА
РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОГНЕЗАЩИТНОЙ МОДИФИКАЦИИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 230

О. В. КОЗЛОВА, А. Р. ЗИМНУРОВ, О. И. ОДИНЦОВА
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТДЕЛКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 235

Е. В. ЛУПАЧЕВ, А. В. ПОЛКОВНИЧЕНКО, Н. Н. КУЛОВ
ВЫДЕЛЕНИЕ ФТОРОРГАНИЧЕСКИХ СПИРТОВ ИЗ АЗЕОТРОПНЫХ СМЕСЕЙ С НЕФТОРИРОВАННЫМИ СПИРТАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКСТРАКТИВНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ 239

А. С. СЕВРЮКОВ, М. Г. БЕРЕНГАРТЕН, А. С. ПУШНОВ
ВЛИЯНИЕ ТИПА КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ГЛУБИНУ ОХЛАЖДЕНИЯ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ В ГРАДИРНЕ 242

Е. С. БОРОДИНА, М. П. ТЮРИН, А. И. ДОМБРОВСКАЯ
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЛИМИТИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РАБОТУ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ 247

В. Н. ХМЕЛЁВ, А. В. ШАЛУНОВ, В. А. НЕСТЕРОВ, А. С. БОЧЕНКОВ
ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН .. 252

H. LIU, F. YANG, X. YAN, F. CHEN
P DOPED CoCu AEROGEL AS A BIFUNCTIONAL ELECTROCATALYST FOR EFFICIENT OVERALL WATER SPLITTING 257

Е. Г. ПОЛУШИН, А. Р. ЗИМНУРОВ, О. В. КОЗЛОВА
ИЗУЧЕНИЕ КЛЕЕВЫХ СВОЙСТВ АКРИЛОВЫХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ СОЗДАНИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ 259

В. Н. ХМЕЛЁВ, А. В. ШАЛУНОВ, В. А. НЕСТЕРОВ, П. П. ТЕРТИШНИКОВ, А. С. БОЧЕНКОВ
ИЗЛУЧАТЕЛЬ ПОРШНЕВОГО ТИПА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ 263

Г. И. ХАЗАНОВ, М. А. АПАРУШКИНА
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТ ПРЕССОВЫХ СУКОН В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВЛАЖНО-ТЕПЛОВЫХ ОБРАБОТОК 268

Г. В. КАЛАШНИКОВ, Е. С. БУНИН, С. В. МАКЕЕВ
КИНЕТИКА ВЛАГОПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПЕРИОДИЧЕСКИМ ВЛАГОПОДВОДОМ 270

Е. Е. ГРИНБЕРГ, Ю. И. ЛЕВИН, М. А. МОШНЯГА, М. В. РЯБЦЕВА, Н. Г. ТАБУНОВА
МАЛООТХОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТЫХ ОКСИДОВ И ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ 274

Ж. А. СУХИНЕЦ, А. И. ГУЛИН , О. О. ВАЛЯМОВА
НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ РАСХОДА ГАЗА В ГТД 278

Е. П. МОРГУНОВА, М. Г. ДАВИДХАНОВА
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАССООТДАЧИ ПРИ ДЕСОРБЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА 283

Е. Н. БАЗЫЛЕНКО, Е. М. ЛОБАЦКАЯ
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ШЛИХТОВАНИЯ ЛЬНЯНОЙ ПРЯЖИ 286

А. В. КАНАТОВ, Д. А. ЗАЙЦЕВ, Д. Ю. ЗАПОРОЖАН
ОСОБЕННОСТИ РАСКРОЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕХАНИЧЕСКИМ ТОЧЕЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ 289

К. Р. ТАРАНЦЕВА, К. В. ТАРАНЦЕВ
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ ЭТАНОЛА В БЕЗМЕМБРАННЫХ ТОПЛИВНЫХ ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ 293

Н. Г. ЗУБОВА, Т. П. УСТИНОВА
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПАН-ТЖ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В ТЕХНОЛОГИИ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ..... 297

Ю. А. ТАРАН, В. М. ФУФАЕВА, С. А. РАЗИН
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ МЕТОДОМ КАПСУЛИРОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ..... 300

А. В. КАНАТОВ, Н. А. ВИНОГРАДОВ, Э. В. ФЕДОРОВ
ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ СТЕКЛОПЛАВИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ..... 303

Е. А. ШУЛАЕВА, Д. Р. ХАБИБНАСОВ
РАЗРАБОТКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО СТЕНДА ПО ИЗМЕРЕНИЮ РАСХОДА ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД С УЧЕТОМ КОРРЕКЦИИ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ И ДАВЛЕНИЮ 307

С. И. ЛАЗАРЕВ, С. В. КОВАЛЕВ, Д. Н. КОНОВАЛОВ, П. ЛУА, В. Ю. РЫЖКИН
РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННЫХ АППАРАТОВ..... 310

А. Г. ИГНАТЬЕВ, В. В. ЕРОФЕЕВ, Р. Г. ШАРАФИЕВ, Р. А. ГИЛЬМАНШИН, И. Р. САГАДЕЕВ, О. А. ГРЕБЕНЩИКОВА
ОСНОВЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ УТОРНЫХ УЗЛОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ 314

Л. Н. ОВЧИННИКОВ, Н. Л. ОВЧИННИКОВ
РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ ГРАНУЛИРОВАННОГО КОМПОЗИТНОГО ТОПЛИВА 318

Н. Н. ЯСИНСКАЯ, Н. В. СКОБОВА
РАЦИОНАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СУШКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 322

Л. С. РАТКИН
ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ОБУСТРОЙСТВА НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА РАННИХ ЭТАПАХ ОСВОЕНИЯ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ 327

Д. К. ПАНКЕВИЧ, Т. С. ЧЕРКАСОВА
ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПОРТИВНОЙ ОДЕЖДЫ ИЗ МЕМБРАННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 330

В. В. ЧЕЛНОКОВ, Е. ЗАБОЛОТНАЯ, А. В. МАТАСОВ
ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ГАЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО СЖИГАНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ..... 335

В. Н. ХМЕЛЁВ, С. Н. ЦЫГАНОК, Р. В. БАРСУКОВ, А. В. ШАЛУНОВ, В. А. НЕСТЕРОВ
УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЧЕРЕЗ ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ 338

О. О. ГОЛУБЯТНИКОВ, Е. И. АКУЛИНИН, Д. С. ДВОРЕЦКИЙ, С. И. ДВОРЕЦКИЙ
ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ УСТАНОВОК АДСОРБЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ 343

Н. Б. АЛИМОВ, А. В. СКУБИЕВА, И. А. КУЛЕШОВ, С. А. УХАНЕВ, Е. В. РУДЯКОВА, А. А. ЧАЙКА
ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО КРЕКИНГА ТЯЖЕЛОГО НЕФТЯНОГО СЫРЬЯ 348

В. Н. ХМЕЛЁВ, А. В. ШАЛУНОВ, В. А. НЕСТЕРОВ, А. С. БОЧЕНКОВ, П. П. ТЕРТИШНИКОВ
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА ГАЗООЧИСТКИ ОТ ЧАСТИЦ РАЗМЕРОМ МЕНЕЕ 2,5 МКМ 352

В. В. СИГАЧЕВА, И. Е. МЕНЯЙЛО
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТКАЦКОГО СТАНКА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БУМГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ СУШИЛЬНЫХ СЕТОК 357

В. А. НАУМОВ, П. В. НАСЕНКОВ
ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРУЧЕНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ НИТЕЙ 359

Е. А. НОВОСЕЛОВА
ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СПЛАВОВ ТИТАНА, МОЛИБДЕНА И ТАНТАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ 363

А. Н. РАДЮК, А. Н. БУРКИН
ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛОКНИСТО-НАПОЛНЕННЫХ ПОДОШВ ОБУВИ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА 367

П. Н. РУДОВСКИЙ, И. С. БЕЛОВА
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СИЛ АДГЕЗИИ ВОЛОКОН К СВЯЗУЮЩЕМУ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ КЛЕЯЩЕГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КЛЕЕВОЙ ПРЯЖИ 371

Р. Г. ШАРАФИЕВ, В. В. ЕРОФЕЕВ, А. Г. ИГНАТЬЕВ, И. П. ТРОЯНОВСКАЯ, Р. А. ГИЛЬМАНШИН, С. В. ЕРОФЕЕВ
ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ НА УЧАСТКАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ШТАМПОСВАРНЫХ ТРОЙНИКОВ 374

Н. С. ШУЛАЕВ, В. В. ПРЯНИЧНИКОВА, Р. Р. КАДЫРОВ, И. В. ОВСЯННИКОВА
АНАЛИЗ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ НЕФТЕЗАГРАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВ 379

Г. И. ПЕРВАК
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ 381

Л. Н. ОЛЬШАНСКАЯ, Е. Н. ЛАЗАРЕВА
ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ИЗ ГАЛЬВАНОШЛАМОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ 384

Э. Р. АБДЕЕВ, Р. И. САИТОВ, А. А. РУКОМОЙНИКОВ, Р. Г. АБДЕЕВ, М. В. ШВЕЦОВ
ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ СВЧ-ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ 387

Г. И. ПЕРВАК
ЭНЕРГОАУДИТ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ 391

З. Н. ЁДАЛИЕВА, М. А. ЗАРИПОВА, М. М. САФАРОВ
ТЕПЛОЁМКОСТЬ МИКРОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ И МОНОЛИТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМ $CdSb$-$NiSb_2$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ 394

Л. И. ЖМАКИН, Н. М. ШАРПАР, Е. О. ПОЛУЦЫГАН, Г. И. ПЕРВАК
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ПО ТЕПЛОВЫМ СЕТЯМ 398

В. О. КУЗНЕЦОВА
ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ОБОЛОЧКИ ИЗ ТИТАНА 402

Ю. А. ГЕЛЛЕР, И. С. АНТАНЕНКОВА, А. С. БЕЛОУСОВ
ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ ПЭТФ ОТ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА..... 408

Л. В. РАВИЧЕВ, А. М. ТРУШИН, В. Е. ЯШИН
ТЕНДЕНЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕННЫХ АППАРАТОВ И ПЕННОГО РЕЖИМА..... 412

СЕКЦИЯ 1. «ТЕОРИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ, МАССООБМЕННЫХ, ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ДРУГИХ ПРОЦЕССОВ»

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-15-18

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В НЕЛИНЕЙНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ И/ИЛИ ХИМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ
MODELING THE HEAT CONDUCTION IN NON-LINEAR INHOMOGENEOUS MEDIUM WITH PHASE TRANSFORMATION AND/OR CHEMICAL REACTIONS

Мизонов Вадим Евгеньевич, Басова Елена Владимировна,
Митрофанов Андрей Васильевич, Шуина Елена Александровна
Vadim E. Mizonov, Elena V. Basova, Andrey V. Mitrofanov, Elena A. Shuina

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина – ИГЭУ, Россия, Иваново
Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin– ISPEU, Russia, Ivanovo
(e-mail: mizonov46@mail.ru)

Аннотация: Предложена основанная на теории цепей Маркова математическая модель нелинейной теплопроводности в многослойных средах с фазовыми превращениями и/или химическими реакциями в слоях. Приведены примеры численных экспериментов с моделью.

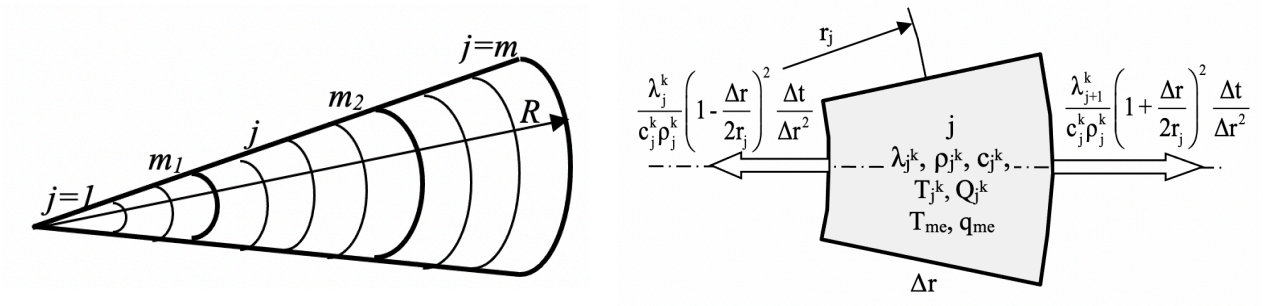
Abstract: A mathematical model of non-linear heat conduction in multilayer media with phase transformation and/or chemical reactions in the layers based on the theory of Markov chains is proposed. Some results of numerical experiments with the model are presented.

Ключевые слова: нелинейная теплопроводность, фазовое превращение, химическая реакция, цепь Маркова, численные эксперименты.

Keywords: non-linear heat conduction, phase transformation, chemical reaction, Markov chain, numerical experiments.

Расчет теплопереноса в нелинейных неоднородных средах и вызываемых им теплофизических и химических процессов является актуальной задачей в разнообразных секторах промышленности и научных исследований. Аналитические решения этих задач не существуют, а все попытки все-таки получить их требуют таких упрощений, что зачастую выхолащивается начальный физический смысл моделируемых процессов. Поэтому приходится прибегать к численным методам, которые часто разрабатываются применительно к конкретным процессам, то есть не имеют алгоритмической универсальности. Сравнение различных подходов к построению подобных моделей показал, что достаточно универсальные алгоритмы моделирования могут быть построены на основе математических моделей, базирующихся на теории цепей Маркова. Теоретические основы применения этого подхода в химической инженерии описаны в работах [1,2]. В работе [3] описано его приложение к моделированию распределения температуры и фазового состояния в стержне, расплавляемом периодически движущимся локальным тепловым источником. Однако непосредственно применить полученные результаты к более широкому спектру задач невозможно, так как они относятся к однородной (однослойная) среде с фиксированной геометрией. Несколько позже в работе [4] этот подход был применен к моделированию теплового состояния стены здания в окрестности закладной детали, где рассматривался фазовый переход промерзание/оттаивание. Дальнейшее развитие он получил в работах [5,6], где уже рассматривалась многослойная среда с фазовыми переходами и химическими реакциями в слоях, включая среду с переменным числом слоев (задача Стефана). Настоящая статья является обобщением и развитием упомянутых выше исследований.

Для определенности рассмотрим одномерный домен в виде принадлежащего сферической частице шарового сектора (рисунок 1а), который разобьем на m ячеек одинаковой радиальной длины Δr, считая, что в каждой малой ячейке все параметры теплофизического состояния равномерно распределены по ее объему. Связанные тепловыми потоками ячейки образуют цепь ячеек. На рисунке 1б показана выделенная j-я ячейка, ее параметры состояния и тепловые потоки из нее.



а) б)

Рисунок 1 – а) цепь ячеек шарового сектора; б) ячейка шарового сектора, ее параметры состояния и тепловые потоки из нее

Среда характеризуется теплопроводностью λ, удельной теплоемкостью c, плотностью ρ и механизмом превращений, которые могут происходить в ней при термической обработке, характеризуемой величиной теплоты Q, температурой T и содержанием фаз (при фазовых переходах) или компонентов (при химических реакциях). Свойства и параметры состояния группируются в вектор-столбцы состояния размером mx1. Например, распределение теплоты по ячейкам характеризуется вектором $\mathbf{Q}=\{Q_j\}$. Состояние процесса фиксируется в дискретные моменты времени через малые промежутки времени Δt: $t_k=(k-1)\Delta t$, где k – номер временного перехода. Кинетика процесса описывается рекуррентным матричным равенством

$$\boldsymbol{Q}^{k+1}=\boldsymbol{P}^k\,\boldsymbol{Q}^k+\boldsymbol{Q}_e^k+\boldsymbol{Q}_i^k, \tag{1}$$

где $\mathbf{P}$ – матрица переходных вероятностей, или матрица теплопроводности, $\mathbf{Q_e}$ – вектор внешних источников теплоты (нагрев или охлаждение цепи), $\mathbf{Q_i}$ – вектор внутренних источников теплоты (скрытая теплота плавления/отвердевания, теплота испарения, теплота химической реакции и т.д. Общие правила формирования матрицы P рассмотрены в работах [1,2], а применительно к процессу теплопроводности – в работах [4-6]. Ненулевые элементы этой трех-диагональной матрицы имеют вид:

$$P_{j,j+1}^k=\frac{\lambda_{j+1}^k}{c_{j+1}^k\rho_{j+1}^k}\left(1-\frac{\Delta r}{2r_{j+1}}\right)^2\frac{\Delta\tau}{\Delta r^2},j=1,\dots,m-1, \tag{2}$$

$$P_{j+1,j}^k=\frac{\lambda_{j+1}^k}{c_j^k\rho_j^k}\left(1-\frac{\Delta r}{2r_j}\right)^2\frac{\Delta\tau}{\Delta r^2},j=1,\dots,m-1, \tag{3}$$

$$P_{j,j}^k=1-P_{j+1,j}^k-P_{j-1,j}^k,j=1,\dots,m. \tag{4}$$

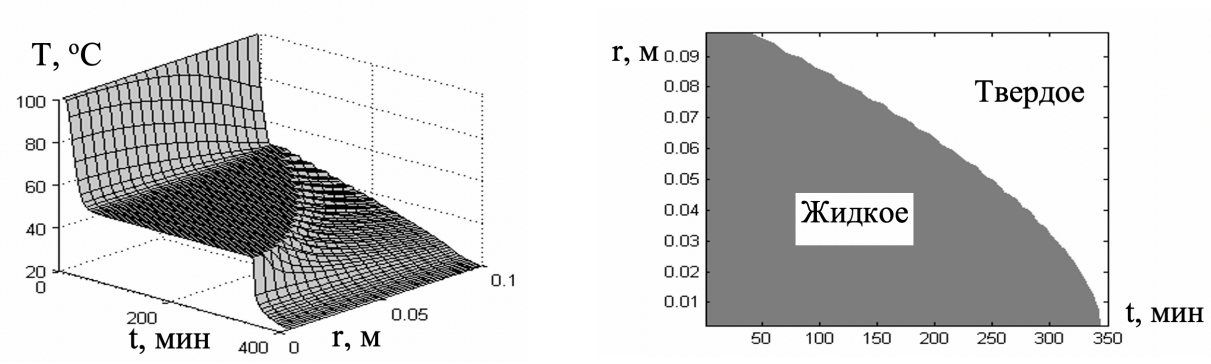
Если внешняя ячейка имеет тепловое взаимодействие с окружающей средой, то на каждом временном переходе ее состояние корректируется по формуле

$$Q_m^{k+1}:=Q_m^{k+1}+\alpha\left(T_{out}^k-T_m^k\right)S_m, \tag{5}$$

где α – коэффициент теплоотдачи, T^k_{out} – температура окружающей среды, в общем случае зависящая от времени, S_m – внешняя поверхность крайней ячейки.

Тепловой эффект происходящих в материале превращений описывается в соответствие их характеру. В частности, при плавлении, если температура в ячейке превышает температуру плавления и в ней еще присутствует твердая фаза, то температура в ней приравнивается температуре плавления, а избыточная теплота идет на плавление твердой фазы. Если твердая фаза в ячейке полностью расплавлена, то продолжается ее прогрев, но уже с другими теплофизическими свойствами. При охлаждении идет противоположный процесс.

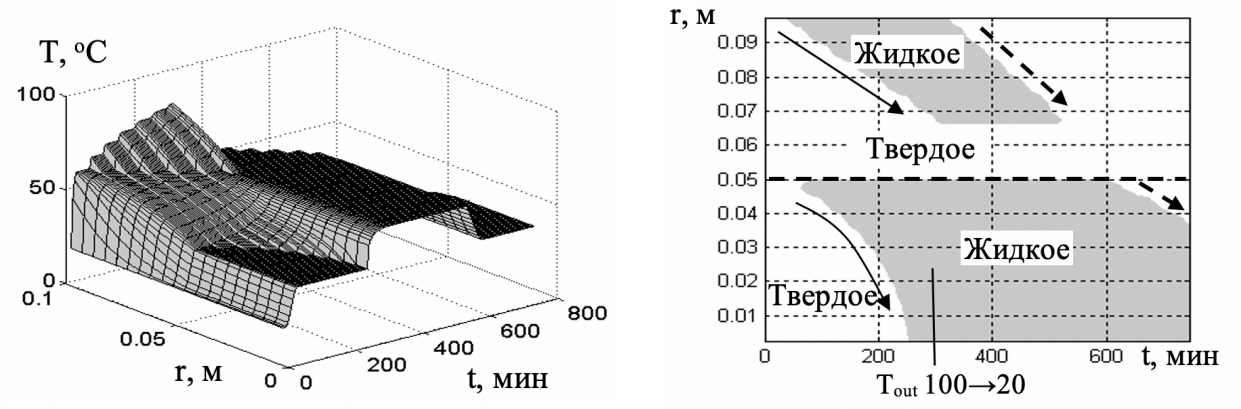
На рисунке 2 показана рассчитанная кинетика затвердевания жидкой капли с начальной температурой 100°С при помещении ее в среду с температурой 20°С при температуре затвердевания T_{me}=50°С.



а) б)

Рисунок 2 – Кинетика затвердевания жидкой капли: а) эволюция распределения температуры; б) фазовая диаграмма (λ= 0,8 Вт/м·°С. ρ= 1000 кг/м^3, c= 400 Дж/кг·°С, q_{me}=10^5 Дж/кг, R=0,1м)

На рисунке 3 показана кинетика нагрева/охлаждения двухслойного шара с различной температурой плавления слоев при ограниченном времени действия внешнего теплового источника.



а) б)

Рисунок 3 – Эволюция распределения температуры (а) и фазовая диаграмма (б) при нагреве/охлаждении двухслойного шара со скачком температуры нагрева. Внешний слой тугоплавкий (T_{me1}=60°С); внутренний слой легкоплавкий (T_{me1}=40°С)

Выводы

Стратегия моделирования нелинейной теплопроводности в многослойных средах с учетом фазовых переходов и химических реакций в слоях, базирующаяся на теории цепей Маркова, является эффективным математическим инструментом при решении разнообразных тепловых задач на универсальной алгоритмической основе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ивановской области в рамках научного проекта № 20-48-370001

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berthiaux, H., Mizonov, V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review// *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. V.85, No.6, 2004, pp.1143-1168.

2. Berthiaux, H., Mizonov, V., Zhukov, V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology// *Powder Technology,* 157 (2005) 128-137.

3. Mizonov, V., Yelin, N. Numerical study of melting a rod by a periodically moving local heat source // *Int. J. Therm. Sci.* 97 (2015). 1–8.

4. Mizonov, V., Yelin, N., Sakharov, A. Theoretical study of the thermal state of building envelop in the neighborhood of embedded item. *Applied Thermal Engineering*, 79(2015) pp.149-152.

5. Mizonov V.E., Mitrofanov A.V., Basova E.V., et al. Theoretical study of heat conduction in multilayer spherical body with phase transformation in layers. Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 7. P. 54–60.

6. Vadim Mizonov, Andrey Mitrofanov, Evgeny Barochkin, Elena Basova. A simple model to describe the non-linear heat Conduction in multi-layer body with phase transformation / JP Journal of Heat and Mass Transfer. V.21, No.2, 2020, pp.291-300.

УДК 66.011:681.5 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-19-22

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМ РЕАКТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПОВ И МЕТОДОВ СИНЕРГЕТИКИ
SYNTHESIS OF A CHEMICAL REACTOR CONTROL SYSTEM USING THE PRINCIPLES AND METHODS OF SYNERGETICS

Невиницын Владимир Юрьевич, Лабутин Александр Николаевич, Волкова Галина Витальевна
Vladimir Yu. Nevinitsyn, Aleksandr N. Labutin, Galina V. Volkova

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail: nevinitsyn@gmail.com, lan@isuct.ru, konf_gv@mail.ru)

Аннотация: Методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов решена задача аналитического синтеза робастной векторной системы управления концентрацией целевого компонента и температурой в жидкофазном химическом реакторе.

Abstract: Using the method of analytical design of aggregated regulators the problem of analytical synthesis of a robust vector control system for the concentration of the target component and the temperature in a liquid-phase chemical reactor has been solved.

Ключевые слова: химический реактор, робастное управление, аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, компьютерное моделирование.

Keywords: chemical reactor, robust control, analytical design of aggregated regulators, computer simulation.

Основной особенностью химических реакторов как объектов управления является их многомерность, нелинейность и многосвязность. Вопросы разработки систем управления химическими реакторами рассматривались в основном в линейной постановке [1, 2]. Существенным недостатком линейных систем управления является ухудшение свойства робастности замкнутой системы, и даже потеря ее устойчивости при существенных параметрических и сигнальных возмущениях. Одним из перспективных способов решения рассматриваемой задачи является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), базирующийся на синергетических принципах целевой самоорганизации нелинейных динамических систем [3]. Эффективность метода АКАР показана в ряде работ [4, 5].

В настоящей работе предложен робастный векторный алгоритм управления химическим реактором, синтезированный методом АКАР, обеспечивающий стабилизацию концентрации целевого компонента и температуры смеси в аппарате в условиях неопределенности относительно сигнальных и параметрических возмущений.

Жидкофазный химический реактор представляет собой аппарат емкостного типа, снабженный механической мешалкой и теплообменной рубашкой. В реакторе реализуется многостадийная последовательно-параллельная экзотермическая реакция: $A + B \xrightarrow{k_1} P_1$, $A + P_1 \xrightarrow{k_2} P_2$, $A + P_2 \xrightarrow{k_3} P_3$, где A и B – исходные реагенты, P_1, P_2, P_3 – продукты реакции, k_1, k_2, k_3 – константы скоростей стадий. Целью функционирования аппарата является получение компонента P_2 заданной концентрации. Математическая модель динамики химического реактора имеет вид:

$$
\begin{aligned}
\frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + M_A - b_2 x_1 - b_3 x_1 u_1, \\
\frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 - b_2 x_2 + (M_B - b_3 x_2) u_1, \\
\frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - b_2 x_3 - b_3 x_3 u_1, \\
\frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - b_2 x_4 - b_3 x_4 u_1, \\
\frac{dx_5}{d\tau} &= R_5 - b_2 x_5 - b_3 x_5 u_1, \\
\frac{dx_6}{d\tau} &= \alpha_1 k_1 x_1 x_2 + \alpha_2 k_2 x_1 x_3 + \alpha_3 k_3 x_1 x_4 + b_2 x_6^{\text{вх}1} + \beta_1 x_7 - (\beta_1 + b_2) x_6 + \\
&\qquad + (x_6^{\text{вх}2} - x_6) b_3 u_1, \\
\frac{dx_7}{d\tau} &= \beta_2 (x_6 - x_7) + b_1 (x_7^{\text{вх}} - x_7) u_2,
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где $R_1=-k_1x_1x_2-k_2x_1x_3-k_3x_1x_4$, $R_2=-k_1x_1x_2$, $R_3=k_1x_1x_2-k_2x_1x_3$, $R_4=k_2x_1x_3-k_3x_1x_4$, $R_5=k_3x_1x_4$ – скорость реакции по компонентам; $M_A=\upsilon_1 x_1^{вх}/V$; $M_B=x_2^{вх}/V$; $b_1=1/V_{хл}$; $b_2=\upsilon_1/V$; $b_3=1/V$; $\alpha_i=\Delta H_i/(\rho C)$, i=1,…,3; $\beta_1=K_TF_T/(\rho CV)$; $\beta_2=K_TF_T/(\rho_{хл}C_{хл}V_{хл})$; ΔH_i, i=1,…,3 – тепловой эффект соответствующей стадии реакции; ρ, C – плотность и теплоемкость реакционной смеси; $\rho_{хл}$, $C_{хл}$ – плотность и теплоемкость хладоагента; K_T, F_T – коэффициент теплопередачи через стенку и поверхность теплообмена аппарата; $k_i=k_i^0 exp[-E_i/R(x_6+273)]$, i=1,…,3 – константы скоростей стадий; k_i^0, i=1,…,3 – постоянный множитель (предэкспонента) констант скоростей стадий; E_i, i=1,…,3 – энергия активации соответствующей стадии реакции; R – универсальная газовая постоянная; $x_1^{вх}$, $x_2^{вх}$ – концентрация исходных реагентов; υ_1, υ_2 – расход потоков исходных реагентов; $x_6^{вх1}$, $x_6^{вх2}$ – температура потоков исходных реагентов; $\upsilon_{хл}$ – расход хладоагента на входе и выходе из аппарата; $x_7^{вх}$, x_7 – температура хладоагента на входе и выходе из аппарата; x_6 – температура смеси в аппарате; υ – расход реакционной смеси на выходе из аппарата; x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – концентрации компонентов A, B, P_1, P_2, P_3 в реакторе; V – объем смеси в аппарате; $V_{хл}$ – объем хладоагента в рубашке; $u_1=\upsilon_2$, $u_2=\upsilon_{хл}$ – управляющие воздействия.

Оптимальный режим работы химического реактора обеспечивается путем поддержания заданных значений температуры реакционной смеси и концентрации целевого продукта на выходе. Следовательно, задача системы управления аппаратом заключается в стабилизации концентрации и температуры в условиях действия возмущающих воздействий. В качестве управляющих воздействий для регулирования концентрации и температуры предлагается использовать поток исходного реагента υ_2 и расход хладоагента $\upsilon_{хл}$ на входе в аппарат.

Из классической теории управления известно, что пропорциональный регулятор не обеспечивает отслеживания изменения уставок или возмущающих воздействий по нагрузке. В связи с этим, представляется целесообразным синтезировать астатический векторный закон управления, обладающий свойством грубости (робастности). Синтез астатического векторного закона регулирования концентрации и температуры методом АКАР [3] предполагает расширение пространства состояния путем введения в исходную систему (1) двух дополнительных переменных состояния z_1, z_2, описываемых уравнениями: $dz_1/d\tau = x_4 - \bar{x}_4$, $dz_2/d\tau = x_6 - \bar{x}_6$, где x_4, $\bar{x}_4$ – текущее и заданное значения концентрации целевого компонента в реакторе; x_6, $\bar{x}_6$ – текущее и заданное значения температуры реакционной смеси в аппарате.

Поскольку математическая модель объекта (1) содержит два внешних управляющих воздействия $u_1=\upsilon_2$ и $u_2=\upsilon_{хл}$ используем метод АКАР на основе параллельно–последовательной

совокупности инвариантных многообразий [3]. Процедура синтеза алгоритма состоит из двух этапов.

Для поиска векторного закона управления $u=(u_1,\ u_2)^{\text{т}}$ на первом этапе вводятся в рассмотрение две агрегированные макропеременные: $\psi_1=(x_4-\bar{x}_4)+\gamma_1 z_1$, $\psi_2=x_7+\nu_1(x_6,z_2)$, где $\nu_1(x_6, z_2)$ – некоторая функция, определяющая желаемый характер изменения переменной x_7 на пересечении инвариантных многообразий $\psi_1=0$ и $\psi_2=0$; γ_1 – весовой коэффициент.

На втором этапе синтеза введено в рассмотрение инвариантное многообразие, отражающее технологическое требование к системе: $\psi_3=(x_6-\bar{x}_6)+\gamma_2 z_2$, где γ_2 – весовой коэффициент.

Макропеременные ψ_i, i=1, …, 3 удовлетворяют решению основного функционального уравнения метода АКАР: $T_i\dot{\psi}_i+\psi_i=0$, где T_i, – постоянная времени, i=1, …, 3.

В результате получен векторный регулятор, в котором величины управляющих воздействий определяются по формулам:

$$u_1=\frac{(x_4-\bar{x}_4)+\gamma_1 z_1}{T_1 b_3 x_4}+\frac{R_4}{b_3 x_4}-\frac{b_2}{b_3}+\frac{\gamma_1(x_4-\bar{x}_4)}{b_3 x_4},$$
$$u_2=-\frac{(x_7+\nu_1)}{T_2 b_1(x_7^{вх}-x_7)}-\frac{\beta_2(x_6-x_7)}{b_1(x_7^{вх}-x_7)}-\frac{\partial\nu_1}{\partial x_6}\cdot\frac{\left[f_6+\beta_1 x_7+(x_6^{вх2}-x_6)b_3u_1\right]}{b_1(x_7^{вх}-x_7)}-\frac{\partial\nu_1}{\partial z_2}\cdot\frac{(x_6-\bar{x}_6)}{b_1(x_7^{вх}-x_7)}, \quad (2)$$

где $\nu_1=\left[(x_6-\bar{x}_6)+\gamma_2 z_2\right]/T_3\beta_1+f_6/\beta_1+(x_6^{вх2}-x_6)b_3u_1/\beta_1+\gamma_2(x_6-\bar{x}_6)/\beta_1$;
$f_6=\alpha_1k_1x_1x_2+\alpha_2k_2x_1x_3+\alpha_3k_3x_1x_4+b_2x_6^{вх1}-(\beta_1+b_2)x_6$; $T_1>0$, $T_2>0$, $T_3>0$, $\gamma_1>0$, $\gamma_2>0$ – параметры настройки алгоритма, определяющие желаемые свойства замкнутой системы управления.

Работоспособность системы управления химическим реактором с использованием синтезированного векторного регулятора (2) исследовалась методами имитационного моделирования. На рис. 1 приведены примеры переходных процессов управления в замкнутой системе при ступенчатом изменении входной концентрации $x_1^{вх}$ в момент времени τ=50 мин. До этого момента времени переходные процессы приводятся в статическом режиме.

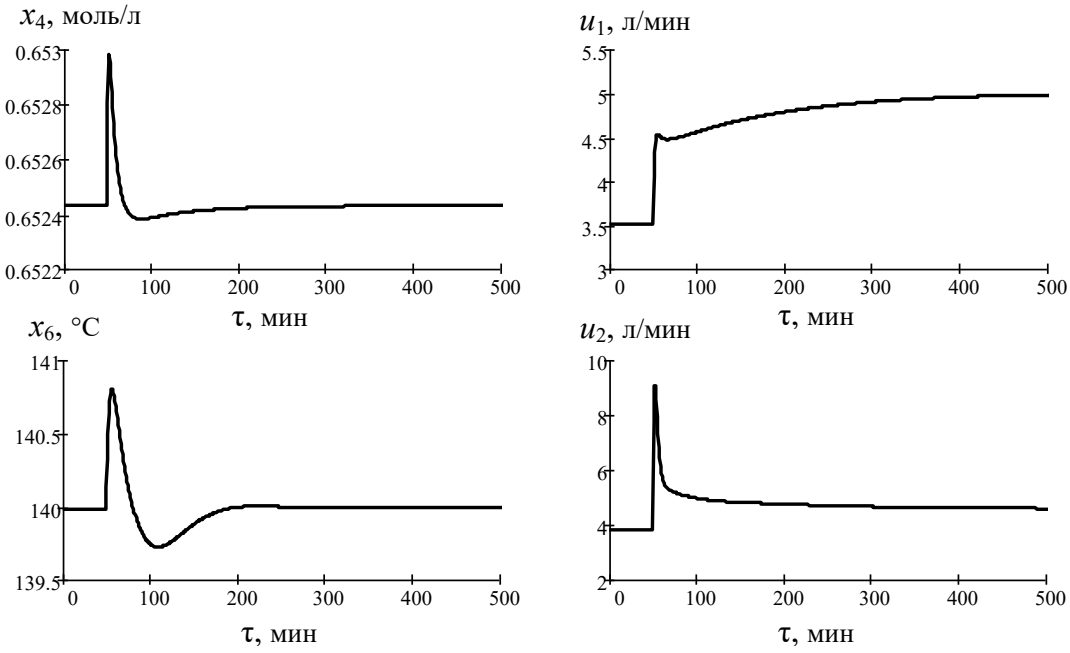


Рисунок 1 – Переходные процессы в замкнутой системе управления при ступенчатом изменении концентрации $x_1^{вх}$ на +20%

Компьютерное моделирование показало инвариантность замкнутой системы управления к возмущениям, ковариантность с задающими воздействиями и асимптотическую устойчивость, что свидетельствует о работоспособности и эффективности синтезированных алгоритмов управления рассматриваемым классом объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Medarametla P. K, Manimozhi M. Novel proportional–integral–derivative controller with second order filter for integrating processes // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2018. Volume 13, Issue 3. P. 1-18.

2. Hernandez-Osorio M. A., Ochoa-Velasco C. E., Garcia-Alvarado M. A., Escobedo-Morales A., Ruiz-Lopez I. I. Sequential synthesis of PID controllers based on LQR method // Revista Mexicana De Ingenieria Quimica. – 2020. – Vol. 19, Issue 2. – P. 913-928.

3. Колесников А. А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.

4. Невиницын В. Ю., Загаринская Ю. Н., Волкова Г. В., Лабутин А. Н. Аналитический синтез нелинейных алгоритмов управления тепловым режимом химического реактора // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. № 50 (76). С. 115-120.

5. Невиницын В. Ю., Лабутин А. Н., Волкова Г. В., Зайцев В. А., Бодров А. А. Совершенствование алгоритмов управления химическими реакторами // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2019. № 4 (42). С. 158-164.

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-23-28

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОСТЕКЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF OBTAINING FOAM GLASS BASED ON MATHEMATICAL MODELING METHODS

Федосов Сергей Викторович*, Никишов Сергей Николаевич,**
Баканов Максим Олегович**
Sergey V. Fedosov*, Sergey N. Nikishov, Maxim O. Bakanov****

**Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Россия, Москва*
**Поволжский государственный технологический университет, Россия, Йошкар-Ола*
*** Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Россия, Иваново*
**Moscow State University of Civil Engineering, Russia, Moscow*
**Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola*
(e-mail: FedosovSV@mgsu.ru)
***Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Russia, Ivanovo*
(e-mail: mordov5988@mail.ru, e-mail:mask-13@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности технологии производства блочного пеностекла, приведены результаты экспериментальных исследований свойств материала, предложен способ совершенствования производства на основе математического моделирования процессов теплопереноса.

Abstract: Some features of the production technology of block foam glass are considered, the results of experimental studies of the material properties are presented, a method for improving production based on mathematical modeling of heat transfer processes is proposed.

Ключевые слова: математическое моделирование, пеностекло, сырьевая смесь, термическая обработка, теплоперенос.

Keywords: mathematical modeling, foam glass, raw material mixture, heat treatment, heat transfer.

В современных условиях энергоресурсоэффективные технологии являются перспективными направлениями развития науки и техники. В строительной отрасли большое внимание ученых и исследователей уделяется разработке новых материалов и составов, а так же совершенствованию технологий производства перспективных материалов, к таким относится, в том числе пеностекло. Блочное пеностекло это теплоизоляционный материал обладающий уникальными свойствами, превосходящими по некоторым теплофизическим характеристикам аналогичные изделия.

На начальных этапах производства блочного пеностекла в качестве основного компонента использовали специально сваренное стекло из кондиционного сырья стекольной промышленности. В настоящее время большое распространение получило использование боя стекла. Использование боя стекла (листового или производственного) решает проблему утилизации отходов из стекла, что способствует решению ряда экологических проблем.

Анализ технологий производства пеностекла показал, что порошковая технология, впервые предложенная Китайгородским И.И. и Кешишяном Т.Н. [1], характеризуется наилучшим качеством готовой продукции по сравнению с другими.

Технологическая схема производства блочного пеностекла представлена на рисунке 1 [9].

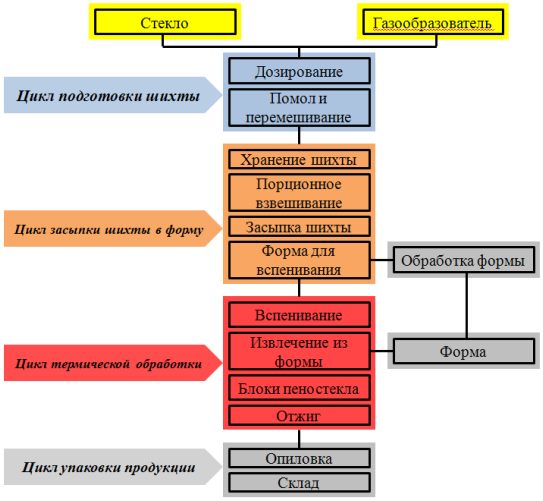


Рисунок 1 – Схема производства пеностекла по двухстадийной порошковой технологии

Технология производства блочного пеностекла порошковым двухстадийным способом заключается в следующем: в туннельную печь по керамическим роликам подается пенообразующая смесь, находящаяся в форме (рисунок 2).

В первой печи происходит нагрев, спекание, вспенивание и стабилизация (рисунок 3), затем происходит извлечение из форм блоков из пеностекла (рисунок 4).



Рисунок 2 – Загрузка пенообразующей смеси в формы



Рисунок 3 – Элемент печи нагрева, спекания, вспенивания и стабилизации



Рисунок 4 – Этап извлечение блоков пеностекла из форм

Пустые формы по конвейерной ленте возвращаются на этап разгрузки пенообразующей смеси (рисунок 5), а извлеченные блоки перемещаются в печь отжига (рисунок 6).



Рисунок 5 – Общий вид конвейерной ленты



Рисунок 6 – Общий вид печи отжига

Основу порошкового способа производства пеностекла составляет следующее: молотое стекло и газообразователь (0,5–5% от массы стекла) засыпают в формы, нагревают до вспенивания и охлаждают [10].

При увеличении температуры частицы стекла размягчаются. Для большинства стекол активация происходит при температурах порядка 600 °С. Показатели вязкости измельченного стекла в этот период остаются высокими. При дальнейшем нагревании происходит термическое разложение газообразователя, а показатели вязкости начинают снижаться. Газы

при начале термического разложения газообразователя формируют в расплаве стекла поры. Такая кинетика процесса приводит к росту диаметра поры за счет растяжения оболочки из стекломассы. При достижении заданных размеров процесс нагрева останавливается, и происходит снижение температуры для стабилизации структуры пеностекла.

При разработке и совершенствовании технологии производства пеностекла с учетом особенностей высокотемпературной обработки и временных параметров его получения исследователи работают в двух основных направлениях. Первое заключается в экспериментальном определении возможных составов сырьевых смесей для получения пеностекла и режимов термообработки методом корректировки количественных показателей составов сырьевой смеси [6]. Второе направление исследований базируется на разработке теоретических и численных методов моделирования теплофизических процессов, происходящих при получении пеностекла [8]. Второе направление представляется наиболее перспективным в части исследования технологии получения пеностекла, так как позволяет раскрыть закономерности формирования структуры материала, учесть внешние и внутренние факторы, способствующие оптимизации процесса его получения. Однако стоит отметить, что без результатов, полученных исследователями, применяющими в своих работах первый экспериментальных подход, было бы практически невозможно развитие теоретических основ, поэтому необходимо, чтобы теория и практика были в симбиозе и дополняли, а также подтверждали полученные результаты.

Моделирование процессов термической обработки осуществляется на основе теории теплопереноса, которая позволяет учитывать влияние макрофизических параметров друг на друга. При разработке математической модели способной учитывать изменение физико-химических свойства сырьевой шихты возникают затруднения, для решения которых требуется применение упрощенных (или приближенных) математических моделей переноса тепла [7].

Теоретической основой исследований процессов тепломассопереноса в результате воздействия высокой температуры на материал, является система дифференциальных уравнений, полученная А.В. Лыковым и разработанные им физические представления о механизме удаления влаги [2].

Применение точных аналитических методов для решения нелинейных задач практически не возможно современными методами математического анализа, поэтому все большую популярность приобретают численные методы. Решение дифференциальных уравнений в частных производных реализуется с помощью компьютерных программ. Описанные подходы применимы, когда уже установлены закономерности теплопереноса, поэтому требуется получения уравнений для более простых моделей, в связи с чем на первых этапах моделирования целесообразно задать граничные условия и решить плоскую задачу для одной из координат (рисунок 7).

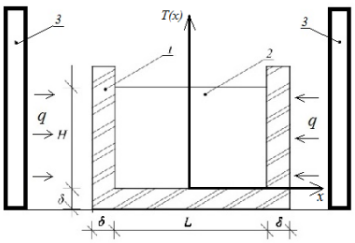


Рисунок 7 – Геометрическая модель используемая для постановки задачи:
1- металлическая стенка формы; 2- сырьевая смесь;
3- источник тепла; δ, L – толщина стенки формы и сырьевой смеси.

В этих условиях краевая задача теплопереноса в сырьевой смеси, находящейся в металлической форме, запишется следующим образом:

$$\rho c \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2}; \tau > 0; 0 \le x \le \frac{L}{2} \quad (1)$$

где ρ, с, λ – соответственно: плотность, теплоемкость и теплопроводность сырьевой смеси.

- начальное условие:

$$t(x,\tau)|_{\tau=0} = t_0(x) \quad (2)$$

- граничные условия, соответственно, первого и второго рода:

$$t(x,\tau)|_{x=0} = t_{\text{н}} \quad (3)$$

$$\left.\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x}\right|_{x=\frac{L}{2}} = 0 \quad (4)$$

Для решения краевой задачи теплопроводности применяется метод интегрального преобразования Лапласа [4].

Окончательное решение краевой задачи теплопроводности выглядит следующим образом:

$$T(\bar{x}, Fo) = 1 - \frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)}\sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{x}\right]\cdot\exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right] + 2\sum_{n=1}^{\infty}\sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{x}\right]\cdot\int_0^1 T_0(\xi)\cdot \sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\xi\right]d\xi\cdot\exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right] \quad (5)$$

Преобразуем уравнение (5) в размерный вид:

$$t(x,\tau) = t_{н} - (t_{н} - t_0)\cdot\left(\frac{4}{\pi}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)}\sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\cdot\bar{x}\right]\cdot\exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right] + 2\sum_{n=1}^{\infty}\sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\cdot\bar{x}\right]\cdot\int_0^1 T_0(\xi)\cdot\sin\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\cdot\xi\right]d\xi\cdot\exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right]\right) \quad (6)$$

Для проверки адекватности разработанной математической модели была проведена серия лабораторных и численных экспериментов. Блок из пеностекла был снят с конвейера на стадии извлечения блоков из форм (станция извлечения) и размещен на поддоне (на воздухе). На блоке были зафиксированы термопары (рисунок 8).

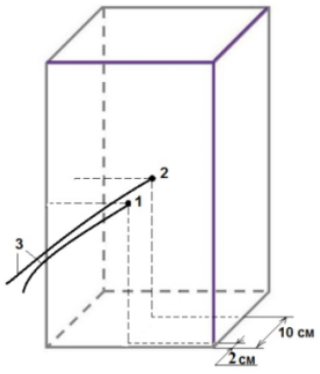


Рисунок 8 – Схема размещения термопар на исследуемом блоке: 1 – расположение термопары на поверхности; 2 – расположение термопары в центре; 3 – термопары для измерения температуры.

Значения показаний термопар в процессе охлаждения блоков фиксировались специализированным прибором - регистратор температуры DATAPAQ, длина термопар 2 метра при диаметре 1,6 мм. Начальная температура блока 600 ^{0}C. Температура поверхности 25 ^{0}C, соответствует температуре окружающей среды в момент проведения эксперимента. Толщина блока 20 см. Полученные экспериментальные данные показаны в таблице 1.

По уравнению (6) проведены численные расчеты. При этом исходные данные принимались такими же, как при эксперименте. Полученные расчетные данные показаны в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, результаты расчетных данных отличаются от экспериментальных на 11,2 %, что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные значения температур для блока из пеностекла на глубине 2 см от поверхности

Время, мин	Температура на поверхности, ºС		Время, мин	Температура на поверхности, ºС	
	экспериментальные данные	расчетные значения		экспериментальные данные	расчетные значения
1	515	584	100	177	188
10	433	509	110	163	183
20	378	417	120	151	173
30	338	361	130	140	165
40	305	296	140	130	161
50	276	275	150	121	154
60	251	245	160	112	147
70	229	223	170	105	144
80	210	214	180	98	138
90	192	200	190	92	133
Среднее значение температуры				220,8	245,5

На следующем этапе исследований проведена серия экспериментов, направленных на определение технологического режима, позволяющего получать пеностекло с наилучшими теплофизическими характеристиками путем комбинации следующих факторов:

1) Процентное отношение газообразователя от всего объема сырьевой смеси, % - x_1;

2) Время термической обработки при вспенивании сырьевой смеси, мин. - x_2;

3) Температурный режим термообработки, ^{0}C - x_3.

При этом в качестве основных критериев качества были выбраны коэффициент теплопроводности и плотность. Результаты экспериментов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Теплофизические характеристики полученного пеностекла

№ опыта	x_1	x_2	x_3	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Плотность, кг/м^3
1	5	60	850	0,086	290
2	3	60	850	0,099	340
3	5	30	850	0,071	231
4	3	30	850	0,068	229
5	**5**	**60**	**750**	**0,061**	**190**
6	3	60	750	0,064	214
7	5	30	750	0,074	243
8	3	30	750	0,079	261

Наилучшими теплофизическими показателями обладали образцы, полученные при равномерном нагреве сырьевой смеси с 5 % содержанием газообразователя в печи с 20 ^{0}C до температуры 750 ^{0}C со скоростью роста температуры 15 ^{0}C в минуту, при этом температура в печи повышалась до 750 ^{0}C за 50 минут и поддерживалась в течение 60 минут. Затем осуществлялось отключение печи, что приводило к понижению температуры до начальных значений, и через 170 минут температура в печи снижалась до 30 ^{0}C (рисунок 9).

В ходе экспериментальных исследований по разработанной математической модели предлагается изменить технологический режим, а именно применить циклические режимы нагрева (рисунок 10).

Согласно проведенным расчетам, по ранее полученному уравнению (6), установлены промежутки времени, при которых реализуется равномерный нагрев центра и поверхности сырьевой смеси.

Рассчитанный оптимальный температурный режим позволяет в течение 60 минут отключать печь для вспенивания и использовать эти промежутки времени для выравнивания температур в толще сырьевой смеси, что в конечном итоге позволяет получать материал с улучшенными свойствами на 5%, чем при режиме, когда осуществляется непрерывная работа печи для вспенивания.

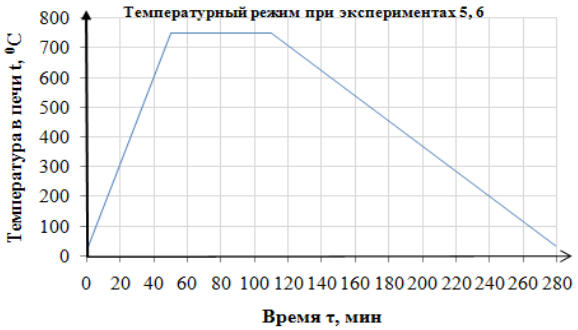


Рисунок 9 – Температурные кривые условий термической обработки

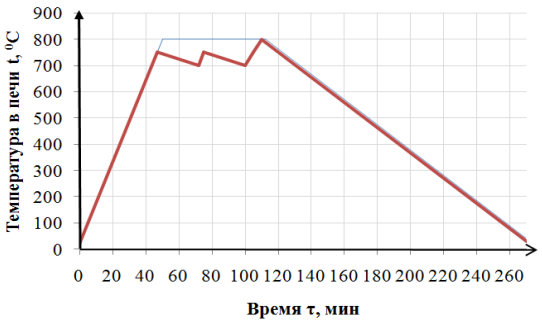


Рисунок 10 – Оптимальный температурный режим получения пеностекла

Выводы. Перспективы дальнейших исследований связаны с применением зонального метода расчета описанного С.П. Рудобаштой в работе [3], что позволит повысить точность расчетов математической модели при этом не усложняя метод расчета, а применение зонального метода расчета в совокупности с методом «микропроцессов», предложенный в работе [5], позволит свести время всего процесса в цепочку малых промежутков времени «микропроцессов». Теплофизические параметры фаз в течении каждого периода будут приниматься постоянными, что позволяет свести нелинейную задачу к нескольким линейным задачам теплопереноса, что в совокупности упростит расчет и повысит точность расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидович Б.К. Пеностекло. Минск: Наука и техника, 1975 г., 248 с.
2. Лыков А.В., Михайлов Ю.А., Теория тепло- и массопереноса. М.-Л., «Госэнергоиздат», 1963, 536 стр.
3. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – Москва, 1980. – 248 с.
4. Федосов С.В., Баканов М.О., Никишов С.Н. Вариативность подходов к математическому моделированию процессов термической обработки пеностекольной шихты // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 110–116.
5. Федосов С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии : монография / С. В. Федосов. – Иваново: ПрессСто, 2010. – 364 с.
6. S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, S.N. Nikishov, Study and simulation of heat transfer processes during foam glass high temperature processing, International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. (2018) 14(3) 153–160.
7. S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, S.N. Nikishov, Kinetics of Cellular Structure Formation at Thermal Treatment Processes Simulation in the Cellular Glass Technology, Materials Science Forum Submitted. 2018. Vol. 931, pp 628–633.
8. S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, S.N. Nikishov, Kinetics of structural transformations at pores formation during high-temperature treatment of foam glass, International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. 14(2). pp. 158–168.
9. S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, S.N. Nikishov, Modeling of Macro-Physical Parameters of Foam Glass under Exposure of Cyclic Thermal Effects, Materials Science Forum Submitted. 2019. Vol. 974. pp. 464–470.
10. S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, S.N. Nikishov, Parametric optimization of the thermal processing of foam glass on basis of heat transfer models, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709. 044047.

УДК: 542.223 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-29-33

КИНЕТИКА ИСТИРАНИЯ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ
THE KINETICS OF ABRASION OF GRANULAR MATERIALS IN A FLUIDIZED BED LAYER

Воробьев Сергей Владимирович *, Постникова Ирина Викторовна **, Блиничев Валериан Николаевич ***
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)
***Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново*
Ivanovo State University of Chemical Technology, Ivanovo, Russia
(e-mail: poirvic@mail.ru)
****Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново*
Ivanovo State University of Chemical Technology, Ivanovo, Russia
(e-mail: blinich@isuct.ru)

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования процесса истирания зернистых материалов, на основании которых предложено уравнение, позволяющее рассчитать массу продукта в зависимости от конструктивных параметров газораспределительной решетки, технологических параметров и физико-механических свойств материала с возможностью применения его для расчета производительности аппаратов непрерывного действия одного-, двух- и трех-ступенчатого типа.

Abstract: The results of an experimental study of the process of abrasion of granular materials are presented, on the basis of which an equation is proposed that allows calculating the mass of the product depending on the design parameters of the gas distribution device, technological parameters and physical and mechanical properties of the material with the possibility of using it to calculate the performance of continuous-action apparatus of one-, two- and three-stage type.

Ключевые слова: псевдоожиженный слой, измельчение, кинетика истирания
Keywords: fluidized bed layer, grinding, abrasion kinetics

Введение:

Физическую модель процесса измельчения твердых частиц в псевдоожиженном слое можно представить следующим образом: частицы твердой фазы разрушаются в следствии двух параллельно протекающих процессов: истирания частиц в псевдоожиженном слое и разрушения их в результате соударений.

Таким образом, в псевдоожиженном слое можно выделить две зоны, в которых измельчение частиц происходит двумя разными способами. Первая зона – надрешеточная (до 0,05 м), в которой совместно с истиранием частицы испытывают значительные ударные нагрузки вследствие «соплового эффекта струй» энергоносителя [1]. В связи с чем, процесс разрушения частиц на крупные части протекает, в основном, лишь в надрешеточной зоне псевдоожиженного слоя.

Вторая зона охватывает остальную область псевдоожиженного слоя, лежащую выше первой зоны. Уменьшение линейного размера частиц δ во второй зоне происходит вследствие истирания материала в результате интенсивного циркуляции частиц твердой фазы. Разрушение частиц на крупные части в этой зоне не происходит вследствие сравнительно небольшой кинетической энергии их движения.

Наглядное отображение этих зон представлено на рисунке 1, на котором представлен результат численного моделирования распределения поля скоростей газовой фазы в

программе Solidworks Flow Simulations. В качестве исходных данных принято: диаметр аппарата $d_{ап} = 0{,}13$ м; диаметр отверстий газораспределительной решетки $d_{отв} = 0{,}003$ м; значение живого сечения решетки $\varphi = 5\%$; рабочая скорость газовой фазы $\upsilon_г = 3$ м/с; энергоноситель – воздух.

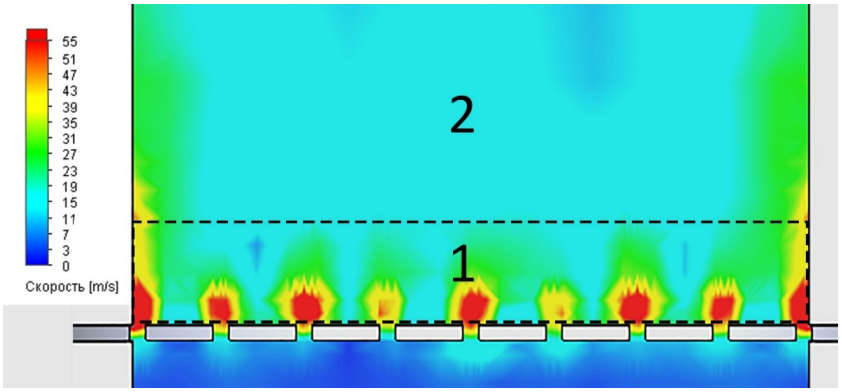


Рисунок 1 - Результаты численного моделирования распределения поля скоростей газовой фазы в объеме псевдоожиженного слоя: зоны измельчения:1-зона разрушения и истирания; 2 -зона истирания

Значимость той или иной зоны для процесса измельчения может изменяться в зависимости от параметров псевдоожижающего агента, физико-механических свойств материала и конструкции газораспределительной решетки.

Методика эксперимента

Для исследования влияния конструкции газораспределительной решетки на процесс истирания зернистых материалов в псевдоожиженном слое нами были проведены эксперименты по истиранию материалов на решетках с различными живыми сечениями φ 1 %, 2 %,3 %,5 %,10 % и 20 %. Для каждого живого сечения варьировались диаметры отверстий $d_{отв}$ 0,001 м, 0,002 м, 0,003 м, 0,004 м,0,005 м, 0,006 м и 0,008 м. В качестве модельного материала использовались частицы известняка различных фракций. Замеры скорости воздуха внутри аппарата производились с помощью термоанемометра смарт-зонда Testo 405 i. Виртуальное моделирование гидравлики внутри аппарата проводились в виртуальной среде Solidworks Flow Simulations.

Результаты и их обсуждение

Из литературных источников [2, 3] известно, что интенсивность и стабильность многих процессов химической технологии, осуществляемых в аппаратах с псевдоожиженным слоем определяется гидродинамической обстановкой, которая в значительной степени зависит от работы газораспределительной решетки. Таким образом, характер истирания зернистых материалов и преобладание той или иной зоны измельчения в аппарате комбинированного действия во многом будет зависеть от конструкции газораспределительных решеток [4, 5].

На рис. 2 приведены кинетические кривые истирания $CaCO_3$ с изменениями живого сечения φ газораспределительных решеток при постоянной скорости псевдоожижащего воздуха $\upsilon_г$=3 м/с.

Как видно из графика, при уменьшении живого сечения φ решетки от 20 % до 3%, максимальная скорость истирания Y_{max} частиц слоя возрастает (под скоростью истирания Y будем понимать отношение приращения пылевидного продукта в процентах по весу слоя к единице времени – секунде). Это связано со значительным ростом скорости истечения воздушных струй из отверстий решетки, а значит и увеличением кинетической энергии $E_{кин}$, воспринимаемой частицами от среды, возрастанием при этом подвижности частиц, числа и силы соударений между ними в надрешёточной области, в результате чего возникает непрерывное дробление частиц на более мелкие части и интенсивное истирание поверхности как мелких, так и крупных частиц.

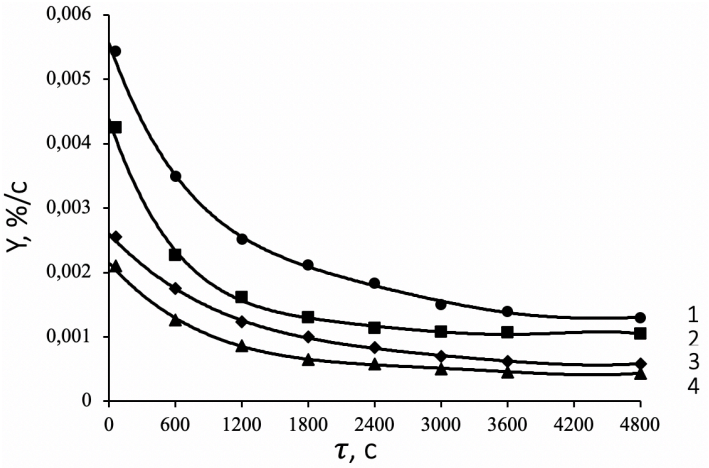


Рисунок 2 – Влияние живого сечения φ газораспределительной решетки на максимальную скорость истирания Y_{max} частиц $CaCO_3$;
исходные данные: $\upsilon_г$=3м/с, $d_{отв}$=0,002 м; Y=0,002÷0,0025 м, H_0=0,1 м;
живое сечение φ: 1-3%; 2-5%, 3-10%, 4-20%.

Помимо живого сечения φ на интенсивность истирания частиц большое влияние также оказывает диаметр отверстий $d_{отв}$ решетки [6]. Исследование влияния диаметра отверстий $d_{отв}$ решетки на скорость истирания Y зернистых материалов проводилось при живом сечении φ=3%, рекомендуемое рядом авторов [7, 8], как оптимальное для цилиндрических аппаратов.

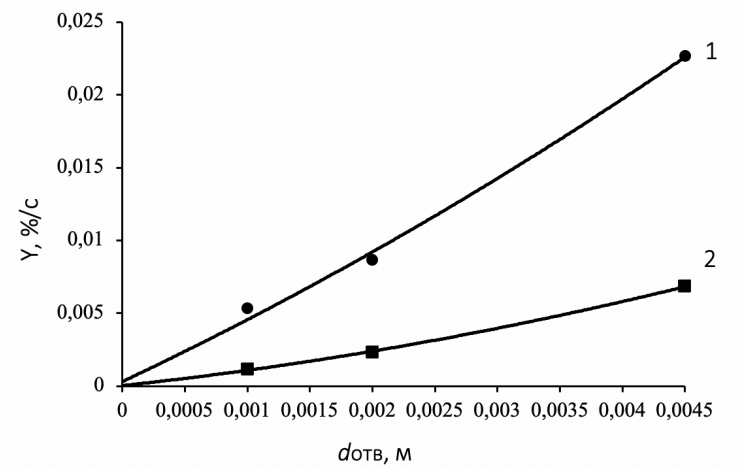


Рисунок 3 – Влияние диаметра отверстий $d_{отв}$ газораспределительной решетки на изменение скорости истирания Y частиц $CaCO_3$;
исходные данные: $\upsilon_г$=3 м/с, φ =3%; $d_{тв}$=0,002÷0,0025 м, H_0=0,1 м;
скорость истирания Y: 1- Y_{max}; 2-Y_{const}

Обработка экспериментальных данных показывает, что с увеличением диаметра отверстий $d_{отв}$ от 0,001 до 0,0045 м максимальная Y_{max} и постоянная Y_{const} скорости истирания частиц слоя непрерывно растут (рис. 3). Это объясняется повышением дальнобойности и мощности струй воздуха [9, 10**Error! Reference source not found.**], вытекающих из отверстий решетки.

При максимальном диаметре отверстий $d_{отв}$ =0,007÷0,008 м мощность струй воздуха достигает такого значения, что слой из псевдоожиженного состояния переходит в режим фонтанирующего псевдоожижения. При тонких слоях (H_0 =0,1÷0,15 м) можно визуально наблюдать фонтанирование слоя, причем, обычно число фонтанов равно числу отверстий решетки.

При уменьшении диаметра $d_{\text{отв}}$, увеличивается скорость истечения и мощностью струй энергоносителя, истекающих из отверстий решетки, что приводит к более интенсивному энергообмену фаз, увеличению силы и числа соударений между частицами. Соответственно, с увеличением диаметра отверстий $d_{\text{отв}}$ решетки растет КПД псевдоожиженного слоя – как измельчителя.

Результаты анализа полученных экспериментальных данных можно обобщить и представить в виде функциональной зависимости:

$$\Delta G = f(\upsilon_{\text{г}}, d_{\text{тв}}, \rho_{\text{тв}}, \rho_c, \mu, g, \Phi, G_{\text{слоя}}, \sigma_{\text{сж}}, d_{\text{отв}}, \varphi\ , \tau) \quad (1)$$

где: ΔG – количество пыли, кг; $G_{\text{слоя}}$,- вес слоя, кг; $\rho_{\text{тв}}$ и ρ_c – плотность твердого материала и плотность среды, кг/м^3; μ - динамическая вязкость псевдоожижающей среды, м^2/с; g – ускорение свободного падения, м/с^2, $\sigma_{\text{сж}}$-предел прочности материала на сжатие, МПа.

Метод анализа размерностей и обработка экспериментальных данных позволяет привести функциональную зависимость к критериальному виду:

$$\frac{\Delta G}{G_{\text{слоя}}} = 1{,}75 \cdot 10^3 \Phi Fr^{1,3} Ho^{0,6} \pi_1^{-1,3} \left(\frac{\rho_c}{\rho_{\text{тв}}}\right)^{1,3} \cdot 10^{\frac{0{,}21 d_{\text{отв}}}{d_{\text{тв}}} - 18\varphi} \quad (2)$$

В критериях $Fr = \frac{\upsilon^2}{g d_{\text{тв}}}$ и $Ho = \frac{\upsilon_{\text{г}} \tau}{d_{\text{тв}}}$ за определяющий линейный размер принят средний начальный диаметр частицы $d_{\text{тв}}$. $\pi_1 = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\upsilon^2 \rho_c}$ – комплекс, отражающий соотношение между пределом прочности материалов на сжатие и кинетической энергией потока; $10^{\frac{0{,}21 d_{\text{отв}}}{d_{\text{тв}}} - 18f}$ – комплекс, отражающий особенности конструкции газораспределительной решетки.

Формула (2) проверена в пределах: $Fr = 40 \div 3000$; $Ho = 0 \div 6000000$; $\frac{d_{\text{отв}}}{d_{\text{тв}}} = 0{,}2 \div 5{,}0$; $\varphi = 0{,}006 \div 0{,}05$; $\pi_1 = 1{,}4 \cdot 10^5 - 1{,}5 \cdot 10^5$; $\frac{\Delta G}{G_{\text{слоя}}} = 0{,}07 \div 63\%$. Раскрывая значение критериев и комплексов, уравнение (2) можно привести к более простому виду:

$$\Delta G = \frac{90 \Phi G_{\text{слоя}} {\upsilon_{\text{г}}}^{5,8} {\rho_c}^{2,6} 10^{\frac{0{,}21 d_{\text{отв}}}{d_{\text{тв}}} - 18\varphi}}{{d_{\text{тв}}}^{1,9} {\sigma_{\text{сж}}}^{1,3} {\rho_{\text{тв}}}^{1,3}} \tau^{0,6} \quad (3)$$

Для того чтобы уравнение (3) можно было использовать для расчета процесса истирания частиц в аппарате непрерывного действия, необходимо ввести в него поправочный коэффициент (K) , учитывающий отклонения величины действительного времени пребывания, а также вместо τ подставить среднее время пребывания частицы в аппарате.

Поправочный коэффициент K для аппарата непрерывного действия равен: для одноступенчатого аппарата - $K = 0{,}894$; для двухступенчатого аппарата - $K = 0{,}947$; для трехступенчатого аппарата - $K = 0{,}967$.

Выводы

1. Надрешоточная зона является поставщиком не только тонкодисперсных частиц, но также и большого количества крупных осколков неправильной формы разрушившихся частиц, энергия которых расходуется на интенсивный процесс истирания острых углов осколков в объёме вихревого движения частиц псевдоожиженного слоя.

2. Обобщая исследования газораспределительных решеток, необходимо отметить, что если нужно иметь сравнительно однородное псевдоожижение и минимальное истирание частиц, то в цилиндрическом аппарате должна решетка с живым сечением 3-5 % и с возможно меньшим диаметром отверстий.

3. Проведена обработка экспериментальных данных по влиянию конструктивных параметров газораспределительной решетки, технологических параметров и физико-механических свойств материала. Получена эмпирическая зависимость, позволяющая рассчитать массу продукта

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров В.Н., Шабалин А.С., Сопин В.Ф., Петров С.В., Малышев С.Л. Исследование взаимодействия турбулентной осесимметричной струи с преградой // Вестник Казанского технологического университета, т. 20. №. 2. 2017. С. 93-96.

2. Heng P.W.S., Chan L.W., Lee C.C. Ultrafine grinding using a fluidized bed opposedjet mill: effect of process parameters on the size distribution of milled particles // *S.T. P. PharmaSciences.* 2000. N 10, P 445-451.

3. Vogel L., Peukert W. Modelling of grinding in an Air Classifier Mill Based on a Fundamental Material Function // *KONA.* 2003. N 21. P 109-120

4. Агапов Ю.Н., Лукьяненко В.И., Бырдин А.П., Стогней В.Г. Влияние высоты псевдоожиженного слоя на параметры газораспределительной решётки // Вестник ВГТУ. Серия: Энергетика. Т. 2. №6. 2006. С. 139-143.

5. Калашникова Н.В., Волженцев А.В. Совершенствование технологического процесса сушки зерна пшеницы с обоснованием параметров сушилки с псевдоожиженным слоем // Вестник аграрной науки. V. 16. N. 1. 2009. P. 44-45.

6. Волженцев А.В. Определение качества ожижения зерна в сушилках // Образование, наука и производство. N. 4 (9). 2014. P. 4-7.

7. Гвоздев Д.В., Сальников А.А., Фомичев А.Г. Расчет и конструирование аппаратов с псевдоожиженным слоем зернистого материала. Газораспределительные решетки // Изв. МВО СССР, Серия Химия и химич. тех. № 4. 1963. с.38.

8. Грек Ф. З. О геометрических характеристиках газораспределительных решеток. // Хим. пром. 1966. с.67-68

9. Афанасьева О. В., Мингалеева Г. Р. Аппарат для получения активированного угля на мини-тэс. Известия Томского политехнического университета // Инжиниринг георесурсов. Т. 330. №. 9, 2019. P. 42-50.

10. Тодес О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: (Гидравл. и тепловые основы работы) Л.: Химия: Ленингр. отд-ние. 1981. 296 с.

УДК: 542.223 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-34-37

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
USE OF DISCRETE DYNAMIC MODELS FOR ANALYSIS OF NONLINEAR HEAT CONDUCTIVITY PROBLEMS

Бобков Сергей Петрович
SergeyP. Bobkov

Ивановский государственный химико-технологический университет – ИГХТУ
(e-mail: bsp@isuct.ru)

Аннотация: Рассмотрены вопросы использования систем клеточных автоматов для моделирования нелинейных процессов теплообмена с учетом неоднородности материала и наличия в нем объемных источников тепла переменной мощности.

Abstract: The issues of using systems of cellular automata for modeling nonlinear heat transfer processes taking into account the heterogeneity of the material and the presence of volumetric heat sources of variable power in it are considered.

Ключевые слова: дискретное моделирование; клеточные автоматы; нелинейные задачи теплопроводности

Keywords: discrete simulation; cellular automata; heat transfer; nonlinear heat conduction problems.

Классические подходы к моделированию тепловых процессов предполагают математическую формализацию фундаментальных законов переноса в виде дифференциальных уравнений с частными [1,2]. Однако практика показала, что использование данных подходов в ряде случаев затруднено[3–6]. В частности это касается задач с криволинейными границами или при исследовании неоднородных сред. В таких случаях можно рекомендовать использование моделей в виде дискретных динамических систем [7,8].Перспективность использования дискретных методов основывается на постулате, согласно которому поведение системы определяется локальными взаимодействиями составляющие её частей[9]. Одной из разновидностей дискретных динамических моделей являются системы клеточных автоматов[7,8].

Клеточный автомат состоит из набора неделимых пространственных элементов (клеток). Каждая клетка функционирует как абстрактный автомат. Рассматривая поведение отдельной клетки [10], необходимо учитывать следующее.

Каждая отдельная клетка представляет собой объект, функционирующий в дискретные моменты времени $t_0<t_1<t_2<\ldots$, принадлежащие множеству T. В конкретный момент времени $t_k \in T$клетка находится в одном из возможных состояний $z(t_k)$, принадлежащих множеству Z. На клетку могут осуществляться внешние воздействия $x(t_k)$, на которые она реагирует, изменяя свое состояние. Реакция клетки заканчивается за один шаг дискретного времени.

Поскольку каждая клетка имеет соседей, с которыми она контактирует, именно соседи осуществляют на нее внешние воздействия. В свою очередь, сама клетка воздействует на соседей. Таким образом, поведение клеточного автомата в целом, как совокупности клеток, полностью определяется локальными взаимодействиями отдельных элементов.

Рассмотрим общую методологию создания модели в виде системы клеточных автоматов [11].

Прежде всего, непрерывное модельное пространство разбивается на клетки по функциональному признаку. Основной целью дискретизации пространства является получение таких клеток, пространство внутри которых функционально однородно. То есть, размеры полученных клеток должны быть такими, чтобы параметры процессов внутри них можно было считать не зависящими от пространственных координат. При этом единственной

независимой переменной для описания поведения каждой клетки останется время. Следует заметить, что описанный подход к разбиению модельного пространства позволяет заполнить небольшими клетками объекты произвольной формы. Поэтому значительно уменьшаются трудности, возникающие при моделировании объектов с криволинейными границами.

После разбиения модельного пространства следует получить функциональные зависимости, описывающие поведение полученных клеток. Зависимости должны формально связывать состояния клеток и воздействия на них. При этом используются общие законы конкретного моделируемого процесса. Так, для тепловых процессов состояние клетки может однозначно определяться температурой, а внешними воздействиями будут являться потоки тепла. Важно отметить, что полученные зависимости будут содержать физические характеристики материала отдельной клетки. Следовательно, решаются вопросы учёта неоднородности исследуемой среды. Таким образом, получается взаимосвязанный массив клеток, поведение которых в дискретном времени будет подчиняться законам моделируемого процесса.

Согласно приведенной методике процедура построения клеточно-автоматной модели процесса теплопереноса по молекулярному механизму в двухмерной постановке будет следующая [12]. Плоский объект (пластина) разбивается на клетки квадратной формы с шагом h. Каждая клетка идентифицируется именем i,j, то есть дискретными координатами по горизонтали и вертикали.

Используя закон Фурье, после соответствующих преобразований можно получить выражение для описания поведения клетки i,j в момент времени t_k..

$$T_{i,j}(t_{k+1}) = T_{i,j}(t_k) + \frac{\Delta t}{C_{i,j}\rho_{i,j}} \sum q_{i,j}(t_k), \qquad (1)$$

где: $T_{i,j}(t_{k+1})$ и $T_{i,j}(t_k)$– температуры (состояния) клетки в моменты времени t_{k+1}и t_kсоответственно;$C_{i,j}$и $\rho_{i,j}$– теплоемкость и плотность материала клетки; Δt–шаг по времени;

$q_{i,j}(t_k)$ – тепловые потоки между клеткой и её соседями.

В свою очередь тепловые потоки рассчитываются достаточно тривиально, например тепловой поток от клетки i,j к клетке i+1,j:

$$q_{i,j \to i+1,j}(t_k) = \lambda_{i,j} \frac{[T_{i,j}(t_k) - T_{i+1,j}(t_k)]}{h^2}, \qquad (2)$$

где $\lambda_{i,j}$- коэффициент теплопроводности материала клетки; h –шаг по координатам.

Выражения (1) и (2) позволяют определить изменение температуры клеток системы на каждом шаге дискретного времени. Дискретный подход позволяет также успешно моделировать объекты, в которых находятся источники или стоки тепла, как локальные, так и объёмные. При этом в правую часть уравнения (1) вводится дополнительное слагаемое, учитывающее выделение (поглощение) тепловой энергии.

В качестве примера рассмотрим имитацию процесса горения плоской модельной пластины, которая «поджигается» в центре мгновенным тепловым импульсом. Здесь мы имеем квазилинейную задачу, в которой удельная мощность источников тепла прямо пропорционально зависит от температуры. Пластина была разбита на 1681 клеток с шагом 1 мм. В исходном состоянии начальная температура была принята равной 0 условных градусов. Теплофизические характеристики материала принимались следующими: удельная теплоемкость 1000 Дж/(кг·К); плотность 1500 кг/м^3; теплопроводность 1,5 Вт/(м·К). Величина шага моделирования по времени равнялась 0,005 с. При имитации процесса предполагалось, что теплоотдача в окружающую среду отсутствует.

Результаты моделирования приведены на рис. 1, где показаны профили температуры в последовательные моменты времени, указанные в правом верхнем углу. По горизонтальным осям отложены размеры пластины, по оси аппликат – температура в условных единицах. Анализ рис. 1 показывает, что в области точки воздействия начального импульса образуется своего рода «факел», что в реальных условиях характерно для начальных периодов процесса горения.

Для демонстрации возможностей дискретного подхода рассмотрим теплоперенос в неоднородном материале, для чего внесем изменения в предыдущую задачу. Положим, что в исследуемой пластине содержится участок из материала, теплопроводность которого на два порядка ниже, чем для основной части пластины. Остальные параметры задачи оставим прежними. Полученные результаты приведены на рис. 2, из которого видно, что температура аномального участка резко выделяется на общем тепловом поле. Кроме того, сам процесс прогрева происходит медленнее, чем в предыдущем примере.

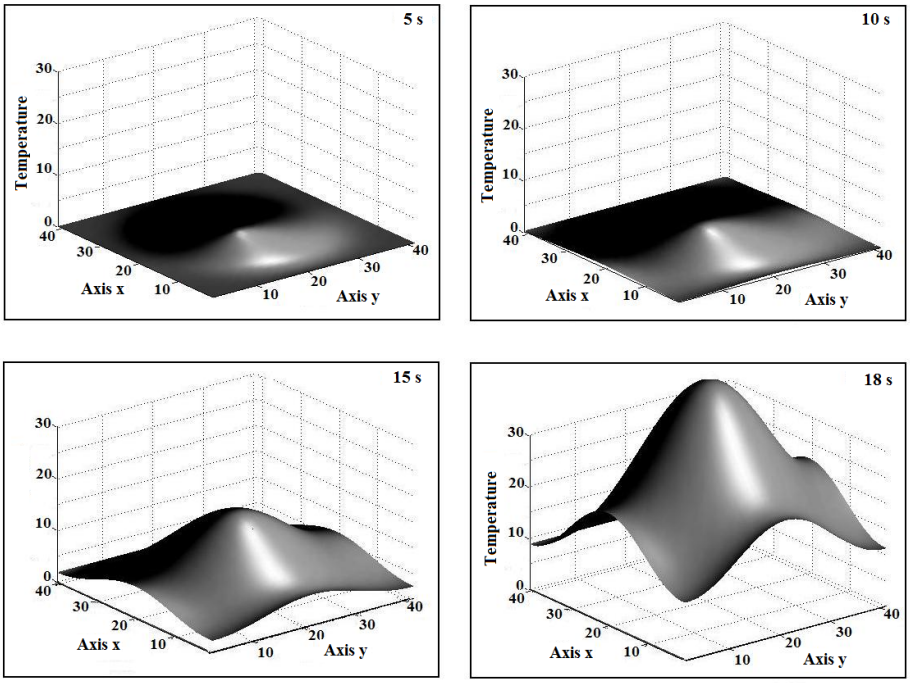


Рисунок 1 – Результаты исследования квазилинейной модели теплопроводности

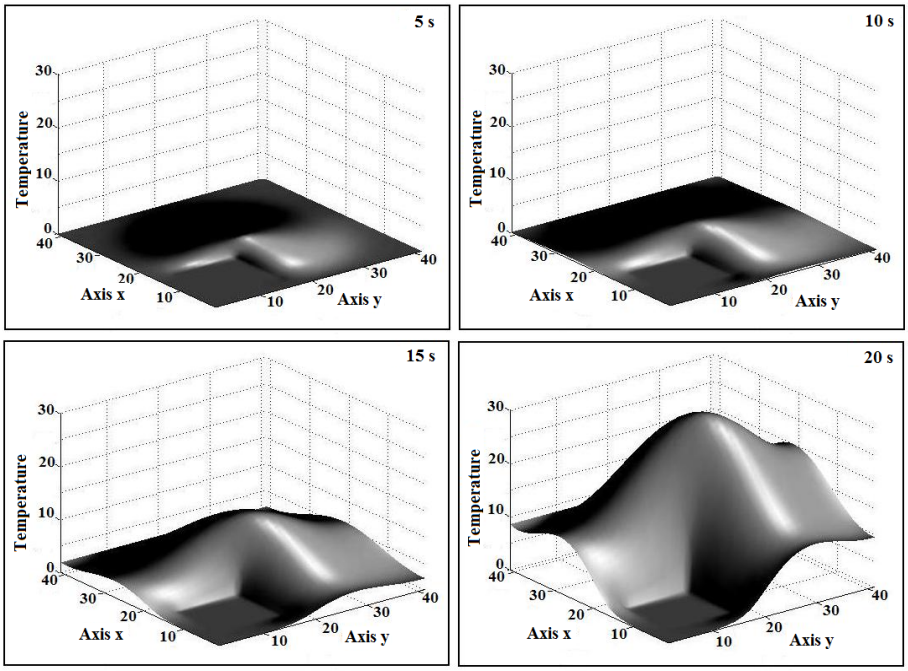


Рисунок 2 – Результаты исследования передачи тепла в пластине с зоной аномальной теплопроводности

Выводы

Представленные результаты иллюстрируют возможности использования систем клеточных автоматов для моделирования теплопроводности, поскольку соответствуют общепринятым представлениям о природе и протекании рассмотренных процессов. Данный подход позволяет создавать эффективные модели для исследования динамических пространственных явлений, в частности, процессов молекулярного переноса тепла в неоднородных средах в нелинейной и нестационарной постановке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Процессы и аппараты химической технологии. В 5 т. Т. 1. Основы теории процессов химической технологии / Д.А. Баранов, А.В., Вязьмин, А.А. Гухман и др. ; Под.ред. А.М. Кутепова. – М.: Логос, 2000. – 480 с.

2. Малинецкий Г.Г., Митин Н.А.,Науменко С.А. Нанобиология и синергетика. Проблемы и идеи. Часть 2 /Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2005, 029, 31с.

3. Тоффоли Т., Марголус Н. Машины клеточных автоматов: пер. с англ. М.: Мир, 1991, 280 с.

4. WolframS. Anewkindofscience./Wolfram media inc, Champaign, IL, 2002. - 1197 p.

5. Бандман О.Л. Мелкозернистый параллелизм в математической физике // Программирование, 2001. N 4. -с.1-17.

6. Бобков С.П. Моделирование основных процессов переноса с использованием клеточных автоматов //Изв. вузов. Химия и хим. технология, 2009, Т.52, № 3, с.109-114.

7. Бандман О.Л. Дискретное моделирование физико-химических процессов. // Прикладная дискретная математика. №3, 2009, с. 33 – 49.

8. Wolfram S. Statistical mechanics of cellular automata // Reviews of Modern Physics. – July/September 1983. V. 5. p. 601-610.

9. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б., Подлазов А.В. Нелинейная динамика: Подходы, результаты, надежды. М.: Озон. – 2016, 280 с.

10. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука. 1978. 356 с.

11. Бандман О.Л. Системная информатика: Сб. науч. тр.: Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2006. Вып. 10. С. 59–111.

12. Бобков С.П. Использование дискретных подходов для моделирования основных процессов химической технологии. // Российский химический журнал, 2019, т. LXIII, вып 3-4, с. 22-30.

УДК: 66.011 : 66.047.3.085.1 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-38-40

ДВУХЗОННАЯ СУШКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕМ МАТЕРИАЛЕ
TWO-ZONE DRYING OF FUNCTIONAL COATING ON SOUND-ABSORBING MATERIAL

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

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иванов
Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail: 157lipin@mail.ru, lipin.a@mail.ru)

Аннотация: Методом математического моделирования определены параметры двухзонной сушилки для сушки адгезионного покрытия на звукопоглощающем материале: температура излучателей и материала по зонам, влагосодержание слоя покрытия и воздуха, габариты сушильной камеры. Показано влияние скорости движения материала в камере и температуры излучателей на кинетику сушки адгезионного покрытия.

Abstract: Operating parameters of two-zone dryer, namely infrared heaters and material temperatures, moisture contents of coating and air, as well as the dryer sizes were determined by mathematical modeling. The influence of the material speed and the temperature of IR heaters on drying kinetics was shown.

Ключевые слова: радиационная сушка, кинетика сушки, звукопоглощающие материалы, энергоэффективность, математическое моделирование.

Keywords: infrared drying, drying kinetics, sound absorbing materials, energy efficiency, mathematical modeling.

Сушка функциональных покрытий является завершающей технологической стадией производства звукопоглощающих материалов. Функциональные покрытия представляют собой либо адгезионный слой, наносимый для удобства монтажа материала, либо антиадгезионный слой, предотвращающий склеивание слоев при упаковке материала в рулон.

Рассмотрим сушку адгезионного покрытия. Оно формируется на материале в виде тонкого слоя эмульсии, которую необходимо полностью высушить. Сушку осуществляют в терморадиационных сушилках ленточного типа, где в роли ленты выступает сам звукопоглощающий материал. Для ряда материалов имеется ограничение по температуре.

Целью работы является определение параметров сушки адгезионного покрытия на звукопоглощающем материале, обеспечивающих его высушивание до остаточного влагосодержания 0,01 кг вл/кг а.с. при минимальных габаритах сушилки и существующих ограничениях по температуре материала. При проектировании новых или решении задачи повышения производительности существующих сушилок полезно использовать методы математического моделирования. Поэтому для достижения поставленной цели была разработана математическая модель процесса радиационной сушки адгезионного покрытия на листовом материале. Расчетная схема сушилки представлена на рисунке 1.

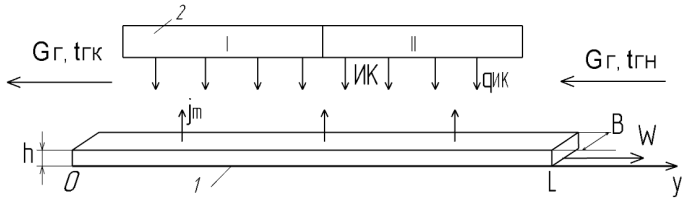


Рисунок 1 – Расчетная схема сушилки: 1 – композиционный материал; 2 – источник ИК излучения с возможностью регулирования температуры по зонам.

Материал в виде ленты шириной B и толщиной h перемещается в сушилке со скоростью w. Подвод тепла осуществляется от электрического источника ИК-излучения. Для удаления паров влаги в камеру противотоком материалу непрерывно подается воздух с расходом $G_г$.

Математическое описание процесса включает в себя следующие уравнения.

Уравнение теплового баланса в дифференциальной форме для материала:

$$\frac{dt}{dy} = \left[q_{ИК} - r^* j_m + \alpha_г \left(t_г - t \right) \right] \Big/ \left[w \cdot \rho \cdot h \left(c_м + U \cdot c_в \right) \right]. \quad (1)$$

где $q_{ИК}$ – плотность теплового потока от источника ИК-излучения; r^* – теплота парообразования; j_m – удельный поток испаренной влаги от функционального слоя; $\alpha_г$ – коэффициент теплоотдачи от материала к воздуху в сушильной камере; $t_г$ – температура воздуха; $c_м$ – теплоемкость материала; ρ – плотность материала; h – толщина материала; w – скорость движения материала.

Первое слагаемое в числителе правой части уравнения (1) отражает приход тепла от ИК-излучателя:

$$q_{ИК} = C_{12} \left[\left(T_И / 100 \right)^4 - \left(T / 100 \right)^4 \right], \quad T_u = T_{u1} \text{ при } 0 < y < L_1,\ T_u = T_{u2} \text{ при } L_1 < y < L, \quad (2)$$

где $T_И$, T – температуры излучателя и материала, соответственно, К; C_{12} – коэффициент взаимного излучения, Вт/(м^{2}К^4).

Второе слагаемое в числителе правой части уравнения (1) характеризует расход тепла на испарение влаги из функционального покрытия, а третье слагаемое – теплообмен с воздухом.

Изменение влагосодержания функционального покрытия описывается уравнением массоотдачи при выражении движущей силы через разность парциальных давлений:

$$dU / dy = \beta_p B (P_{\text{нас}}(t) \cdot \psi(U) - P_г) / G_м \quad (3)$$

где β_p – коэффициент массоотдачи; B – ширина ленты; $P_{нас}$ – давление насыщенных паров воды; ψ(U) – эмпирический коэффициент, учитывающий снижение парциального давления водяных паров над поверхностью функционального покрытия при уменьшении его влагосодержания; $P_г$ – парциальное давление паров воды в воздухе; $G_м$ – массовый расход по сухому веществу функционального слоя.

Зависимость ψ(U) для адгезионного покрытия была получена путем обработки экспериментальных данных, полученных нами ранее [1]. Зависимость давления насыщенного водяного пара $P_{нас}$ от температуры была аппроксимирована уравнением, приведенным в работе [2].

Уравнение теплового баланса в дифференциальной форме для потока газа (воздуха) внутри сушильной камеры:

$$dt_г \Big/ dy = \alpha_г B \left[\left(t_г - t \right) + \left(t_г - t_И \right) \right] \Big/ \left(G_г c_г \right), \quad (4)$$

где $G_г$ – массовый расход воздуха; $c_г$ – теплоемкость воздуха.

Дифференциальное уравнение для расчета влагосодержания воздуха:

$$dx \Big/ dy = \beta_p \left(P_{нас}(t) \cdot \psi(U) - P_г \right) B \Big/ G_г \quad (5)$$

Начальные условия для уравнений (1) - (5):

$$t(0) = t_0,\ U(0) = U_0,\ t_г(0) = t_{г,0},\ x(0) = x_0. \quad (6)$$

Система уравнений (1)-(5) с начальными условиями (6) решалась численным методом. Был применен метод Рунге-Кутта 4-го порядка. Был выполнен вычислительный эксперимент. При моделировании задавались следующие исходные данные: ширина ленты материала B=1 м, толщина материала h=3 мм, удельная плотность нанесения покрытия 0,1 кг/м^2, расход воздуха $G_г$=0,4 кг/с, начальное влагосодержание воздуха $x_н$=0,02 кг вл./кг а.с.в., начальное влагосодержание материала $U^c_н$=1,55 кг вл./кг а.с..

На первом этапе была установлена температура излучателя, при которой материал в первый период сушки не перегревается выше 70 °С. Снизить температуру сушки можно понижением температуры излучателя, но при этом увеличивается длина сушилки, обеспечивающая сушку до остаточного влагосодержания 0,01 кг вл/кг а.с. Поэтому оптимальной температурой излучателя является $t_И$=280 °С. Моделирование показало, что сушка при постоянной температуре приводит к сильному перегреву материала во второй период сушки, о чем свидетельствует кривая 4 на рисунке 2. Поэтому предлагается в первый период сушки вести процесс при 280 °С, а во второй период сушки снижать температуру. Для этого сушильную камеру целесообразно разделить на две зоны, установив в каждой зоне свой нагреватель. Из рисунка 2 следует, что длина первой зоны при температуре излучателя 280 °С составляет 4 м, а длина второй зоны зависит от температуры второго излучателя. Для обеспечения сушки функционального слоя до остаточного влагосодержания 0,01 кг вл/кг а.с. при температуре излучателя 200 °С длина второй зоны составит 2 м, а при 180 °С – 3 м. В любом случае при снижении влагосодержания слоя покрытия ниже 0,05 кг вл/кг а.с. наблюдается перегрев материала выше 70 °С. При температуре во второй зоне 200 °С перегрев происходит на последних 0,7 м длины камеры, температура материала на выходе составляет 90 °С. При снижении температуры во второй зоне до 180 °С перегрев происходит на последних 1,1 м длины камеры, а температура материала на выходе составляет 97 °С. Принимая во внимание, что в обоих случаях достигается конечное влагосодержание 0,01 кг вл/кг а.с., целесообразно выбрать температуру второй зоны 200 °С.

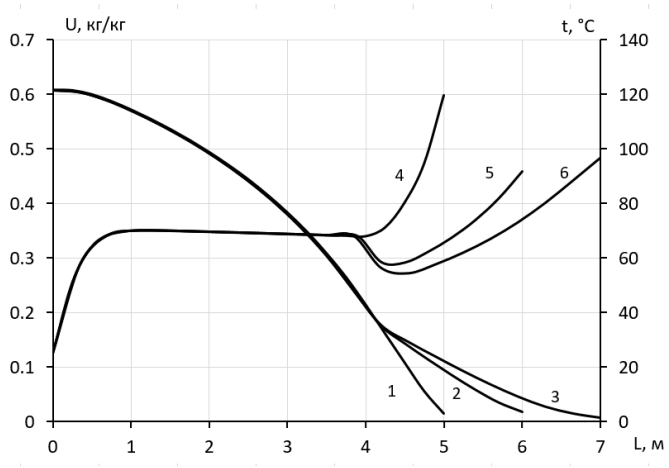


Рисунок 2 – Изменение влажности адгезионного покрытия (1, 2, 3) и температуры материала (4, 5, 6) по длине сушилки при различных температурах излучателя второй зоны $t_И$:
1, 4 – 280 °С,
2, 5 – 200 °С,
3, 6 – 180 °С

Таким образом, методом математического моделирования в работе установлено: 1) Для радиационной сушки адгезионного покрытия на листовом звукопоглощающем материале целесообразно использовать двузонную сушилку с регулированием температуры по зонам. 2) Температура излучателя в первой зоне, обеспечивающая наиболее быструю сушку без перегрева материала, составляет 280 °С. Температура излучателя во второй зоне, обеспечивающая наиболее быструю сушку с перегревом на небольшом конечном участке составляет 200 °С. 3) Сушка при температуре ниже 70 °С возможна только до влагосодержания 0,05 кг вл./кг а.с. В дальнейшем планируется усовершенствовать модель с целью прогнозирования профиля температуры по толщине материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев П.Е., Тортева Д.С. Исследование кинетики сушки клеевого покрытия на композиционном материале // 72 всероссийская НТК студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сб. материалов конф. В 3 ч. Ч. 1 [Электронный ресурс]. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2019. – С. 755-758.

2. Липин А.А,. Небукин В.О., Липин А.Г. Моделирование процессов тепломассопереноса при капсулировании гранул в фонтанирующем слое // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2018. Т. 61. №4-5. С. 98-104.

УДК 621.311.182; 536.24 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-41-44

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ БИОГАЗОВОМ РЕАКТОРЕ
INFLUENCE OF THERMAL INSULATION PARAMETERS ON TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A CYLINDRICAL BIOGAS REACTOR

Вендин Сергей Владимирович, Мамонтов Артем Юрьевич,
Ульянцев Юрий Николаевич
Sergey V. Vendin, Artem Yu. Mamontov, Yuri N. Ulyantsev

Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я.Горина, Россия,
Белгородская область, п. Майский
Belgorod state agricultural university named after V.Gorin,
Russia, Belgorod region, Mayskiy
(e-mail: elapk@mail.ru)

Аннотация: Приведены результаты анализа влияния толщины и теплопроводности теплоизоляции (стенки) на распределение температуры внутри биореактора цилиндрической формы. В основу анализа положены расчетные зависимости на основе решения уравнения теплопроводности Фурье в слоистых средах для одномерной задачи в двухслойном цилиндре.

Abstract: The results of the analysis of the influence of the thickness and thermal conductivity of thermal insulation (walls) on the temperature distribution inside a cylindrical bioreactor are presented. The analysis is based on the calculated dependences based on the solution of the Fourier heat conduction equation in layered media for a one-dimensional problem in a two-layer cylinder.

Ключевые слова: биогазовый реактор, источники теплоты, теплоизоляционные материалы, мощность, температурное поле.

Keywords: biogas reactor, heat sources, heat-insulating materials, power, temperature field.

Эффективность переработки органического сырья в биогаз зависит не только от состава сырья, но и от соблюдения технологических режимов процесса брожения [1, 2]. В первую очередь необходимо обеспечивать перемешивание сырья и соблюдать температурные режимы в объемы биомассы. Поэтому необходимость соблюдения температурных режимов во внутреннем объеме реактора накладывает определенные требования к теплоизоляции корпуса биогазового реактора [3]. Температура внутри реактора, в основном, обеспечивается выделением теплоты за счет химических реакций, происходящих при сбраживании. Однако при недостатке количества теплоты, получаемой в ходе химических реакций для поддержания оптимальных температурных режимов применяют подогрев массы с использованием дополнительных (сторонних) источников теплоты [4, 5]. В качестве средств дополнительного подогрева можно используют различные способы подвода теплоты и теплообменные аппараты, в том числе и электрические нагреватели (ТЭНы).

В связи с этим очень важно проводить оценку взаимосвязи конструктивных параметров и теплофизических параметров реактора на распределение температурных полей внутри рабочего объема реактора с учетом влияния внешней окружающей среды и тепловыделения внутри реактора.

В большинстве случаев конструкция биогазового реактора представляет собой цилиндрическое сооружение, оснащенное средствами загрузки и выгрузки, устройствами перемешивания и подогрева, средствами управления работой оборудования. Поэтому, в первом приближении, физическую модель биореактора можно определить в виде сплошного цилиндра радиусом R_1 (рабочий объем реактора) и высотой H, окруженного цилиндрической оболочкой (стенкой) с толщиной Δ. Следовательно наружный радиус конструкции будет равен $R_2 = R_1 + \Delta$.

Согласно общей постановке задачи распределение температурного поля внутри конструкции будет зависеть от величины мощности дополнительных (сторонних) источников теплоты, которые можно расположить внутри рабочего объема реактора и от условий теплообмена снаружи объекта.

С технологических позиций важен допустимый диапазон изменения температуры внутри объема реактора при сбраживании, который можно определить двумя температурными перепадами: как разницу значений температурного поля между центром биореактора $T_1(0)$ и у внутренней стенки биореактора $T_1(R)$:

$$\Delta T_1 = T_1(0) - T_1(R), \quad (2\text{-}1)$$

или как разницу значений температурного поля между температурой на оси биореактора $T_{кр} = T_1(0)$ и температурой снаружи (окружающей среды) T_c:

$$\Delta T = T_1(0) - T_c. \quad (3\text{-}2)$$

Расчет температурных полей в реакторе может быть проведен на основе решений уравнения теплопроводности Фурье приведенных в работах [6-10]. Поэтому был проведен численный эксперимент по оценке влияния толщины и теплопроводности теплоизоляции (стенки) на распределение температуры внутри биореактора с учетом наличия внутренних источников теплоты во внутреннем его объеме.

Ниже на рисунке 1 показаны характерные поверхности распределения температурного температурного поля внутри биореактора, при наличии внутренних источников теплоты, в зависимости от толщины теплоизоляции (стенки) при следующих значениях параметров: теплопроводность биогазового сырья во внутреннем объеме λ_1 = 0,6 Вт/(м·К); теплопроводность стенки реактора λ_2= 0,04 Вт/(м·К); теплопроводность окружающей среды λ_c= 0,022 Вт/(м·К); высота реактора H = 5 м; внутренний радиус реактора R_1 = 5 м; $T_{кр}$= 45 °С; критерий Нуссельта на внешней поверхности реактора N_u = 2; температура окружающей среды T_c = 0 °С; мощность источников теплоты распределенных во внутреннем объеме реактора P = 30 Вт.

Анализ поверхности представленной на рисунке 1 показывает, что разница температур между внутренней стенкой реактора и его центром не превышает 1 °С (ΔT = 0,796°С). Однако с увеличением толщины теплоизоляции (стенки) биореактора Δ абсолютная температура внутри него повышается и составляет: $T_1(0)$ =44,69°С при Δ = 0,1 м; $T_1(5)$ = 47,70°С при Δ = 0,5 м.

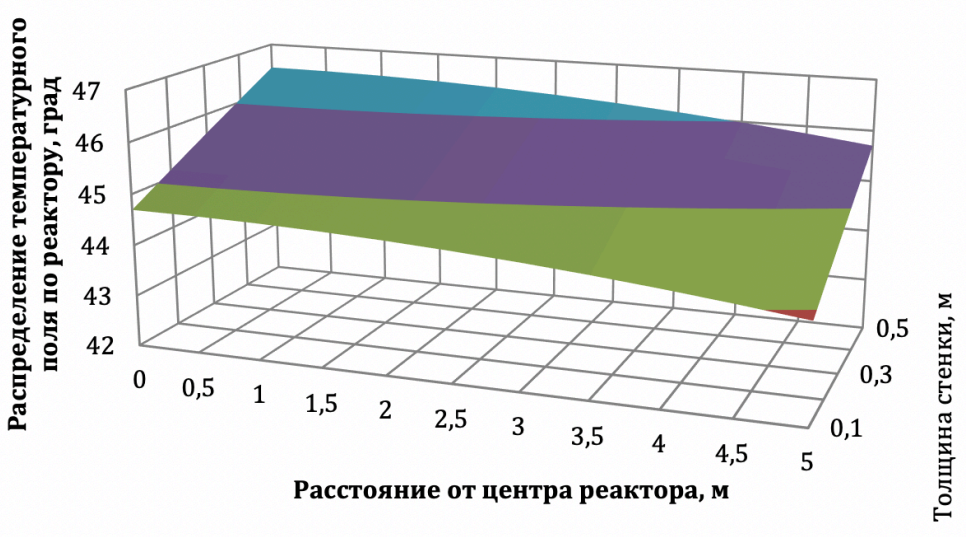


Рисунок 1 – Распределение температурного поля внутри биореактора при изменении толщины теплоизоляции (стенки) Δ.

Результаты расчетов распределения температурного поля внутри биореактора при изменении коэффициента теплопроводности теплоизоляции (стенки) λ_2 и наружной температуры воздуха T_c приведены на рисунке 2.

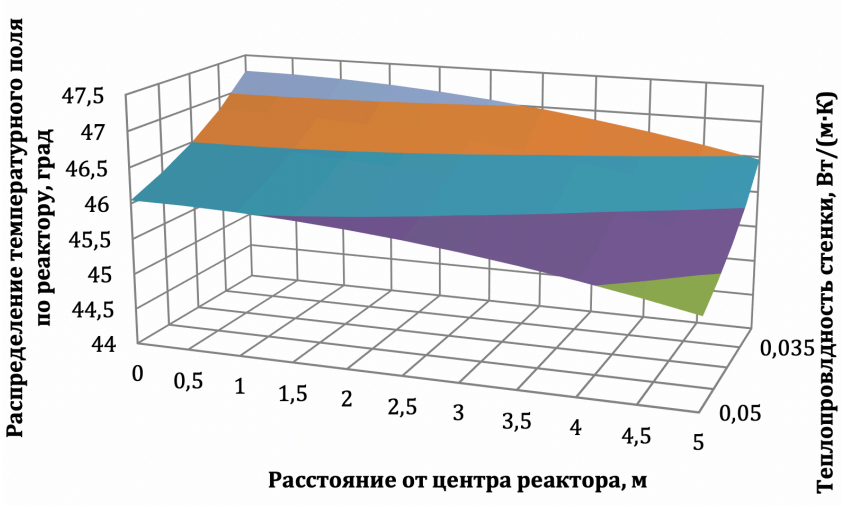


Рисунок 2 – Распределение температурного поля внутри биореактора при изменении коэффициента теплопроводности теплоизоляции (стенки) λ_2 при Δ= 0,5 м.

Расчеты проводились при тех же значениях параметров, что и на рисунке 1, но толщина стенки реактора составляла Δ = 0,5 м. Для наглядности изменение коэффициента теплопроводности теплоизоляции (стенки) λ_2 от 0,03 Вт/(м·К) до 0,05 Вт/(м·К) в исследуемом диапазоне представлено с убыванием от наблюдателя.

Анализ расчетной поверхности температурного поля при изменении теплопроводности теплоизоляции (стенки) λ_2 и наружной температуры воздуха T_c показывает, что перепад температур между центром и внутренней стенкой реактора также не превышает 1 ºС (ΔT = 0,796ºС). В тоже время с уменьшением коэффициента теплопроводности теплоизоляции (стенки) λ_2 абсолютная температура внутри него повышается и составляет: $T_1(0)$ = 46,4 ºС при λ_2 = 0,05 Вт/(м·К); $T_1(5)$ = 47,25ºС при λ_2=0,03 Вт/(м·К).

Выводы

Проведен численный эксперимент по оценке влияния толщины и теплопроводности теплоизоляции (стенки) на распределение температуры внутри цилиндрического биогазового реактора, с учетом наличия внутренних источников теплоты во внутреннем его объеме.

Установлено, что перепад температур между центром и внутренней стенкой реактора не превышает 1 ºС (ΔT = 0,796ºС). Однако с увеличением толщины теплоизоляции (стенки) биореактора Δ абсолютная температура внутри него повышается.

Расчеты температурного поля внутри биореактора при изменении коэффициента теплопроводности теплоизоляции (стенки) λ_2 и наружной температуры воздуха T_c показали, что перепад температур между центром и внутренней стенкой реактора не превышает 1 ºС. Однако с уменьшением коэффициента теплопроводности теплоизоляции (стенки) λ_2 абсолютная температура внутри него повышается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Трахунова И.А.* Эффективность процесса анаэробного сбраживания при различных режимах гидравлического перемешивания / И.А. Трахунова, Г.Р. Халитова, Ю.В. Карасева // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 10. С. 90-94.

2. *Садчиков А.В.* Оптимизация теплового режима в биогазовых установках / А.В. Садчиков, Н.Ф.Кокарев // Фундаментальные исследования. 2016. № 2-1. С. 90-93.

3. *Вендин С.В.* Анализ свойств теплоизоляционных материалов для условий нестационарной теплопередачи / С.В. Вендин, Ю.Н. Ульянцев // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2019. № 4 (24). С. 30 – 36.

4. *Вендин С.В.* Обоснование параметров терморегуляции и перемешивания при анаэробном сбраживании / С.В. Вендин, А.Ю. Мамонтов // Сельский механизатор. 2016. № 7. С. 20-22.

5. *Вендин С.В.* Автоматизация механических и тепловых процессов в многокамерном биогазовом реакторе непрерывной загрузки сырья / С.В. Вендин, А.Ю. Мамонтов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. 2016. № 4 (74). С.55-60.

6. *Вендин С.В.* Расчет мощности дополнительных источников теплоты для подогрева биомассы в биогазовом реакторе / С.В. Вендин, А.Ю. Мамонтов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им.В.Г. Шухова. 2017. № 7. С. 97-99.

7. *Вендин С.В.* К расчету нестационарной теплопроводности в многослойных объектах при граничных условиях третьего рода / С.В. Вендин // ИФЖ. 1993. Т.65. № 8. С. 249-251.

8. *Vendin S.V.* Calculation of nonstationary heat conduction in multilayer objects with boundary conditions of the third kind / S.V. Vendin // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1993. Т. 65. № 2. С. 823-825.

9. *Вендин С.В.* К решению некоторых краевых задач нестационарной теплопроводности в слоистых средах методом разделения переменных / С.В. Вендин // В сборнике: Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе. сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова. 2015. С. 78-80.

10. *Vendin S.V.* On the Solution of Problems of Transient Heat Conduction in Layered Media / S.V. Vendin //International Journal of Environmental and Science Education. 2016.Т. 11. № 18. С. 12253-12258.

УДК 628.81+536.24 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-45-48

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОЗДУШНОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ
MATHEMATICAL MODELING OF THE OPERATING MODES OF THE AIR HEAT ACCUMULATOR

Шарпар Николай Михайлович, Жмакин Леонид Иванович, Сорокин Александр Николаевич
Nikolai M. Sharpar, Leonid I. Zhmakin, 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: В работе рассмотрена математическая модель однофазного воздушного аккумулятора, функционирующий совместно с низкотенциальным нестабильным источником тепловой энергии, например воздушным солнечным коллектором транспирационного типа. Рассмотрены результаты теоретических расчетов заданные при различных режимах работы регенеративной насадки теплового аккумулятора обладающего пористой матрицей.

Abstract: The paper considers a mathematical model of a single-phase air accumulator operating in conjunction with a low-potential unstable source of thermal energy, for example, an air solar collector of the transpiration type. The results of theoretical calculations given for different operating modes of the regenerative nozzle of a heat accumulator with a porous matrix are considered.

Ключевые слова: пористая матрица, тепловой аккумулятор, насадка, низкопотенциальный источник тепла, математическая модель.

Keywords: porous matrix, heat accumulator, nozzle, low-potential heat source, mathematical model.

Системы низкопотенциального теплоснабжения обеспечивающие нагрев воздушным теплоносителем, как показывает практика для сохранения тепловой энергии используют аккумуляторы тепла в качестве временного хранилища. Данные аппараты содержат засыпку часто изготавливаемую из горных пород, щебня или гальки, обладающих матрицей с пористой структурой. Зарядка таких аппаратов осуществляется по средствам подачи нагретого воздуха сверху в низ, т.е. при попадании теплоносителя в матричную пористую структуру происходит передача тепла к ее элементам и в процессе охлаждения, спускаясь вниз забирается из насадки. Разрядка аккумулятора теплы, осуществляется при противоположном движении воздуха. При подобной технологии особое внимание уделяется минимизации гидравлических потерь, при проходе сквозь пористую матрицу так, чтобы в ней имел место свободно-конвективный теплообмен, иначе требуется в схеме монтаж нагнетателя. Чтобы снизить амплитуду температурных колебаний теплоносителя прибегают к применению одновременно нескольких тепловых аккумуляторов.

В работе отмечен один из вариантов конструктивного исполнения теплового аккумулятора, согласно которой пористую матрицу образуют пластиковые емкости заполненные водой, их компоновка в объеме аппарата выполнена в тетраэдрической форме. Моделирование теплопереноса осуществлялось согласно следующим упрощенным задачам:

- анализируется одномерный воздушный поток, перемещающийся по вертикальной матрице;
- тепловые потери в окружающую среду не учитываем;
- теплоперенос в насадке по средствам теплопроводности в соответствии с осевым направлением отсутствует;

- теплофизические показатели теплоносителей, т.к. среды (воздуха) и аккумулирующего материала содержащегося в емкостях принимаем постоянным;

- температурными градиентами в насадке пренебрегаем.

В соответствии с ранее изложенным на базе элементарных балансов для температур воздушного потока и материала наполнителя засыпки могут быть представлены в дифференциальной форме:

$$\begin{aligned}\left(\rho c_p\right)_в \varepsilon \frac{\partial T_в}{\partial \tau} &= \frac{\left(g c_p\right)_в}{F}\frac{\partial T_в}{\partial x} + \alpha_v\left(T_м - T_в\right)\\ \left(\rho c_p\right)_м \left(1-\varepsilon\right)\frac{\partial T_м}{\partial \tau} &= \alpha_v\left(T_в - T_м\right)\end{aligned} \qquad (1)$$

Здесь ε - пористость наполнителя засыпки; F – площадь поперечного сечения теплового аппарата; g – массовый расход воздушного потока подаваемого в засыпку; $T_в$ и $T_м$ – температуры воздуха и материала находящегося в засыпки; α_v (Вт/м^{3}град) – ее объемный коэффициент теплоотдачи, соответственно. В работе J.A. Duffie [1] рассматривается следующее соотношение

$$\alpha_v = 650\left(\frac{G_0}{d}\right)^{0,7}$$

где $G_0 = \rho v$ (кг/м^{2}с) – массовая скорость воздушного потока в засыпке аппарата; d (м) – эквивалентный диаметр частиц, обладающих сферической формой. Так объемный коэффициент теплоотдачи определяется, как обычный поверхностный коэффициент, умноженный на удельную поверхность пористой засыпки в единице ее объема.

Для теплоаккумуляционных систем воздушного типа, первый член при первом уравнении системы (1) можно не учитывать. После соответствующего приведения системы дифференциальных уравнений (1) в безразмерную форму оно получит следующий вид

$$\begin{aligned}\frac{\partial T_в}{\partial X} &= NTU \cdot \left(T_м - T_в\right)\\ \frac{\partial T_м}{\partial \Theta} &= NTU \cdot \left(T_в - T_м\right)\end{aligned} \qquad (2)$$

Здесь $X = x / L$ – безразмерная координата в вертикальном направлении (L – высота слоя засыпки), Θ - безразмерное время и NTU – число единиц переноса.

$$NTU = \frac{\alpha_v F L}{\left(g c_p\right)_в}; \quad \Theta = \frac{\tau\left(g c_p\right)_в}{F L\left(\rho c_p\right)_м\left(1-\varepsilon\right)}$$

Система уравнений (2) определяется численно; расчетная схема решения задачи рассмотрена на рис. 1.

Разделим засыпку аккумулятора на N равных слоев с толщиной $\Delta x = L/N$. Согласно первому уравнению системы (2) можно определить, температуру воздуха при его прохождении через каждый слой наполнителя, которая изменяется экспоненциально

$$\frac{T_{в,i+1} - T_{м,i}}{T_{в,i} - T_{м,i}} = \exp\left(-NTU\frac{\Delta x}{L}\right) = \exp\left(-\frac{NTU}{N}\right) \qquad (3)$$

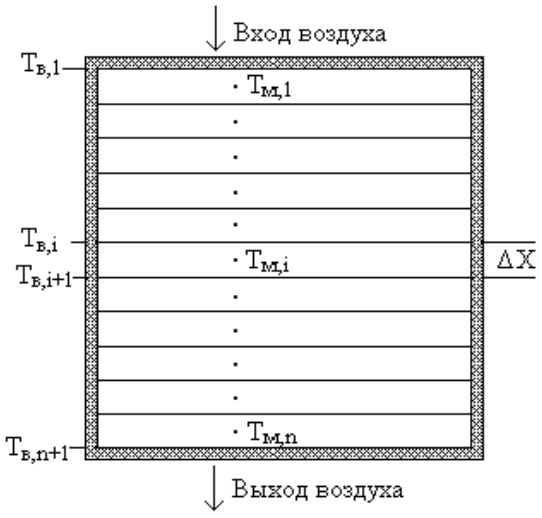


Рисунок 1 – Расчетная схема описывющая заряд теплового аккумулятора

Таким образом, энергетический баланс для любого элементарного слоя «*i*» можно определить как

$$\left(gc_p\right)_в\left(T_{в,i}-T_{в,i+1}\right)=\left(gc_p\right)_в\left(T_{в,i}-T_{м,i}\right)\cdot\left[1-\exp\left(-NTU/N\right)\right]$$

Второе уравнение системы (2) можно записать в конечно-разностном виде

$$\frac{\widetilde{T}_{м,i}-T_{м,i}}{\Delta\Theta}=NTU\left(T_{в,i}-\frac{\widetilde{T}_{м,i}+T_{м,i}}{2}\right) \tag{4}$$

Отсюда определим температуру n-го слоя засыпки в следующий временной интервал, если ее значение в настоящий момент известно

$$\widetilde{T}_{м,i}=\frac{\beta\cdot T_{в,i}+T_{м,i}\left(1-0{,}5\beta\right)}{\left(1+0{,}5\beta\right)} \tag{5}$$

В уравнении (5) параметр $\beta=\mathrm{NTU}\cdot\Delta\Theta$, а $\Delta\Theta$ представляет из себя шаг по времени.

Следовательно, процедура численного определения системы уравнений (2), которая представляет изменение температуры нагретого воздуха по высоте слоя засыпки и ее изменение температуры с течением времени при зарядке теплового аппарата, приводит к следующей картине. Вначале принимаем начальное (по времени) распределение температур по засыпке. На входе в аппарат принимаем температуру воздуха $T_{в,1}$, поступающего из транспирационного коллектора. Потом при помощи уравнений (3) и (5) определим $T_{в,1}$ и $\widetilde{T}_{м,1}$, а затем расчетная процедура циклично повторяется для последующих элементарных слоев аппарата.

При расчете в программе выполнена попытка учета температурного градиента в частицах засыпки при помощи пересчета числа единиц переноса согласно формуле

$$NTU_c=\frac{NTU}{1+Bi/5}$$

здесь $Bi = \alpha R/\lambda$ - число Био для элементарных частиц засыпки, α, R – коэффициент ее теплоотдачи с воздухом и радиус, соответственно, λ - коэффициент теплопроводности.

Результаты, полученные в ходе расчета при изменении температуры воздуха прокачиваемого через засыпку при зарядке аккумулятора представлены на рис. 2. Скорость воздушного потока на входе в тепловой аккумулятор (в сечении, не наполненном матрицей) было принято равным 0,04 м/с, а его высота слоя наполнителя – 2 м. Температура нагретого воздуха на входе – 50°С, а температура засыпки в начальный момент времени – 20 °С.

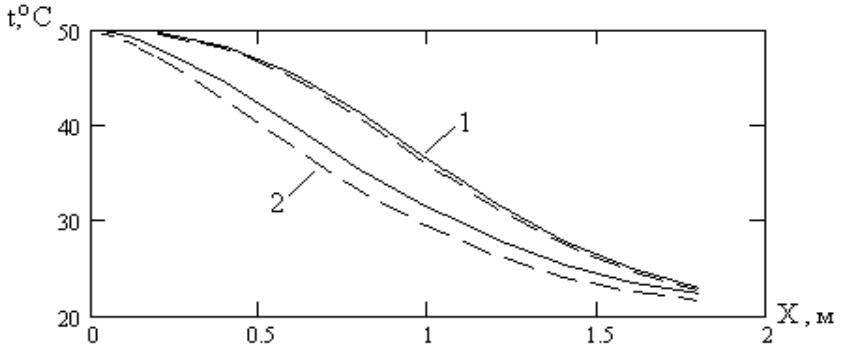


Рисунок 2 – Изменение температуры прокачиваемого теплоносителя (сплошные линнии) и наполнитель (штриховая линия) по высоте аппарата через 1 час после запуска в режиме заряда: диаметр частиц находящихся в слое – 0,05 м (1); 0,1 м (2)

Выполненные расчеты указывают на снижение диаметра частиц наполнителя, повышается число единиц при переносе (кривые - 1 NTU=53,7 , кривые - 2 NTU=13,6), а отличие между температурами нагретого воздуха и наполнителя падает. Согласно данным [1], при NTU>25 данным отличием с точки зрения инженерных расчетов можно пренебречь.

На рис. 3 приведены результаты выполненного расчета прогрева наполнителя с элементами диаметром 0,1 м по высоте ее слоя. Поперечное сечение аппарата порядка F = 10 м^2, при скорости прокачиваемого воздуха 0,02 м/с и массовом расходе 0,22 кг/с. При таких условиях число единиц переноса NTU=38,7 , т.е. оно было заведомо больше рекомендованного в [1] предельного значения, величина объемного коэффициента теплоотдачи в наполнителе составляла α_V = 496 Вт/ м^{3}град, а поверхностный коэффициент α_F = 14 Вт/ м^{2}град.

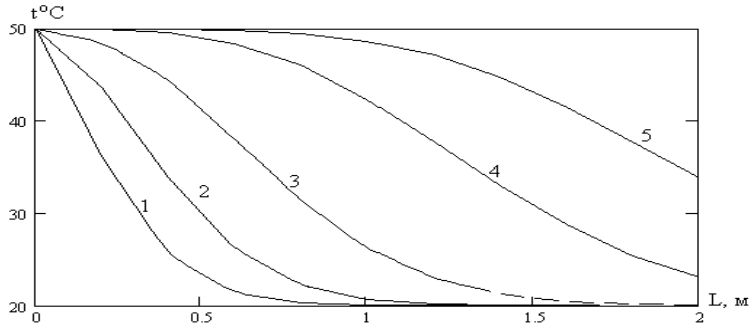


Рисунок 3 – Одномерные температурные поля в тепловом аккумуляторе при пористой матрице в процессе зарядки и с разными временными интервалами:
1 … 0,5 часа; 2 … 1 часа; 3 … 2 часа; 4 … 4 часа; 5 … 6 часов

Из рис. 3 видно, что слои наполнителя в зоне выхода прокачиваемого воздуха из теплового аккумулятора прогреваются достаточно медленно, т.к. их прогрев при зарядки должен осуществляться не менее 4 … 6 часов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 2 Edition, J.Wiley & Sons, USA, 1991, 919 p.

2. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизгорин С.Р., Васюкевич П.В., Накопители энергии, М., Энергоатомиздат, 1991, 398 с.

3. Левенберг В.Д., Ткач М.Р., Гольстрем В.А., Аккумулирование теплоты, К., Техника, 1991, 112 с.

4. Хайнрих Г., Найорк Х., Нестлер В., Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения, М., Стройиздат, 1985, 351 с.

УДК 66.048.625 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-49-53

ОБЕЗВОЖИВАНИЕ СПИРТОВ ЭКСТРАКТИВНОЙ РЕКТИФИКАЦИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМИНОЭФИРОВ БОРНОЙ КИСЛОТЫ
DEHYDRATION OF ALCOHOLS BY EXTRACTIVE RECTIFICATION USING BORIC ACID AMINOESTERS

Клинов Александр Вячеславович, Давлетбаева Ильсия Муллаяновна, Малыгин Александр Владимирович, Хайруллина Алина Ришатовна, Дулмаев Сергей Эдуардович
AlexanderV. Klinov, IlsiyaM. Davletbaeva, AlexanderV. Malygin, Alina R.Khairullina, Sergey E. Dulmaev

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
(e-mail: alklin@kstu.ru,davletbaeva09@mail.rumav@kstu.ru, apelsinochka91@mail.ru, impsble@gmail.com)

Аннотация: Изучены аминоэфиры борной кислоты (АЭБК) как экстрагенты для разделения водно–спиртовых азеотропных смесей методом экстрактивной дистилляции. Исследованы условия парожидкостного равновесия в водных растворах этанола в присутствии АЭБК. Предложено разделение молекул АЭБК на групповые компоненты, в рамках модели UNIFAC определены ранее неизвестные геометрические параметры группы бора и параметры энергетической пары группы бора. Проведено моделирование процесса экстрактивной ректификации смеси этанол–вода с АЭБК в качестве экстрагента.

Abstract: Aminoethers of boric acid (AEBA) were studied as extractants for the separation of aqueous–alcoholic azeotropic mixtures by extractive distillation. The conditions of vapor–liquid equilibrium in aqueous solutions of ethanol in the presence of AEBA were studied. The division of AEBA molecules into group components was proposed, and previously unknown geometric parameters of the boron group and the energetic pair parameters of the boron group were determined within the framework of the UNIFAC model. The modeling of the extractive rectification process of an ethanol–water mixture with AEBA as extractant has been carried out.

Ключевые слова: равновесие пар-жидкость, экстрактивная ректификация, модель UNIFAC,аминоэфиры борной кислоты

*Keywords:*vapor-liquid equilibrium, extractive distillation, UNIFAC model, boric acid aminoesters

Спирты с малым содержанием воды широко используются в химической промышленности, но при практическом их использовании требуется высокая чистота [1].Известно, что многие спирты образуют с водой азеотропные смеси, поэтому существует проблема разделения таких смесей.В настоящее время являются актуальными, исследования, направленные на поиск эффективных экстрагентов способных целенаправленно изменять относительную летучесть компонентов водно-спиртовых растворов, легко регенерироваться, тем самым увеличивая эффективность процессов разделения. В данной работе рассматривался аналог ионных жидкостей (ИЖ), аминоэфиры борной кислоты (АЭБК) [3], которые имеют значительно меньшую стоимость получения. Исследовалась возможность их использования в качестве эффективных экстрагентов для экстрактивной ректификации водно-спиртовых растворов.

Проводились исследования влияния АЭБК на условия фазового равновесия пар-жидкость водно-спиртовых смесей. Целью данного исследования было выявление случаев разрушения азеотропов, количественная оценка изменения коэффициента относительной летучести спирта и воды. В качестве методов исследования использовались физический

эксперимент на основе метода открытого испарения и моделирование на основе модели UNIFAC для коэффициентов активности.

При проведении экспериментальных исследований использовался ротационный испаритель IKA-RV 10, методика проведения эксперимента представлена в работе [2].

В данной работе рассмотрены варианты АЭБК на основе три- и ди- этиленгликоля (АЭБК-ДЭГ и АЭБК-ТЭГ). Как показали наши исследования свойства АЭБК оказываются схожими со свойствамиИЖ: температура плавления ниже 100˚С, практически не летучи, водные растворы имеют высокую электропроводность, при добавлении к водно-спиртовым растворам убирают азеотроп [3]. На рисунке1 приведены результаты открытого испарения смеси этанол-вода в присутствии АЭБК. Видно, что добавление АЭБК увеличивает относительную летучесть этанола, что приводит к его более быстрому истощению в кубе. Такое же влияние АЭБК на условие фазового равновесия пар – жидкость характерно и для систем изопропанол-вода.

Для моделирования условий фазового равновесия пар-жидкость в трехкомпонентных растворах АЭБК-вода-спирт использовалась модель для расчета коэффициентов активности UNIFAC. В рамках модели UNIFAC молекулы веществ разделяются на групповые составляющие. Для молекул имидазольных ИЖ, воды и различных спиртов такое разбиение уже предложено. В работе было предложено разбиение молекул АЭБК на следующие группы: В–группа бора, CH_2 группа алкана, OCH_2- группа эфира, NCH_2-аминогруппа, OH- группа спирта. Таким образом АЭБК-ТЭГ состоит из 35 - CH_2, 42 - OCH_2, 6 - В, 9 -OH и 1- NCH_2 групп, а АЭБК-ДЭГ из 23 - CH_2, 30 - OCH_2, 6 - В, 9 -OH и 1- NCH_2 групп. Молекулярные массы АЭБК-ДЭГ и АЭБК-ТЭГ составляют 1469.61 и 1998.21 соответственно.

Анализ литературы и наиболее полной базы данных по параметрам группового взаимодействия для модели UNIFAC в виде UNIFACMatrix 2020, представленной в DortmundDataBank (DDB), показал отсутствие данных по группе бора. Поэтому в данной работе по экспериментальным данным были определены геометрические параметры группы бора и энергетические параметры взаимодействия этой группы с другими группами рассматриваемых растворов. Это В - CH_2, В - OCH_2, В - NCH_2, В – OH, В –H_2O.

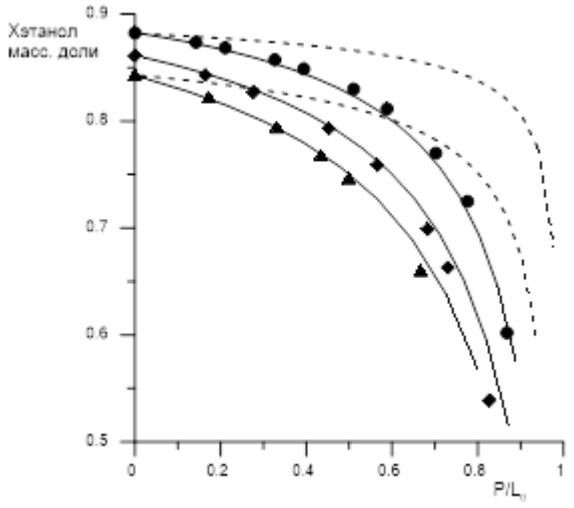


Рисунок 1 – Линии открытого испарения для смеси этанол-вода-АЭБК-ТЭГ. Геометрические фигуры – эксперимент (круги 20% масс. АЭБК-ТЭГ, ромбы 40% масс. АЭБК-ТЭГ, треугольники 60% масс. АЭБК-ТЭГ), непрерывные линии - расчет, пунктирные линии - расчет без АЭБК.

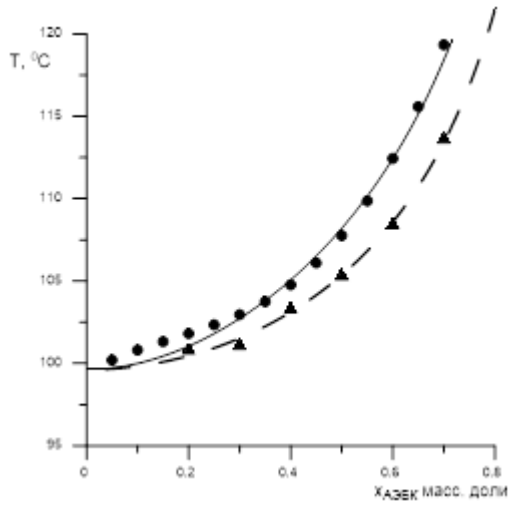


Рисунок 2 – Температуры кипения водных растворов АЭБК. Геометрические фигуры эксперимент (круги – АЭБК-ДЭГ, треугольники АЭБК-ТЭГ), непрерывные линии расчет.

Для определения конфигурационного вклада группы В в коэффициенты активности было принято значение радиуса ван-дер-ваальсаr_W=1.8 Å. Тогда параметры группы В: R_K=0.9371, Q_K=0.9809.

Неизвестные параметры взаимодействия групп определялись по экспериментальным данным парожидкостного равновесия с использованием алгоритма регрессионного анализа на основе метода наименьших квадратов.

Параметры B-CH_2, B-OCH_2 былиопределены по парожидкостному равновесию в бинарных системах триметилборат (ТМБ)-циклогексан, триметилборат-н-гептан. Среднее отклонение расчета от эксперимента для концентраций составило 3%, для температур 1%.

Остальные неизвестные параметры определялись по экспериментальным данным температур кипения при атмосферном давлении бинарных растворов этанол-АЭБК-ДЭГ(ТЭГ), изопропанол-АЭБК-ДЭГ(ТЭГ), вода-АЭБК-ДЭГ(ТЭГ). Экспериментальные данные были получены на установке Свентославского. Точность определения температур кипения на данной установке для чистых воды и спиртов составила 0.5%. Параметры B-NCH_2, B–OH были определены по температурам кипения этанол-АЭБК-ДЭГ(ТЭГ), изопропанол-АЭБК-ДЭГ(ТЭГ). Параметры B–H_2O определялись по температурам кипения вода-АЭБК-ДЭГ(ТЭГ). Результаты сравнения рассчитанных и экспериментальных данных представлены на рисунке2. Среднее расхождение составило 1%. В таблице 1 приводятся определенные параметры взаимодействия группы бора. Проверка адекватности описания равновесия пар-жидкость водно-спиртовых растворов в присутствии АЭБК проводилась путем сравнения расчетных и экспериментальных данных по открытому испарению (рис. 1).

Таблица 1 - Параметры взаимодействия группы бора (B_j)

i	A_{ij}	A_{ji}
CH_2	170.60	-384.58
OCH_2	405.99	1825.92
OH	-281.82	-722.30
NCH_2	113.96	-13.53
H_2O	-237.83	-1136.35

Видно хорошее воспроизведение экспериментальных данных расчётами по модели UNIFAC с предложенными параметрами.

На рисунке3 приводится сравнение эффективности АЭБК как экстрагента по сравнению с гликолями и глицерином. Видно, что при одинаковых массовых концентрациях в смеси АЭБК сильнее увеличивает относительную летучесть спирта по сравнению с используемыми органическими экстрагентами. Степень влияния АЭБК на фазовое равновесие спирт-вода, оказывается на уровне наиболее эффективных имидазольныхионных жидкостей [4]. Таким образом, АЭБК являются перспективными экстрагентами для процессов экстрактивной ректификации водно-спиртовых смесей.

Проводилось моделирование процесса экстрактивной ректификации смеси этанол-вода в присутствии АЭБК-ТЭГ. Расчеты процесса ректификации выполнялись на основе модели теоретической тарелки. Коэффициенты активности рассчитывались по модели UNIFAC с параметрами, приведенными в таблице 1. В расчетах варьировались общее число тарелок, флегмовое число и расход экстрагента. Тарелка питания подбиралась из условия максимальной концентрации этанола в дистилляте при прочих заданных условиях.

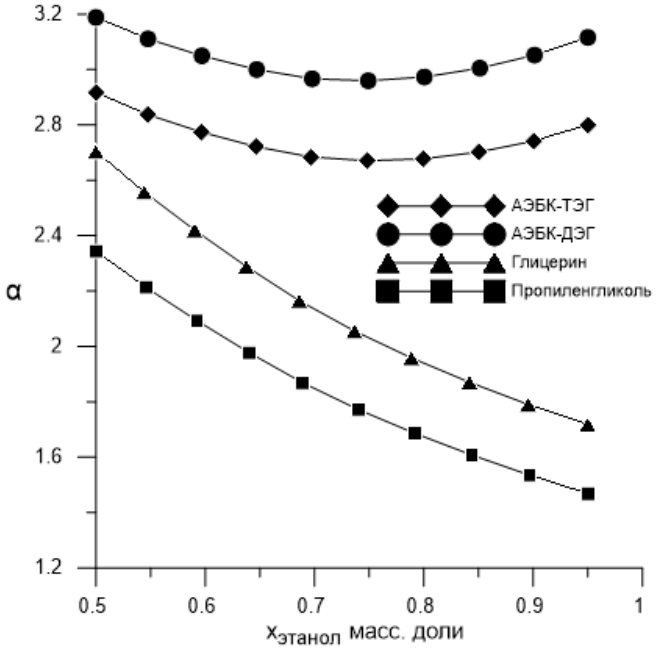


Рисунок 3 – Изменение коэффициента относительной летучести в зависимости от концентрации этанола в смеси

На рисунке 4 показано влияние флегмового числа и расхода экстрагента на состав дистиллята в колонне с 18 теоретическими тарелками. Можно увидеть, что требуемое содержание спирта в дистилляте достигается для расхода экстрагента начиная с удельного расхода ef=0.3.

Для фиксированного значения содержание спирта в дистилляте XdE=99.5%мас, были получены зависимости флегмового числа от удельного расхода экстрагента (рисунок 5) для трех значений числа теоретических тарелок в колонне: NT=18, NT=25 и NT=30. Видно, что флегмовое число уменьшается с увеличением расхода экстрагента, а с увеличением числа тарелок требуемый состав дистиллята может быть получен при меньшем расходе экстрагента.

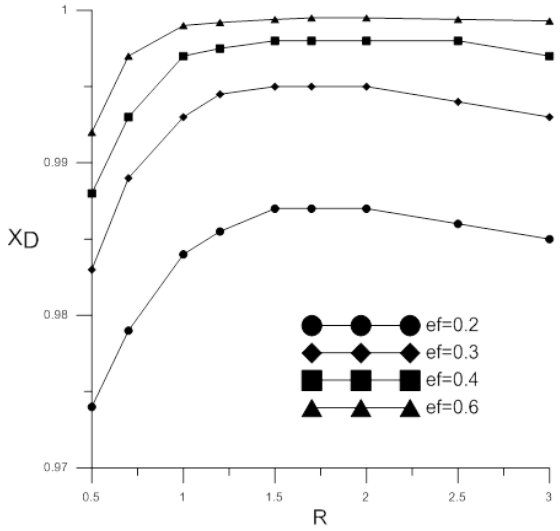


Рисунок 4 – Влияние флегмового числа на концентрацию в дистилляте при изменении количества подаваемого экстрагента в колонну ректификации.

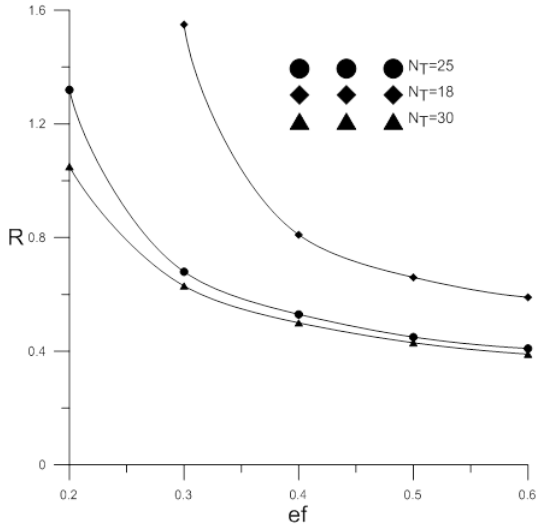


Рисунок 5 – Изменение флегмого числа от количества подаваемого экстрагента при разном количестве тарелок N.

Выводы

В результате проведенных исследований получены параметры групповых составляющих модели UNIFAC, которые позволяют проводить предсказательные расчёты условий парожидкостного равновесия водно-спиртовых смесей в присутствии боратов, которые могут быть потенциально эффективными экстрагентами для процессов обезвоживания спиртов методом ректификации. Экспериментально изучены физико-химические свойства АЭБК. Все это может быть основой дальнейших поисковых исследований для создания энерго-ресурсосберегающих промышленных технологий получения спиртов с малым содержанием воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации грант № 075-00315-20-01 по теме «Энергоресурсосберегающие процессы разделения жидких смесей для выделения промышленных растворителей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52574-2006. Спирт этиловый синтетический технический и денатурированный Технические условия . М.: Национальный стандарт РФ. 2007.40 с.

2. Равновесие пар-жидкость смеси этиловый спирт - вода в присутствии ионной жидкости [Emim][Cl], Клинов А.В., Минибаева Л.Р., Малыгин А.В., Хайруллина А.Р., Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 20. С. 18-19.

3. Физико-химические свойств аминоэфира борной кислоты и его водных растворов Хайруллина А.Р., Малыгин А.В., Дулмаев С.Э., Сазонов О.О., Емелина О.Ю., Давлетбаев Р.С., Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 4. С. 58-62.

4. I.M. Davletbaeva, A.V. Klinov, A.R. Khairullina, A.V. Malygin, S.E. Dulmaev, A.R. Davletbaeva, T.A. Mukhametzyanov , Organoboron ionic liquids as extractants for distillation process of binary ethanol water mixtures / Processes. 2020, T.8, C.628

УДК 677.074 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-54-57

ОПЫТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ
EXPERIMENTAL-CALCULATED STUDY OF HYDRO-MECHANICAL PROCESSES WITHIN ELECTROTHERMAL FLUIDIZED BED

Митрофанов Андрей Васильевич*, Мизонов Вадим Евгеньевич*,
Василевич Сергей Владимирович, Малько Михаил Владимирович *****
Andrey V. Mitrofanov*, Vadim E. Mizonov*, Sergej V. Vasilevich, Mihail V. Mal'ko*****

**Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, Россия, Иваново*
**Ivanovo State Power Engineering University, Russia, Ivanovo*
(e-mail: and2mit@mail.ru)
***Белорусская государственная академия авиации, Республика Беларусь, Минск*
**Belorusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus, Minsk*
(e-mail: svasilevich@yandex.ru)
****Институт энергетики НАН Беларуси, Республика Беларусь, Минск*
Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus, Minsk
(e-mail: malko.mikhail@gmail.com)

Аннотация: Выполнено исследование механизмов формирования расширения псевдоожиженного слоя проводящих частиц.

Abstract: The study on forming the expansion of fluidized bed of conductive particles is carried out.

Ключевые слова: псевдоожиженный слой, резистивный нагрев, цепи Маркова.
Keywords: fluidized bed, resistance heating, Markov chains.

Конечной целью проводимого исследования является опытно-теоретическое исследование формирования псевдоожиженного слоя материала для установления закономерностей и отношений между гидромеханическими процессами (образованием псевдоожиженного слоя, перемешиванием и миграцией частиц в нем) и проводимостью слоя, которая, в конечном счете, определяет формирование тлеющего разряда и температурное состояние сыпучей среды. Непосредственной целью настоящего этапа исследования является опытное исследование и поиск математических инструментов для описания гидромеханической ситуации в псевдоожиженном слое.

В работе в качестве основного математического инструмента для построения математической модели предполагается использование теории цепей Маркова, которая предполагает декомпозицию объема слоя на представительные элементы (ячейки) малых, но конечных, размеров. В каждой ячейке все свойства считаются распределенными равномерно, однако, набор (цепь) ячеек позволяет рассмотреть слой как объект с распределенными параметрами. В качестве первоосновы выбрана модель псевдоожижения, предложенная ранее [1-2], однако, в нее вносится ряд изменений, связанных с введением зависящих от концентрации частиц распределенных источников теплоты q, а также направленных на параметрическую идентификацию специфических для электротермического слоя характеристик. Кроме того, модель адаптирована для описания конкретной установки с электротермическим кипящим слоем, подробное описание которой можно найти в работе [3].

Принципиальная схема установки приведена на рисунке 1а. Корпус аппарата выполнен в виде кварцевого цилиндра 1 с внутренним диаметром 29 мм. Газораспределительное устройство представляет собой основание катода, выполненное из нержавеющей стали, на котором смонтирована решетка 2, изготовленная из ниобия. Данная решетка имеет 35×35

рядов отверстий размером 50×50 мкм. В верхней части корпуса аппарата смонтирована решетка-анод 4, выполненная из ниобия, с размером ячеек 1×1 мм, позволяющим загружать аппарат сыпучей средой 3 (частицы никеля с эквивалентным диаметром 180 мкм).

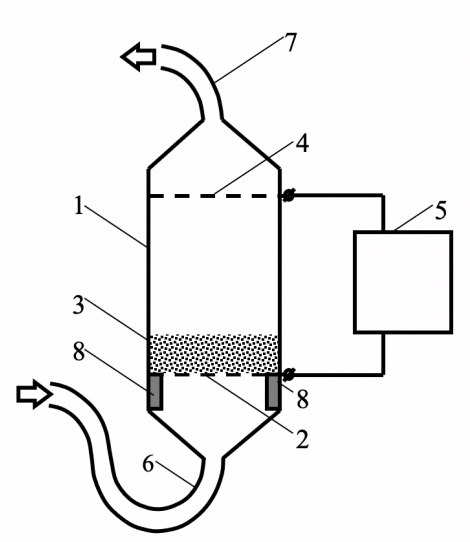


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки электротермического кипящего слоя: 1 – рабочая камера; 2 – газораспределительная решетка-катод; 3 – порошок; 4 – анод; 5 – источник электропитания; 6 – штуцер подачи газа; 7 – штуцер отвода газа

Таким образом, кипящий слой сыпучего материала формируется в пространстве между катодом и анодом. При этом от первого к последнему в процессе ожижения электрический заряд переносится движущимися частицами. К электрическим выводам решеток присоединены электроды источника 5 электропитания соответствующей полярности. Максимальное напряжение источника питания составило 15000 В, максимальный ток 0,1 А. Подача и отвод ожижающего агента (атмосферный воздух с расходом до 10 л/мин) осуществляется через штуцеры 6 и 7 соответственно. Тестовые опыты проводились для осуществления процесса получения оксидов азота, чем обусловлен выбор сыпучей и несущей сред. Однако в настоящей работе приводятся только результаты численно-экспериментального исследования формирования расширения слоя.

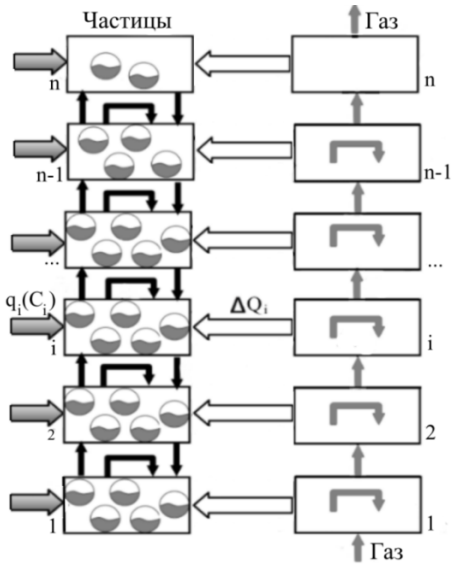


Рисунок 2 – Схема ячеечной модели процесса

В основу модели положена ячеечная схема (рис. 2): аппарат представлен как совокупность из n ячеек идеального смешения. Объемное содержание частиц и газа по ячейкам записывается в векторы состояния для соответствующих фаз S_p и S_g. Вероятности миграций частиц между ячейками содержатся в переходной матрице P_p, а вероятности продвижения газа (принята модель идеального вытеснения) вдоль цепи ячеек записываются в переходную матрицу P_g.

Модель является дискретной: изменения векторов состояний наблюдаются в дискретные моменты времени $t_k=(k-1)\Delta t$ (где Δt – промежуток времени между соседними фиксируемыми состояниями системы, k – номер временного шага) и описываются рекуррентными матричными равенствами:

$$\boldsymbol{S}_p^{k+1}=\boldsymbol{P}_p^k\,\boldsymbol{S}_p^k, \quad (1)$$

$$\boldsymbol{S}_g^{k+1}=\boldsymbol{P}_g^k\,\boldsymbol{S}_g^k+\boldsymbol{S}_{gf}, \quad (2)$$

где $\boldsymbol{S}_{gf}$ – вектор подачи газа (при подаче через решетку он имеет единственный ненулевой элемент в первой ячейке, равный объему газа, подаваемому в нее за один переход).

Особенностью разрабатываемой модели является то, что в отличие от подобных линейных моделей [4], локальные скорости движения ожижающего агента в ячейках и пропорциональные этим скоростям вероятности миграций частиц рассчитываются с учётом локальной объемной концентрации этих частиц и ее влияния на уменьшение живого сечения потока. Подход к описанию стесненного движения частицы и методика расчета ее скорости витания в таких условиях на основе выполненного нами обобщения экспериментальных данных описана в работах [1-2]. Фактическая скорость фильтрации воздуха в ячейке определяется по соотношению [2]:

$$W_i=\frac{W_{0i}}{1-\pi\left(\dfrac{C_i^k}{8C_{max}}\right)^{2/3}}, \quad (3)$$

где C_{max} – максимально возможная объемная концентрация частиц, соответствующая плотному слою; C_i^k – текущая объемная концентрация частиц в i-ой ячейке, соответствующая k-му временному переходу.

Тогда скорость движения частицы в рассматриваемом мезообъеме $(W_i - V_{si})$ и соответствующая ей вероятность переноса твердой фазы из этой ячейки v_i (элементы матрицы $\boldsymbol{P}_p$) определяется следующим соотношением:

$$v_i=(W_i-V_{si})\,\Delta t/\Delta x, \quad (4)$$

где W_i – скорость обтекания частиц в i-ой ячейке; V_{si} – скорость витания частиц в i-ой ячейке; Δx – высота ячейки.

Аэродинамическая крупность материала представляется через скорость витания одиночной частицы V_{si}, которая для установившегося состояния псевдоожижения полагается равной локальной скорости несущей среды в ячейке W_i. В свою очередь скорость витания частицы связана с ее весом через соотношение:

$$P=C_d\cdot f_p\cdot\rho_g\frac{V_{si}^2}{2} \quad (5)$$

где C_d – коэффициент сопротивления частицы, функциональная зависимость $C_d=f(Re)$ для расчета которого приведена в работах [1-2]; f_p – площадь наибольшего поперечного сечения одиночной частицы, перпендикулярная вектору скорости; ρ_g – плотность газа.

Приведенные соотношения являются базовыми для модели и позволяют определить вероятности переноса из i-ой ячейки: на одну ячейку вперед (p_{ui}) или назад (p_{di}). Вероятность остаться p_{si} рассчитывается как разность между единицей и остальными вероятностями, так как рассматриваемые события составляют полную группу. Таким образом, вероятности связаны с параметрами процесса следующими зависимостями [1-2]:

$$p_{si}=1-p_{ui}-p_{di}, \quad (6)$$

$$p_{di}=0 \text{ при } (W_i-V_{si})>0, \quad (7)$$

$$p_{di}=v_i \text{ при } (W_i-V_{si})<0, \quad (8)$$

$$p_{ui}=v_i \text{ при } (W_i-V_{si})>0, \quad (9)$$

$$p_{ui}=0 \text{ при } (W_i-V_{si})<0. \quad (10)$$

На рисунке 3 показаны результаты сравнения численного (линия) и натурного (точки) эксперимента. Как видно, в исследуемом диапазоне скоростей несущей среды расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышают 4%.

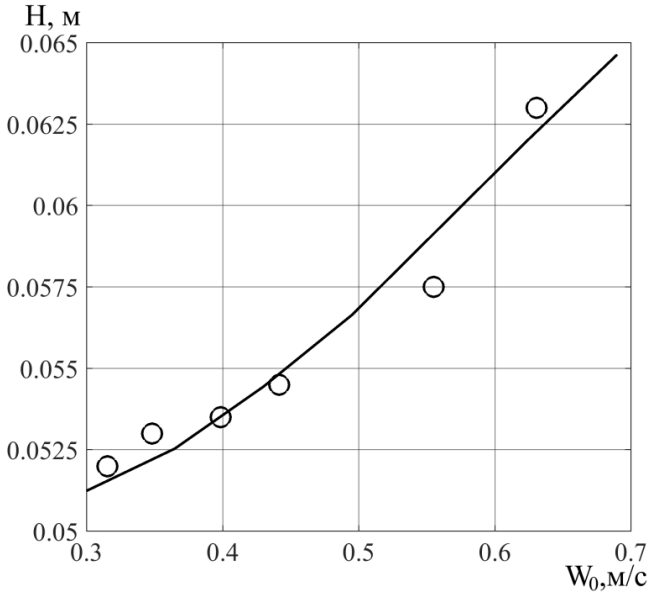


Рисунок 3 – Сравнение расчетных (линии) и экспериментальных (точки) значений расширения кипящего слоя

Выводы

В ходе работы показана прогностическая эффективность предложенной ранее ячеечной модели для прогнозирования расширения псевдоожиженного слоя мелкодисперсного проводящего материала, что, в том числе, свидетельствует о надлежащем выборе материальных констант для моделирования процесса (коэффициента сопротивления). Полученные результаты позволяют говорить о возможности перехода к описанию неоднородности содержания твердой фазы по высоте слоя, что традиционно связано с моделированием «макродиффузии» частиц в его объеме, а в дальнейшем – к изучению электросопротивления представительных элементов слоя в зависимости от концентрации частиц в них. В конечном счете, последнее определяет характер и эффективность резистивного нагрева материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанов А.В. Математическая модель эволюции состояния слоя дисперсного топлива при нагреве и сушке в плотном и псевдоожиженном слое // Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 2. С. 67–70.

2. Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Tannous K., Ovchinnikov L.N. A Markov chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties // Particulate Science and Technology. 2018. Vol. 36. No. 2. P. 244-253.

3. Василевич С.В., Степаненко В.Н., Мартынюк В.И., Сенько С.Ф., Шапорова Е.А. «Разработка экспериментального стенда электротермического кипящего слоя для исследования высокотемпературных процессов в газовых потоках» // Авиационный вестник. № 2. Минск: БГАА, 2020, С. 12-15.

4. Berthiaux H., Mizonov V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2004. V.85. No.6. P. 1143–1168.

УДК 66.088 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-58-61

ОПЫТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ
EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF THE PROCESS OF OBTAINING CARBON NANOMATERIALS IN ELECTROTHERMAL FLUIDIZED BED

Василевич Сергей Владимирович*, Малько Михаил Владимирович, Митрофанов Андрей Васильевич****
Siarhei V. Vasilevich*, Mihail V. Malko, Andrey V. Mitrofanov*****

**Белорусская государственная академия авиации, Республика Беларусь, Минск*
**Belorusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus, Minsk*
(e-mail: svasilevich@yandex.ru)
***Институт энергетики НАН Беларуси, Республика Беларусь, Минск*
Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus, Minsk
(e-mail: malko.mikhail@gmail.com)
****Ивановский государственный энергетический университет, Российская Федерация, Иваново*
****Ivanovo State Power Engineering University, Russian Federation, Ivanovo*
(e-mail: and2mit@mail.ru)

Аннотация: Дано описание экспериментальной установки, включающей в себя реактор электротермического кипящего слоя. В работе представлены методика и результаты экспериментов с применением данной установки для получения углеродных наноматериалов.

Abstract: Description of the experimental unit with electrothermal fluidized bed reactor is presented. The paper discusses the methods and experimental results obtained with using of the unit for production of carbon nanomaterials.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, электротермический кипящий слой, углеродсодержащий газ.

Keywords: carbon nanotubes, electrothermal fluidized bed, carbon-containing gas.

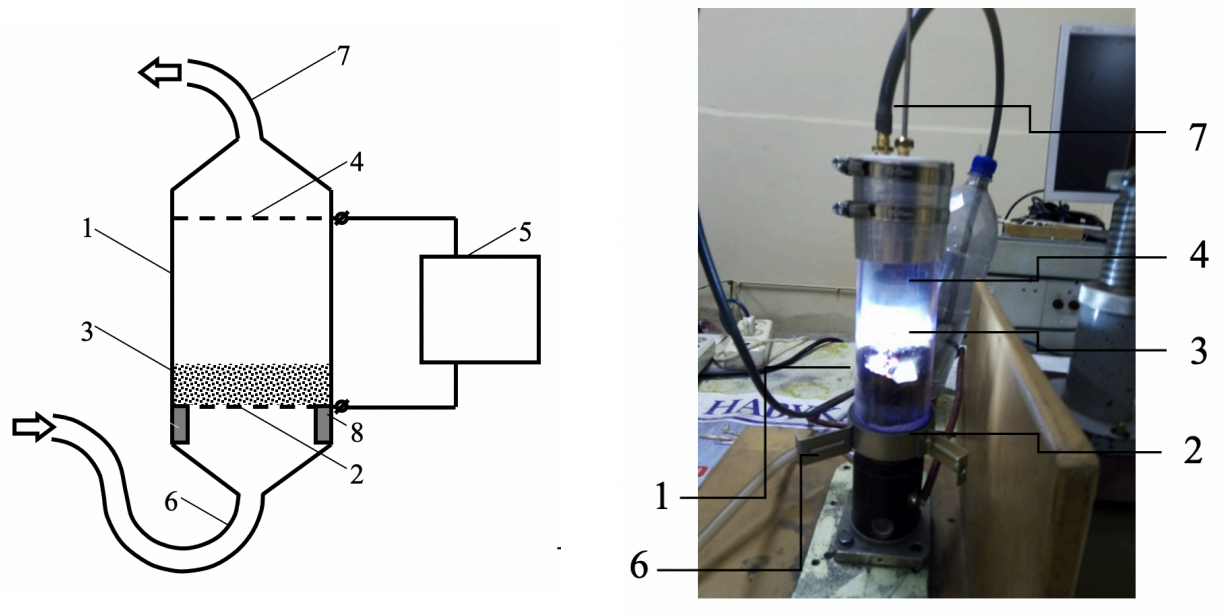
Углеродные нанотрубки (УНТ) образуются в результате химических превращений углеродсодержащих материалов при повышенных температурах. Условия, способствующие подобным превращениям, весьма разнообразны. Соответственно этому разнообразен и набор методов, используемых для получения углеродных нанотрубок. Известны две основные группы способов получения углеродных наноматериалов: а) испарение графита с последующей десублимацией продукта при охлаждении паров и б) разложение углеродсодержащих газов. Большое внимание уделяется пиролитическому синтезу углеродных нанотрубок из газообразных углеводородов (метан, этилен, ацетилен и др.), а также из оксида углерода в присутствии катализатора – Fe, Co, Ni или их сплавов [1].

В последнее время появляются новые методы, направленные на производство УНТ в крупных масштабах, что открывает возможность их широкого практического применения в различных областях. Анализ различных вариантов аппаратурного оформления таких процессов позволяет выделить среди наиболее перспективных технологию с реактором кипящего (псевдоожиженного) слоя, в котором мелкозернистые частицы катализатора ожижаются углеродсодержащим газом. Известные преимущества кипящего слоя: изотермичность, высокая производительность реактора, достигаемая за счет значительного роста поверхности катализатора, позволяют получать однородный продукт, автоматизировать процесс. Кроме того, реакторы с кипящим слоем могут быть использованы для организации непрерывного процесса.

Целью данной работы было исследование возможности получения многостенных углеродных нанотрубок путем пропускания углеродсодержащего газа через электротермический кипящий слой.

Авторами была разработана экспериментальная установка электротермического кипящего слоя, которая позволяет генерировать плазму в реакторе, и может быть использована для получения углеродных наноматералов.

Принципиальная схема и общий вид установки приведены на рисунке 1.



а) б)

Рисунок 1 – Схема *а* и общий вид *б* установки электротермического кипящего слоя
1 – рабочая камера; 2 – решетка; 3 – порошок; 4 – анод; 5 – источник электропитания;
6 – штуцер подачи газа; 7 – штуцер отвода газа

Как видно из рисунка 1, установка состоит из установленной вертикально рабочей камеры 1, в нижней части которой смонтированы решетка 2 с расположенным на ней порошком 3 и совместно образующие катод, а в верхней части расположен анод 4. Рабочая камера (материал рабочей камеры – кварц) установлена вертикально, катод расположен в ее нижней части и выполнен в виде мелкоячеистой решетки с расположенным на ней слоем электропроводного порошка. Анод 4 с учетом конкретного применения может быть выполнен как сплошным, так и в виде решетки. В случае сплошного анода между ним и стенками рабочей камеры оставляют канал для выхода газов. На решетку 2 и анод 4 подается напряжение от источника электропитания 5. Рабочий газ подается через штуцер подачи углеродсодержащего газа 6 (пропан, ацетилен), расположенный в нижней части рабочей камеры 1. После обработки газ удаляется из рабочей камеры 1 через штуцер отвода газа 7, расположенный за анодом 4.

Описание работы экспериментальной установки

Установка работает следующим образом. Решетка 2 присоединяется к отрицательному электроду источника электропитания, а анод 4 – к положительному. Включением источника электропитания на электроды подается рабочее напряжение, порошок 3 при этом заряжается отрицательно. Поскольку расстояние между решеткой 2 со слоем порошка 3 и анодом 4 в данный момент велико, то ток через устройство не протекает. Затем в рабочую камеру 1 подается углеродсодержащий газ. В качестве газа использовался пропан и этилен. Под действием потока газа порошок 3 «закипает», расстояние между порошком 3, несущим отрицательный заряд, и анодом 4, заряженным положительно, значительно сокращается, и возникает электрический пробой, который ионизирует обрабатываемый газ. В следующий

момент времени вследствие лавинной ионизации газа в межэлектродном пространстве рабочей камеры 1 загорается плазма (рисунок 2).



Рисунок 2 – Общий вид плазмы тлеющего разряда

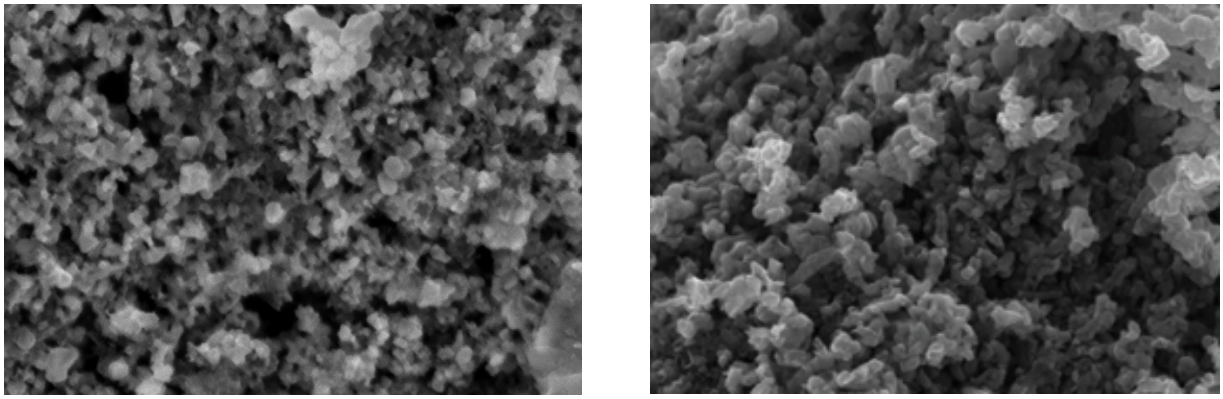
В качестве материала кипящего слоя использовался Fe-Co/Al_2O_3, который является катализатором роста углеродных нанотрубок. Перед началом эксперимента материал слоя взвешивался, после чего помещался в кварцевый реактор. Включали источник питания и одновременно открывали баллон с углеродсодержащим газом. При прохождении через плазму газ разлагается с высвобождением атомов углерода, которые, оседая на частицах порошка-катализатора, формируют наноструктуры (нанотрубки).

Режим горения плазмы задается в соответствии с требованиями техпроцесса и регулируется расходом газа, напряжением между электродами и силой протекающего тока.

Были проведены две серии испытаний установки: с пропусканием через слой пропана и этилена с расходом 10 л/мин. Время каждого испытания составляло от 1 до 4 минут.

После проведения эксперимента снова взвешивали материал кипящего слоя.

На рисунке 3 представлены фотографии углеродных наноматериалов, полученных при использовании пропана *а* и ацетилена *б*.



а) б)

Рисунок 3 – Общий вид углеродных наноматериалов, полученных при использовании пропана *а* и ацетилена *б*

Определялся такой показатель как относительный массовый выход углеродных наноматериалов. Он определялся как отношение массы полученных углеродных нанотрубок к начальной массе катализатора.

На рисунке 4 представлены графики зависимости относительного массового выхода углеродных наноматериалов от времени пропускания газа через катализатор. В качестве газа использовались ацетилен (темные символы) и пропан (светлые символы).

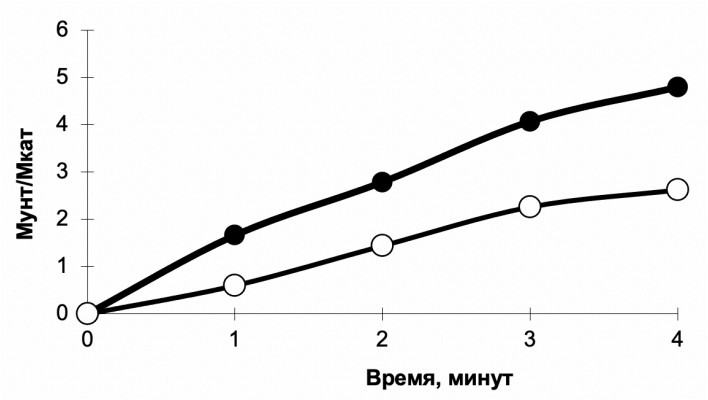


Рисунок 4 – Графики зависимости относительного массового выхода углеродных наноматериалов от времени пропускания газа

Из рисунка 4 видно, что при использовании ацетилена в качестве ожижающего агента псевдоожижения наблюдается более интенсивный рост углеродных наноматериалов, чем при использовании пропана.

Диаметр трубок близок к D ≈ 50 нм, длина намного больше диаметра, хотя количественные оценки их длины затруднены из-за изогнутости и переплетения трубок (рисунок 3).

Вследствие перемешивания псевдоожиженных частиц синтезированные нанотрубки (преимущественно многостенные с внешним диаметром ~ 10 нм и длиной несколько мкм) могут образовывать агломераты средним размером ~ 500 мкм и кажущейся плотностью 40-200 кг/м3 [2-5]. При этом значительно затрудняется процесс псевдоожижения материала, что требует дополнительных технических решений. В дальнейшем планируется доработать экспериментальную установку с целью обеспечения более стабильного псевдоожижения слоя, а также изучить влияние типа катализатора и режимных параметров процесса на состав и свойства получаемых углеродных наноматериалов.

Выводы

Экспериментально показано, что оборудование с элетротермическим кипящим слоем позволяет получать углеродные наноматериалы путем пропускания через слой углеродсодержащего газа. В качестве псевдоожижающего газа хорошо зарекомендовал себя ацетилен. Есть все основания предполагать, что она позволит также повысить качество УНТ, получаемых из полимеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раков Э.Г. Методы получения углеродных нанотрубок // Усп. Хим. 2000. Т. 69. № 1. С. 41.

2. Wang Y., Wei F., Luo G., Yu H., Gu G. The large-scale production of carbon nanotubes in a nano-agglomerate fluidized-bed reactor // Chem. Phys. Lett., 2002. Vol. 364. №5-6. P. 568.

3. Qian W.Z., Yu, H., Wei, F., Wang, Z.W. Synthesis of carbon nanotubes from liquefied petroleum gas containing sulfur // Carbon, 2002. Vol. 40. P. 2968-2970.

4. QianJ W.Z., Wei, F., Wang, Z.W., et al. Production of Carbon nanotubes in a packed bed and a fluidized bed // AIChE J., 2003. Vol. 49. No. 3. P. 619-625.

5. Qian W.Z., Liu T., Wei F., Yuan H. Quantitative Raman analysis of mixed sample of single and multi-walled carbon nanotubes // Carbon, 2003. Vol. 41. No. 9. P. 1851-1854.

УДК 66.088 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-62-66

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КИНЕТИКУ МАССОПЕРЕНОСА В БЕТОНЕ ПРИ ЖИДКОСТНОЙ КОРРОЗИИ
INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE KINETICS OF MASS TRANSFER IN CONCRETE DURING LIQUID CORROSION

Румянцева Варвара Евгеньевна, Коновалова Виктория Сергеевна, Осыко Алексей Валентинович
Varvara E. Rumyantseva, Viktoriya S. Konovalova, Aleksey V. Osyko

Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State Polytechnic University, Russia, Ivanovo
(e-mail: varrym@gmail.com, kotprotiv@yandex.ru, mechanic4991@gmail.com)

Аннотация: Рассмотрена кинетика выщелачивания цементного бетона при жидкостной коррозии. Приведены результаты экспериментального исследования влияния температуры на скорость жидкостной коррозии бетона. При понижении температуры растворимость гидроксида кальция повышается, что способствует ускорению протекания массообменных процессов в бетоне. Установлены характеристики массопереноса, позволяющие определять срок службы бетонного изделия.

Abstract: The kinetics of leaching of cement concrete under liquid corrosion is considered. The results of an experimental study of the influence of temperature on the rate of liquid corrosion of concrete are presented. When the temperature decreases, the solubility of calcium hydroxide increases, which contributes to the acceleration of mass transfer processes in concrete. The characteristics of mass transfer that allow determining the service life of a concrete product are established.

Ключевые слова: массоперенос, коррозия бетона, кинетика коррозии, жидкостная коррозия, выщелачивание.

Keywords: mass transfer, concrete corrosion, corrosion kinetics, liquid corrosion, leaching.

Исследования коррозионной стойкости проводились на образцах-кубах с гранью 3 см, изготовленных из портландцемента марки ПЦ 500-Д0 с водоцементным отношением В/Ц = 0,3. Образцы погружались в водную среду объемом 1000 см^3, откуда с периодичностью 14 суток отбирались пробы для титрования, объемом 100 см^3. На момент погружения возраст образцов достиг 28 суток. Для отслеживания зависимости коррозии бетонов от температуры образцы выдерживались в водной среде при температурах 6 ºС и 20 ºС. В качестве реакционной среды при изучении процесса коррозии первого вида используется дистиллированная вода.

Контроль содержания катионов кальция в водной среде проводился методом объемного титрования отобранных проб воды трилоном Б в присутствии индикатора хромогена черного, результаты которого представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 следует, что при температуре 6 °С концентрация катионов кальция в воде выше, чем при 20 °С. Это обусловлено тем, что при понижении температуры растворимость гидроксида кальция повышается [1, 2], что усиливает развитие коррозии первого вида и ускоряет разрушение бетона.

Анализируя кинетику процесса, можно определить изменение плотности потока массы вещества из бетона в жидкую среду, а также, совместно с данными о динамике процесса, рассчитать характеристики массопереноса, такие как коэффициент массопроводности и массоотдачи.

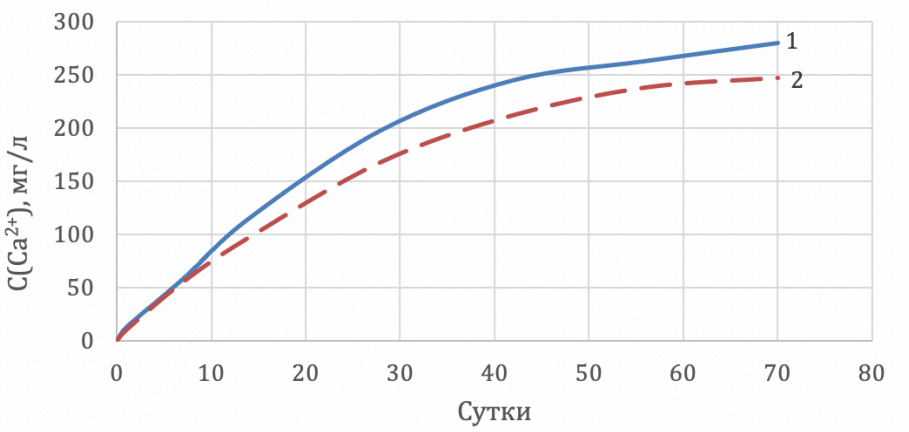


Рисунок 1 – Кинетические кривые изменения концентрации катионов кальция для образцов бетона в воде при температуре: 1 – 6 °С; 2 – 20 °С.

Характеристики процесса массопереноса «свободного гидроксида кальция» при коррозии бетона первого вида в результате воздействия водной среды рассчитываются по разработанной в рамках научной школы академика РААСН С.В. Федосова математической модели (1) [3]:

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

Здесь: n – число членов ряда; ξ – координата интегрирования в диапазоне $0 \le \xi \le \bar{x}$; $Ki_m^* = \frac{q_б\delta}{kC_0\rho_б}$ – 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; $Po^*(\bar{x}) = \frac{q_v(x)\delta^2}{kC_0\rho_б}$ – модифицированный критерий Померанцева.

По выражению (1) произведен расчет профилей концентрации «свободного гидроксида кальция» по толщине цементобетонного образца, подвергнутого воздействию водной среды, на разных этапах проведения эксперимента, при разных температурах (рисунки 2 и 3).

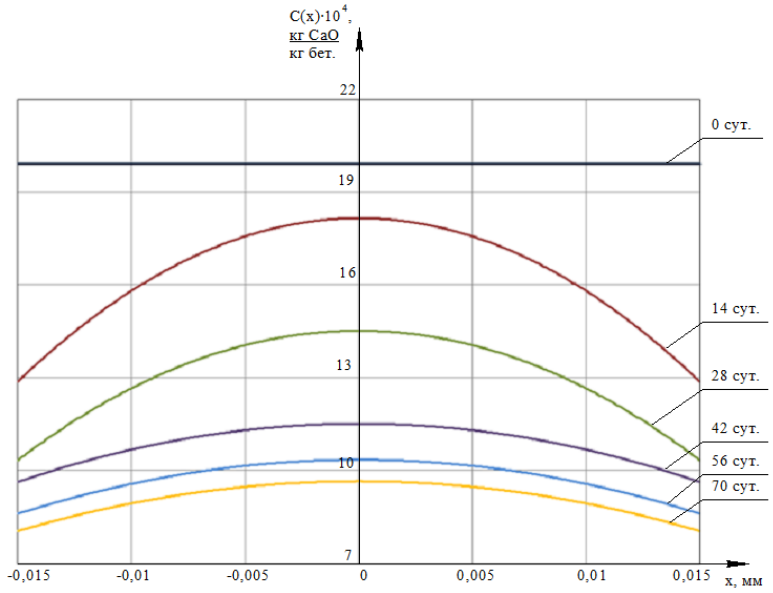


Рисунок 2 – Профили концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонного образца, выдержанного при 6 °С

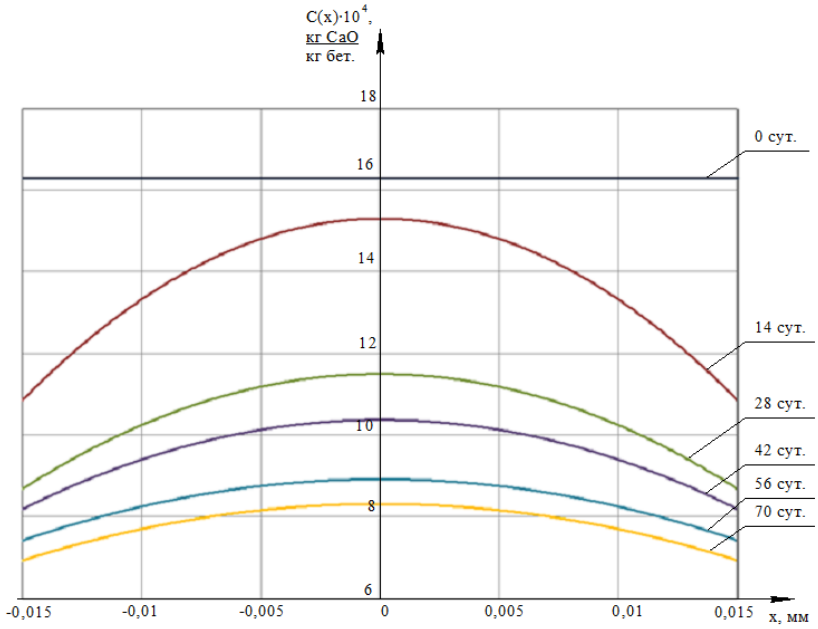


Рисунок 3 – Профили концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонного образца, выдержанного при 20°С.

Анализ полученных профилей концентрации «свободного гидроксида кальция» по толщине образца цементного камня в водной среде позволяет определить градиенты концентраций переносимого компонента на границе раздела фаз и рассчитать по формуле (2) значения коэффициентов массопроводности k:

$$k = \frac{q}{\rho_0 \cdot \frac{dC}{dx}}, \quad (2)$$

где: q – плотность потока массы вследствие химических реакций, кг/(м^2·с), рассчитывается по формуле (3); ρ_0 – плотность твердой фазы, кг/м^3.

$$q = \frac{\Delta C_{ж}}{S \cdot \tau}, \quad (3)$$

где: $\Delta C_{ж}$ – масса вещества, перешедшего из цементного камня в жидкую среду, кг.

Для расчета процессов переноса вещества удобно вводить коэффициент массоотдачи β, определяемый по формуле (4):

$$\beta = \frac{q}{\Delta C}, \quad (4)$$

где: ΔС – разность концентраций, кг/м^3.

Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Экспериментально рассчитанные характеристики массопереноса.

Для системы «вода – цементный бетон», при 6 °С					
Наименование показателя	τ, сутки				
	14	28	42	56	70
Плотность потока «свободного $Ca(OH)_2$» в образце, кг/(м^2·с)	$1{,}68\cdot10^{-8}$	$1{,}31\cdot10^{-8}$	$0{,}66\cdot10^{-8}$	$0{,}38\cdot10^{-8}$	$0{,}18\cdot10^{-8}$
Коэффициент массопроводности, м^2/с	$5{,}58\cdot10^{-13}$	$5{,}07\cdot10^{-13}$	$6{,}22\cdot10^{-13}$	$6{,}83\cdot10^{-13}$	$5{,}49\cdot10^{-12}$
Коэффициент массоотдачи, м/с	$3{,}07\cdot10^{-9}$	$2{,}38\cdot10^{-9}$	$1{,}21\cdot10^{-9}$	$0{,}7\cdot10^{-9}$	$0{,}41\cdot10^{-9}$
Для системы «вода – цементный бетон», при 20 °С					
Наименование показателя	τ, сутки				
	14	28	42	56	70
Плотность потока «свободного $Ca(OH)_2$» в образце, кг/(м^2·с)	$1{,}45\cdot10^{-8}$	$1{,}1\cdot10^{-8}$	$0{,}7\cdot10^{-8}$	$0{,}31\cdot10^{-8}$	$0{,}16\cdot10^{-8}$
Коэффициент массопроводности, м^2/с	$4{,}81\cdot10^{-13}$	$4{,}26\cdot10^{-13}$	$6{,}58\cdot10^{-13}$	$5{,}48\cdot10^{-13}$	$4{,}62\cdot10^{-12}$
Коэффициент массоотдачи, м/с	$3{,}14\cdot10^{-9}$	$2{,}37\cdot10^{-9}$	$1{,}52\cdot10^{-9}$	$0{,}66\cdot10^{-9}$	$0{,}41\cdot10^{-9}$

Из таблицы 1 видно, что коэффициент массопроводности k увеличивается с течением времени, а коэффициент массоотдачи β уменьшается, что полностью согласуется с физическими представлениями о процессах, протекающих при коррозионном массопереносе по механизму первого вида в ограниченном объеме жидкой фазы [4].

Долговечность – один из важнейших показателей качества строительных конструкций. Описанные выше экспериментальные данные, используемые для подстановки в математические модели массопереноса для жидкостной коррозии цементных бетонов по механизму первого вида, позволяют прогнозировать динамику массообменных процессов в теле бетонных конструкций [5].

В результате проведенных расчетов определены сроки, при которых концентрации «свободного гидроксида кальция» на поверхности образцов достигнут величин, соответствующих началу разложения высокоосновных составляющих бетона: при температуре 6 °С – 2 года 9 месяцев, при температуре 20 °С – 4 года 5 месяцев.

Выводы

При анализе экспериментальных данных, полученных методом комплексонометрии, определены фактические значения концентраций «свободного гидроксида кальция» в порах бетона и растворенного гидроксида кальция в жидкости в различные моменты времени.

Определены основные параметры массопереноса (коэффициенты массопроводности, массоотдачи) для портландцемента марки ПЦ 500-Д0 при температуре 6 °С и 20 °С.

При пониженной температуре (6 °С) скорость коррозии цементных бетонов увеличивается, разложение высокоосновных соединений в образцах начинается в 1,5 раза быстрее по сравнению с результатами испытаний, проведенными при температуре 20 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курс химии. В двух частях. Ч. II. Специальная для строительных институтов и факультетов / Под ред. В.А. Киреева. М.: Высшая школа, 1975. 236 с.

2. Пасманик М.И., Сасс-Тисовский Б.А., Якименко Л.М. Производство хлора и каустической соды: Справочник. М.: Химия, 1966. 308 с.

3. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Konovalova V.S., Loginova S.A. Mathematical modelling of diffusion processes of mass transfer of «free calcium hydroxide» during corrosion of cement concretes // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. V. 14 No. 3. P. 161-168.

4. Красильников И.В. Математическая корреляция динамики диффузионных процессов в капиллярно-пористом теле на примере коррозионного массопереноса цементных бетонов // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК). 2017. № 2. С. 488-490.

5. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Федосова Н.Л. Исследование диффузионных процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 1. С. 99-104.

УДК 681.5 (07) DOI: 10.37816/eeste-2021-1-66-70

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫХ ПОЛЯХ DEFORMATION OF FIBROUS MATERIALS IN TEMPERATURE AND POWER FIELDS

Иванов Максим Сергеевич, Поляков Анатолий Евгеньевич
Maksim S. Ivanov, Anatoly E. Polyakov

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: zaplatka84@mail.ru)

Аннотация: В статье исследуются вопросы силового воздействия на обрабатываемый материал элементов оборудования, создающего силовое поле в движущемся текстильном материале, и его реакция на нагрузку, выражающаяся в деформировании.

*Abstract:*The article examines the issues of the force effect on the processed material of the elements of the equipment that creates a force field in the moving textile material, and its reaction to the load, expressed in deformation.

Ключевые слова: зона деформации, волокнистый материал, температурно-силовое поле, термообработка, система автоматического управления, управляемый электротехнический комплекс, скоростной режим.

*Keywords:*deformation zone, fibrous material, temperature-force field, heat treatment, automatic control system, controlled electrical complex, high-speed mode.

Современной методологической основой изучения технологических процессов, конструирования технологического оборудования и систем управления ими является математическое моделирование. Математическая модель как инструмент при выборе оптимальных условий проведения процесса широко используется не только в научных исследованиях, но и при решении инженерных производственных задач.

Наиболее эффективным для построения общей теории поведения волокнистых материалов в температурно-силовых полях является моделирование каждого уравнения отдельно с учетом краевых условий.

Деформационные свойства технических текстильных изделий оценивают по кривой зависимости «нагрузка – удлинение», при этом их характеризует начальным модулем, промежуточными, остаточными и разрывными удлинениями и прочностью. Кроме того, эти свойства можно оценить по поведению изделий при динамических пульсирующих нагрузках, в этом случае их характеризуют числом циклов нагружения до разрушения при различных условиях, потерей прочности при заданном числе циклов нагружения и т.п.

Исходя из анализа теоретических основ тепловых и силовых обработок волокон и изделий из них можно выделить следующие параметры процесса, которые влияют на структурные образования и в итоге на свойства текстильных изделий: температура волокна, натяжение или тесно связанный с ним и с температурой параметр – вытяжка (деформация) волокна, время теплового воздействия, концентрация влаги [1].

Технологический процесс термообработки сводится к тепловому воздействию в одной или нескольких зонах на движущийся под натяжением материал. Натяжение материала (силовое поле) создается натяжными узлами, перемещающими его с различными скоростями. Благодаря этому создается деформация материала, и в нем возникает напряжение. На натяжение материала оказывает влияние конструкция зон обработки и проскальзывание материала на транспортирующих роликах.

Аппараты для термообработки могут различаться способом создания теплового поля, воздействующего на волокнистый материал. Наибольшее распространение получили аппараты конвективного типа, где нагрев осуществляется движущимся сухим или влажным горячим воздухом. Однако применяются и аппараты с инфракрасным нагревом, нагревом токами высокой частоты, контактным нагревом и нагревом в псевдожиженном слое.

Большинство непрерывных технологических процессов термообработки является составной частью общего процесса обработки текстильных материалов, который проводится на линиях обработки и включает также одно- или двухкратную пропитку специальными составами с последующей сушкой.

Исследуются вопросы силового воздействия на обрабатываемый материал элементов оборудования, создающего силовое поле в движущемся текстильном материале, и его реакция на нагрузку, выражающаяся в деформировании. В непрерывных процессах термообработки натяжение материала создается за счет его деформаций. Для расчета устройств натяжения, для управления натяжением также необходимо знание законов деформирования текстильных материалов.

Основным способом создания натяжения в движущихся текстильных материалах является их деформирование при транспортировании приводными роликами с разными скоростями на входе и выходе зоны обработки.

Полная деформация текстильных материалов складывается из обратимой (упругая и эластическая) и необратимой (пластическая). Упругая деформация всегда связана с увеличением объема деформируемого тела. Эластическая деформация возникает вследствие того, что под действием внешней силы происходит изменение конфигураций и перегруппировка макромолекул, составляющих волокна. Эластическая деформация развивается во времени с небольшими скоростями. Поскольку эластическая деформация осуществляется только за счет изменения конфигураций и перегруппировки молекул, объем деформируемого тела при ней не увеличивается.

Пластическая деформация возникает вследствие того, что под действием внешней силы происходят необратимые смещения звеньев макромолекул на довольно большие расстояния. Пластическая деформация необратима, так как после удаления внешней силы отсутствуют причины, которые могли бы заставить ее исчезнуть.

Одним из основных возмущений в системе автоматического управления (САУ) натяжением является изменение свойств обрабатываемого материала вследствие разброса его свойств по длине и по сечению, нестабильности его влажности, температуры. В ряде случаев свойства обрабатываемого материала оказывают влияние на качественные показатели САУ

натяжением, поэтому целесообразно строить грубые (робастые) системы регулирования натяжения.

Важное значение, особенно в многодвигательном приводе управляемого электротехнического комплекса (УЭТК), имеет место расположение ведущего органа, задающего скоростной режим движения волокнистого продукта. При этом не должно быть провисания или чрезмерного натяжения материала в любой зоне транспортирования и наматывания. В качестве исполнительного устройства используется регулируемый электропривод, установленный на входе и выходе зоны деформации, поэтому его динамические характеристики оказывают влияние на качество регулирования натяжения. Способ регулирования натяжения, использующийся в качестве регулирующего воздействия скорость движения теплоносителя, исследован к настоящему времени недостаточно. При этом способы натяжения при постоянной разности скоростей транспортирующих роликов меняются вследствие изменения соотношения прогретой части материала, т.е. за счет изменения среднего эквивалентного модуля деформации. Этот способ позволяет независимо регулировать натяжение материала и его общую деформацию [2].

Однако на динамику регулирования влияет инерционность тепловых процессов нагрева материала и собственно теплоносителя. Кроме того, изменение интенсивности подвода тепла оказывает самостоятельное влияние на свойства материала и меняет соотношение времени прогрева и выдержки при заданной температуре при неизменном общем времени обработки.

Деформация волокнистого материала в зоне обработки определяется его температурой, натяжением и физико-химическими свойствами. Необходимо определить, по какому параметру необходимо контролировать процесс термообработки, транспортирования и наматывания волокнистого материала: натяжению или деформации (вытяжки).

В большинстве случаев процесс ведут по натяжению, т.е. считают его основным, однако натяжение материала – это внешнее воздействие, а деформация отражает проявление внутренних свойств, это реакция одновременно на натяжение и температуру. Другими словами, при контроле деформации контролируется результат воздействия на волокнистый продукт тепловых и силовых полей. Распространенность САУ натяжением обусловлена более высокой чувствительностью натяжения к внешним воздействиям, более высоким его уровнем, в то время как при контроле деформации необходимо ее измерение с высокой степенью точности.

Относительная деформация движущегося материала в зоне транспортирования выражается через скорости его движения на границах данного участка:

$$\varepsilon = \frac{(V_2 - V_1)}{V_1} = \frac{V_2}{V_1} - 1. \qquad (1)$$

Из приведенного соотношения видно, что изменение деформации сводится к изменению скоростей движения волокнистого продукта в двух точках. Максимальное значение деформации материала в зонах транспортирования для текстильных материалов не превышает ± 0,15. Для получения высокой точности измерения деформации необходимо измерять два близлежащих значения скорости $V_2 \cong V_1$.

Потребность технологии и недостаточно высокая чувствительность деформации к различным факторам вызывает необходимость измерения деформации с погрешностью порядка $2 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-4}$. Такие уровни погрешности можно обеспечить только цифровыми средствами измерения с использованием импульсных датчиков. Ставится задача регулирования деформации при обеспечении постоянного натяжения материала изменением интенсивности его нагрева. В этом случае изменение скорости движения теплоносителя меняет соотношение прогретой и малопрогретой частей материала в зоне обработки, меняя тем самым эквивалентный модуль деформации материала, что в свою очередь при постоянном натяжении приводит к изменению деформации.

Основное направление повышения эффективности применения деформации в системах управления процессом термообработки сводится не к использованию конкретной деформации

на каком-то участке, а к использованию всего характера развития деформации в зоне обработки. Данное направление является распространением на непрерывный процесс обработки волокнистых материалов [3]. Ставится задача стабилизации свойств материала за счет стабилизации скоростей материала, измеренных в нескольких дискретных точках.

Относительная деформация любого участка может быть определена по формуле Коши в случае малых деформаций:

$$\varepsilon = \frac{(l_{i+1} - l_i)}{l_i} = \frac{(V_{i+1} - V_i)}{V_i},$$

или по формуле Генки при сравнительно больших деформациях:

$$\varepsilon = en\left(\frac{l_{i+1}}{l_i}\right) = en\left(\frac{V_{i+1}}{V_i}\right),$$

где l_i, l_{i+1}– соответственно длина вошедшего и вышедшего из зоны деформации волокнистого материала; $V_i,\ V_{i+1}$ – линейная скорость транспортирования продукта на входе и выходе зоны деформации (рисунок 1).

Таким образом, материя между валиками деформируется и это обеспечивает его напряженное состояние. Для высоко ориентированных полимерных волокон и изделий из них напряженное состояние может возникнуть при высокой температуре и без деформации.

В общем случае натяжение материала можно выразить следующим образом:

$$P = A(P, T, t)\varepsilon, \qquad (2)$$

где *A* – оператор, зависящий от натяжения *P*, температуры *T*, времени *t*, размеров и свойств продукта.

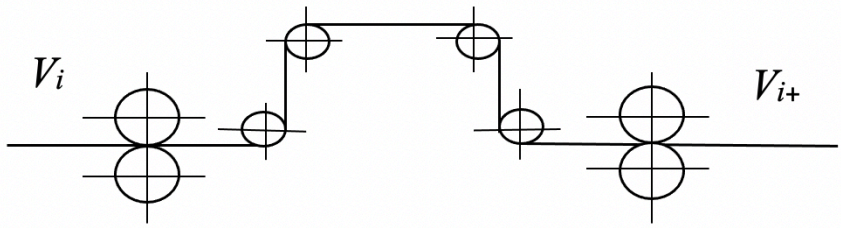


Рисунок 1 – Расчетная схема зоны деформации волокнистого материала

Рассматривая деформацию волокнистого материала как упругую, роль оператора *A* играет произведение сечения *S* и модуля упругости *E*, зависящего от температуры и нагрузки, т.е.:

$$P = SE(P, T)\varepsilon. \qquad (3)$$

Из выражения (2) видно, что при одной и той же деформации материала, определяемой скоростью транспортирующих роликов, возникающее натяжение зависит от свойств материала и от режимов процесса. Выражения (2), (3) описывают статическую, не изменяющуюся во времени, зависимость натяжения от скоростей. При динамических режимах работы натяжение материала не зависит однозначно от скоростей транспортирующих роликов. Существенное влияние оказывает и время, и момент инерции неприводных роликов в зоне деформации. В случае при учете небольших упругих деформаций динамика натяжения волокнистого материала описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{gathered} \frac{L_i}{V_i}\frac{dP_i}{dt} + P_i = k_{1i}V_i + k_{2i}V_{i+1} + k_{3i}P_{i-1} + k_{4i}E_i; \\ \frac{dV_{i+1}}{dt} = \frac{1}{J_{i+1}}(P_{i+1} - P_i), \end{gathered} \qquad (4)$$

где L_i – длина зоны деформации; P_i, P_{i-1}, P_{i+1} – натяжение на *i*, *i-1*, *i+1* участках; $k_{1i}, k_{2i}, k_{3i}, k_{4i}$– коэффициенты; E_i – модуль упругости для *i* – ой зоны; J_{i+1} – момент инерции неприводного ролика на конце *i* – ой зоны.

В реальных условиях и без учета температурных полей обработка текстильных материалов на технологическом оборудовании производится при наличии нескольких свободных зон деформации, соединенных между собой через зоны фрикционного взаимодействия материала с рабочими органами, где происходит согласование скоростных режимов. При малых деформациях материала и незначительной протяженности фрикционных зон взаимодействия продукта с рабочими органами машин по сравнению с длиной свободных зон деформации систематическое описание динамических свойств свободной зоны транспортирования может быть представлено следующим образом:

$$\frac{L^*}{1+e(t)}\frac{de}{dt} = V_2(t) - V_1(t), \quad (5)$$

где L^* – длина свободной зоны вытягивания волокнистого материала; e – относительное продольное удлинение волокнистого продукта.

Уравнение может быть использовано как для случая, когда имеет место скольжение между волокнистым продуктом и поверхностью рабочих органов машины, так и для случая, когда скольжение между ними отсутствует[4].

Выводы

Исследованы вопросы силового воздействия на обрабатываемый материал элементов оборудования, создающего силовое поле в движущемся текстильном материале, и его реакция на нагрузку, выражающаяся в деформировании. Рассмотрены виды деформации, знание особенностей которых, а также законов деформирования волокнистых материаловнеобходимо для расчета устройств натяжения и управления натяжением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бунин О.А., Малков Ю.А. Машины для сушки и термообработки тканей. – М.: Высшая школа, 2010. – 185 с.

2. Марголин Ю.Я., Сарбатова Н.И. Системы автоматического регулирования натяжения кордных тканей. – М.: Наука, 2005. – 219 с.

3. Поляков А.Е., Иванов М.С., Рыжкова Е.А., и др. Устройство для управления тепловыми потоками процесса деформации текстильных материалов. Патент РФ на полезную модель № 187519. Опубл. 11.03.2019. Бюл. № 8.

4. Иванов М.С., Поляков А.Е., Рыжкова Е.А. Разработка научных положений концепции построения структуры и методов исследования многомерных динамических объектов со сложными зонами деформации волокнистых материалов: монография. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина». – 2020. – 221 с.

УДК 66.021.3 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-71-74

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ МАССООБМЕН В ГРАНУЛАХ НЕОДНОРОДНО-ПОРИСТОГО АДСОРБЕНТА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ МАКРО- И МИКРОДИФФУЗИОННЫМ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕНОСА
ISOTHERMAL MASS TRANSFER IN GRANULES OF INHOMOGENEOUS-POROUS ADSORBENT WITH SEQUENTIAL MACRO-AND MICRODIFFUSION TRANSFER MECHANISM

Филимонова Ольга Николаевна, Енютина Марина Викторовна, Викулин Андрей Сергеевич, Иванов Алексей Владимирович
Olga N. Filimonova, Marina V. Enyutina, Andrey S. Vikulin, Alexey V. Ivanov

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж
Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Russia, Voronezh
(e-mail: olga270757@rambler.ru, maryena63@mail.ru, mmiler5472@yandex.ru)

Аннотация: Численно решена в формате 1-D начально-краевая задача нестационарного изотермического локального распределения диффундирующего однокомпонентного вещества, в последовательно расположенных осесимметричных сферических областях гранул с разной проницаемостью макро- и микропор с граничным условием первого рода на внешней границы гранулы и четвертого рода на границе сопряжения областей. Показано влияние параметров модели на кинетику транспортирования вещества.

Abstract: The initial-boundary value problem of non-stationary isothermal local distribution of a diffusing one-component substance in successively located axisymmetric spherical regions of granules with different permeability of macro- and micropores with a boundary condition of the first kind on the outer boundary of the granule and of the fourth kind on the interface of the regions is numerically solved in 1-D format. The influence of the model parameters on the kinetics of material transportation is shown.

Ключевые слова: массообмен, гранулы адсорбента, неоднородность, диффузия.
Keywords: mass transfer, adsorbent granules, inhomogeneity, diffusion.

Введение

Анализ кинетики адсорбции в масштабе гранулы адсорбента, как правило, основывается на допущении псевдооднородности ее внутренней структуры [1]. Однако такой подход нивелирует возможность оценки влияния дислокации разнопроницаемых областей на скорость поглощения адсорбатов внутригранулярным пространством [2]. Это обстоятельство учитывается заранее выбираемой топологией расположения областей в грануле: последовательное, параллельное, смешанное, случайно распределенное [3]. В общем случае эта задача решается пока только с помощью экспериментального подхода [4].

Топология последовательного расположения разнопроницаемых областей рассматривается при условии дополнительных предположений, главным из которых [5]: сферичность гранул и осесимметричность расположения бидисперных неоднородностей, связанных с диффузионными механизмами переноса в макро- и микропорах; пространственная одномерность; постоянство физико-химических параметров, изотермичность; идеальный контакт на границе сопряжения областей. Упрощенная математическая формулировка представляется в виде системы уравнений параболического типа в 1-D сферической системе координат [6]:

$$\frac{\partial c_m(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[D_m r^2 \frac{\partial c_m(r,\tau)}{\partial r}\right],\ 0 \le r < r_m; \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_M(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[D_M r^2 \frac{\partial c_M(r,\tau)}{\partial r}\right],\ r_m \le r \le r_M \quad (2)$$

начальными

$$c_m(r,0) = c_M(r,0) = c_0; \quad (3)$$

граничным условием первого рода на поверхности гранулы

$$c_M(r_M,\tau) = c_S; \quad (4)$$

граничным условием четвертого рода, отражающие идеальный контакт между разнопроницаемыми областями

$$c_m(r_m,\tau) = c_M(r_m,\tau); \quad (5)$$

$$D_m \frac{\partial c_m(r_m,\tau)}{\partial r} = D_M \frac{\partial c_M(r_m,\tau)}{\partial r}; \quad (6)$$

с дополнительным условием ограниченности в точке симметрии

$$c_m(0,\tau) \ne \infty, \quad (7)$$

где τ – время; r – текущая радиальная координата; c_m, c_M – локальные концентрации адсорбата в разнопроницаемых областях $0 \le r \le r_m$ и $r_m < r \le r_M$ соответственно; c_0=const – концентрация адсорбата на поверхности гранулы; D_m, D_M – коэффициенты диффузии в областях $0 \le r \le r_m$ и $r_m < r \le r_m$; r_m – радиус поверхности контакта областей; r_M – радиус гранулы.

Численная схема

Система (1)-(7), представленная в безразмерном виде с помощью относительных переменных $\theta = \tau D_m/r_m^2$; $R = r/r_m$; $D = D_M/D_m$; $C_{m,M}(R,\theta) = [C_{m,M}(r,\tau) - c_0]/(c_s - c_0)$; $\eta = r_M/r_m$

$$\frac{\partial [RC_m(R,\theta)]}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 [RC_m(R,\theta)]}{\partial R^2},\quad 0 \le R < 1; \quad (8)$$

$$\frac{\partial [RC_M(R,\theta)]}{\partial \theta} = D\frac{\partial^2 [RC_M(R,\theta)]}{\partial R^2},\quad 1 \le R < \eta; \quad (9)$$

$$C_m(R,0) = C_M(R,0) = 0; \quad (10)$$

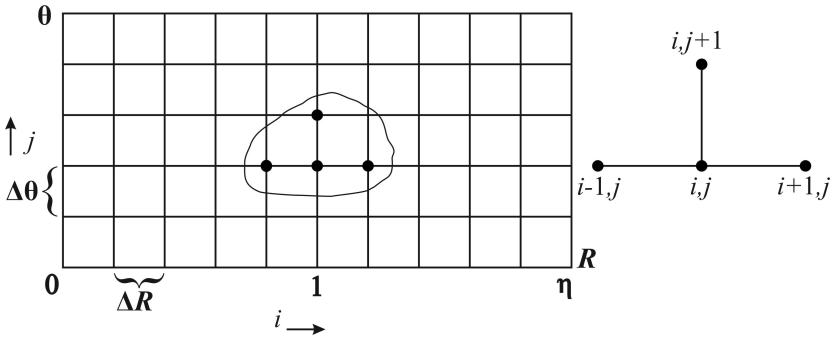
$$C_M(\eta,\theta) = 1; \quad (11)$$

$$C_m(1,\theta) = C_M(1,\theta); \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_m(1,\theta)}{\partial R} = D\frac{\partial C_M(1,\theta)}{\partial R}; \quad (13)$$

$$C_m(0,\theta) \ne \infty \quad (14)$$

проинтегрирована численно на равномерной сетке области определены по «Т – образному шаблону» (рисунок 1).



a *b*

Рисунок 1 – Дискретизация области интегрирования (*a*) и шаблон для построения конечно-разностной схемы (*b*)

Конечно-разностный аналог (8)-(14) представлен явной схемой относительно сеточной функции

$C_{m,M}^{i,j} = C_{m,M}(i\Delta R, j\Delta\theta)$:

$$C_m^{i,j+1} = A_m^i C_m^{i+1,j} + B_m C_m^{i,j} + C_m^i C_m^{i-1,j}; \quad (15)$$

$$C_M^{i,j+1} = A_M^i C_M^{i+1,j} + B_M C_M^{i,j} + C_M^i C_M^{i-1,j}; \quad (16)$$

$$C_m^{i,0} = 0,\ i = \overline{1, M1};\ \ C_M^{i,0} = 0,\ i = \overline{M1+1, M}; \quad (17)$$

$$C_M^{M+1,j} = 1,\ j = \overline{0, N}; \quad (18)$$

$$C_m^{M1,j} = C_M^{M1,j},\ j = \overline{0, N}; \quad (19)$$

$$C_m^{M1,j} = \frac{4C_M^{M1+1,j} - C_M^{M1+2,j} + 4C_m^{M1-1,j} - C_m^{M1-2,j}}{3(D+1)},\ j = \overline{0, N}; \quad (20)$$

$$C_m^{1,j} = \left(4C_m^{2,j} - C_m^{2,j}\right),\ j = \overline{0, N}, \quad (21)$$

где $A_m{}^i = \Delta\theta(1+i^{-1})/\Delta R^2$; $B_m = 1-2\Delta\theta/\Delta R^2$; $C_m{}^i = \Delta\theta(1-i^{-1})/\Delta R^2$; $A_M{}^j = DA_m{}^i$; $B_M = 1-2D\Delta\theta/\Delta R^2$; $C_M{}^j = DC_m{}^i$; $\Delta R = \eta/M$ (M – число отрезков разбиения области по R); $\Delta\theta = \varepsilon\Delta R$ ($\varepsilon << 1$, выбрано $\varepsilon = 0{,}1$); $M1$ – номер узла по R, соответствующий координате $R = 1$; N – конечное значение числа шагов по безразмерному времени.

Вычислительный эксперимент

Результаты расчетов (рисунок 2) показывают, что при $D > 1$ перенос вещества интенсивнее, чем при $D < 1$ (т.е. проницаемость ядра гранулы лимитирует кинетику). Если дислокация границы между областями смещается в направлении центра гранулы, то кинетика поглощения также имеет тенденцию к снижению.

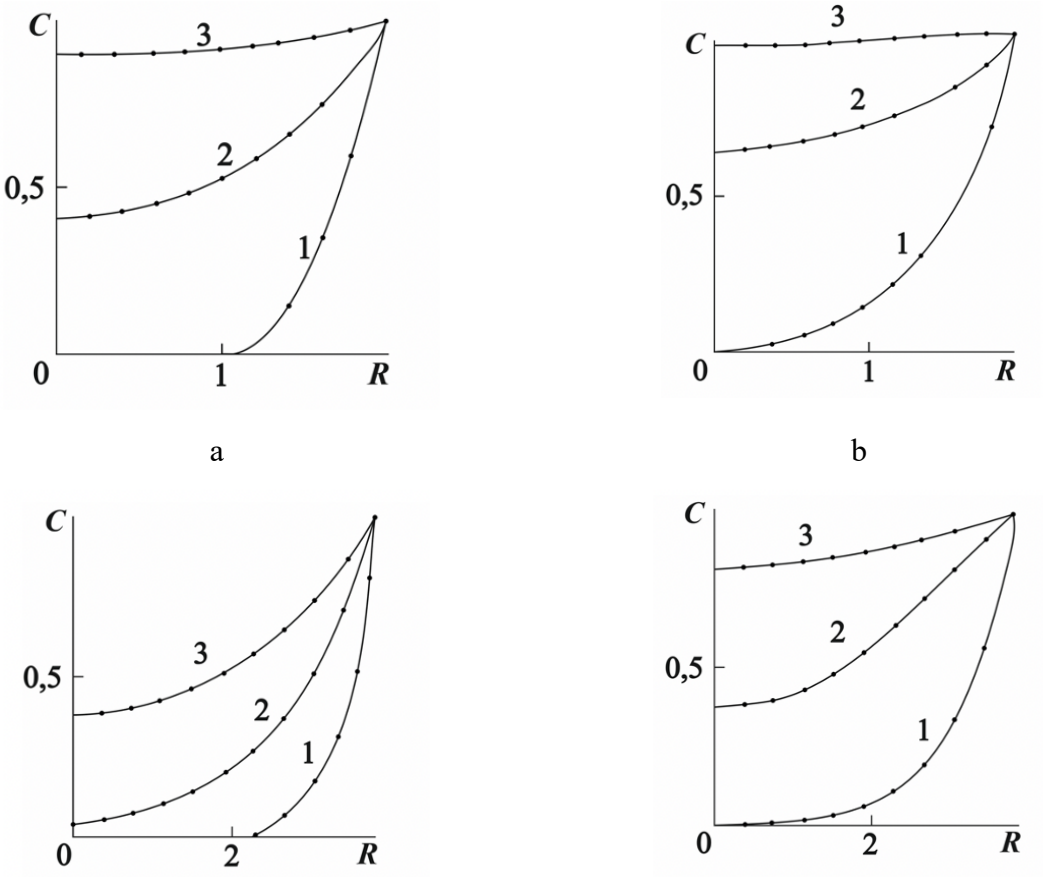


Рисунок 2 – Локальные концентрации поля при $D = 0{,}5$ и $\eta = 2$ (*a*); $D = 1{,}5$ и $\eta = 2$ (*b*); $D = 0{,}5$ и $\eta = 4$ (*c*); $D = 1{,}5$ и $\eta = 4$ (*d*) в различный момент безразмерного времени θ: 1 – 0,1; 2 – 0,75; 3 – 1,7

Выводы

Разработан инструментарий оценки кинетики внутригранулярного поглощения адсорбата с учетом структуры адсорбента с последовательным расположением разнопроницаемых областей в изотермическом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Inglezakis V.J.*, *Fyrillas M.M.*, *Park J.* Variable diffusivity homogeneous surface diffusion model and analysis of merits and fallacies of merits and fallacies of simplified adsorption kinetics equations // J. of Hazardous Materials. 2018. V. 367. P. 224-245. DOI: org/10.1016/j.jhazmat.201

2. *Tien C*. Introduction to adsorption: Basics, Analysis and Application. New York: Elsievier, 2018. 216 p.

3. *Suzuki M*. Adsorption Engineering. Tokyo: Kodansha Ltd, 1990. 278 p.

4. *Toth J*. Adsorption: Theory, Modeling, and Analysis. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001. 888 p.

5. *Tovlin Y.K*. The Molecular Theory of Adsorption in Porous Solid. New York: CRC Press, 2017. 780 p.

6. *Tien C*. Adsorption Calculations and Modelling. Boston: Butterworth-Heinemann, 1994. 244 p.

УДК 677.017 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-74-78

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СВОЙСТВА ПАРААРАМИДНЫХ ТКАНЕЙ
INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF OPERATIONAL INFLUENCES ON THE PROPERTIES OF PARA-ARAMID FABRICS

Буланов Ярослав Игоревич, Курденкова Алла Вячеславовна
Yaroslav I. Bulanov, Alla V. Kurdenkova

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

Аннотация: В работе проведено исследование влияния количества слоев, влажности ткани и скорости движения индентора на усилие прокола и нагрузку при прорезании парарамидных тканей. По результатам проведения однофакторного эксперимента были получены математические модели, позволяющие прогнозировать влияние факторов на стойкость тканей к механическим воздействиям.

Abstract: In this work, we studied the effect of the number of layers, tissue moisture and the speed of movement of the indenter on the puncture force and load when cutting pararamid tissues. Based on the results of a one-factor experiment, mathematical models were obtained that allow predicting the influence of factors on the resistance of tissues to mechanical stress.

Ключевые слова: параарамидные ткани, индентор, усилие прокола, нагрузка при прорезании, однофакторный эксперимент, эксплуатационные факторы.

Keywords: para-aramid fabrics, indenter, puncture force, cutting load, one-factor experiment, operational factors.

Основным элементом средств индивидуальной защиты в настоящее время является бронежилет. Его задача – обеспечивать защиту жизненно важных органов человека от поражения холодным оружием, пулями огнестрельного оружия, осколками снарядов, мин, гранат и т.п., заброневой контузионной травмы и механических повреждений при ведении всех видов боевых действий.

Большое количество преступлений совершенных с использованием холодного оружия и иными колющими и режущими предметами, в разного рода конфликтах, местах лишения свободы и т.д. ставит задачу по изучению антипрокольных и антипрорезных свойств и разработке все более эффективных средств защиты преимущественно от холодного оружия и предметов их имитирующих.

Ткани из параарамидных нитей используются для изготовления средств индивидуальной бронезащиты, которые должны обеспечивать защиту, как от огнестрельного, так и от холодного оружия. Причинить вред здоровью или смерть можно различными видами холодного оружия, каждое из которых имеет свои особенности в конструкции. В ГОСТ Р 50744-95 средством поражения является штык нож к автомату АК-74 и его модификациям, данное средство поражения по механике поражения исключает прокол, а ткани для бронежилетов должны обеспечивать защиту не только от прорезания, но и от прокалывания. Поэтому для более полного изучения, механики проникновения поражающих элементов на ткань, необходимо использовать пику.

Современные виды бронежилетов представляют многослойные пакеты. В работе были проведены испытаний для различных видов текстильных материалов при варьировании количества слоев, скорости движения индентора и влажности ткани.

В качестве объектов исследования были выбраны 5 артикулов баллистических тканей, которые наиболее распространены для изготовления средств индивидуальной защиты. Ткани выработаны из нитей Русар [1]. Структурные характеристики исследуемых тканей приведены в таблице 1.

Таблица 1 –Структурные характеристики тканей для бронежилетов

Показатель качества	арт. 86144	арт. 86136	арт. 86294	арт. 53631	арт. 84127
Толщина, мм	0,27	0,26	0,27	0,30	0,23
Линейная плотность нитей основы, текс	55,0	61,0	29,5	62,0	34,0
Линейная плотность нитей утка, текс	55,0	60,0	29,5	60,0	32,0
Плотность ткани по основе, число нитей / 10 см	150	130	270	150	240
Плотность ткани по утку, число нитей / 10 см	140	140	240	150	210
Поверхностная плотность ткани, г/м^2	164,5	168,4	152,6	187,0	152,0
Переплетение	Саржевое	Атласное	Полотняное	Вафельное	Полотняное

Для проведения испытаний применялась универсальная испытательная система «Инстрон» серии 4411. Для проведения испытаний были изготовлены специальный зажим, а также инденторы в виде однозаточенного ножа и пики.

Результаты испытаний на прокол пикой приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения усилия прокола пикой тканей для бронежилетов

Количество слоев	арт.86144 – саржевое переплетение		арт.86136 – атласное переплетение		арт.86294 – полотняное переплетение		арт.53631– вафельное переплетение		арт.84127 – полотняное переплетение	
	Усилие прокола, Н	Нагрузка при прорезании, Н	Усилие прокола, Н	Нагрузка при прорезании, Н	Усилие прокола, Н	Нагрузка при прорезании, Н	Усилие прокола, Н	Нагрузка при прорезании, Н	Усилие прокола, Н	Нагрузка при прорезании, Н
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Влажность ткани 40%, скорость движения индентора 100 мм/мин										
1	14,2	13,3	14,1	15,1	14,9	11,8	14,7	13,7	14,4	9,1
2	23,4	22,3	22,1	24,2	25,3	19,8	25,7	23,0	25,0	15,0
4	27,0	24,5	26,7	27,8	29,6	23,2	29,3	26,7	29,0	21,7
6	31,0	28,7	30,2	29,4	33,2	28,8	32,8	30,2	33,3	23,1
8	35,8	37,0	34,5	36,5	36,0	37,1	35,3	38,5	37,7	31,4
Влажность ткани 40%, скорость движения индентора 250 мм/мин										
1	15,1	14,7	15,5	16,4	15,7	16,9	15,1	15,1	15,0	14,6
2	24,4	25,4	23,9	26,7	24,5	26,5	23,5	25,4	24,9	22,5
4	28,3	28,4	29,8	29,5	29,0	29,3	28,8	28,3	30,8	26,7
6	32,4	30,8	33,3	33,8	32,1	32,5	33,5	31,7	35,7	30,5
8	37,2	38,6	36,1	38,1	35,8	40,8	38,3	39,7	40,5	37,4
Влажность ткани 40%, скорость движения индентора 500 мм/мин										
1	16,1	15,2	16,4	16,6	16,3	17,4	16,3	15,5	15,8	15,9
2	25,6	27,0	24,6	27,8	24,8	29,0	22,8	25,9	25,0	26,6
4	30,5	29,2	29,8	29,7	31,0	32,3	28,4	30,3	29,6	29,0
6	34	30,8	32,8	30,0	35,7	34,8	32,2	31,8	35,5	31,1
8	38,5	39,1	36,3	38,3	39,2	43,1	36,7	40,1	43,8	39,4
Влажность ткани 65%, скорость движения индентора 100 мм/мин										
1	6,7	9,1	6,9	9,5	6,8	7,8	5,6	8,4	6,3	5,5
2	10,3	15,7	12,1	16,3	14,3	13,2	14,2	14,1	16,8	9,3
4	16,7	18,4	17,6	18,3	18,7	18,7	17,8	18,0	18,1	16,9
6	20,2	20,9	21,5	21,5	23,2	21,8	24,6	19,6	25,7	18,9
8	24	29,2	26	29,7	27	30,1	26	27,6	29,4	27,0
Влажность ткани 65%, скорость движения индентора 250 мм/мин										
1	7,8	10,0	8,0	10,3	7,2	10,0	6,5	9,0	8,0	8,2
2	9,4	16,8	9,1	17,3	8,1	16,7	7,7	15,1	11,0	13,3
4	12,6	19,1	11,0	19,5	12,1	19,8	10,8	19,2	14,2	18,1
6	15,0	22,4	16,5	21,4	16,7	22,3	14,3	20,3	17,4	20,3
8	18,4	30,7	18,3	30,4	18,5	30,6	17,1	29,7	20,2	28,8
Влажность ткани 65%, скорость движения индентора 500 мм/мин										
1	8,2	12,8	8,2	11,2	7,8	11,6	7,6	11,0	8,4	9,1
2	11,0	18,1	12,2	18,7	10,7	17,7	11,8	18,2	12,6	15,3
4	14,6	21,3	13	19,8	13,7	20,8	14,2	21,5	15,7	18,2
6	15,3	23,9	14,5	22,8	16,2	23,4	16,7	23,5	16,8	23,4
8	17,1	32,2	17,2	31,1	18,1	31,7	18,3	31,8	17,8	31,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Влажность ткани 90%, скорость движения индентора 100 мм/мин										
1	3,6	6,12	3,7	6,96	3,4	6,12	4,1	5,05	4,1	4,96
2	7,7	10,20	7,8	11,60	7,3	10,2	6,9	8,10	6,8	8,27
4	8,4	14,73	8,8	16,00	8,9	15,1	8,5	15,61	8,6	14,53
6	9,5	19,27	9,4	17,81	10,3	18,1	9,6	18,44	9,1	17,41
8	12,4	26,50	12,3	26,11	13,2	27,1	12,5	25,70	12	25,71
Влажность ткани 90%, скорость движения индентора 250 мм/мин										
1	4,5	6,6	4,9	7,2	4,3	7,2	5,1	5,7	4,4	5,5
2	7,5	10,7	8,2	12,1	7,1	12,0	8,8	9,6	7,4	11,2
4	8,0	15,4	8,6	16,2	7,8	15,2	9,3	15,7	8,1	15,2
6	8,7	20,9	9,0	19,3	8,4	20,0	9,7	17,9	8,4	19,7
8	11,6	27,2	11,9	27,6	11,3	27,4	12,6	26,2	11,3	27,5
Влажность ткани 90%, скорость движения индентора 500 мм/мин										
1	5,1	6,9	5,4	7,3	5,7	7,6	5,3	6,1	5,0	5,8
2	8,5	11,5	9,1	12,2	9,5	12,8	8,9	10,3	8,4	9,8
4	9,5	16,1	10,5	16,2	10,7	15,4	10,0	15,8	11,0	15,2
6	10,8	18,9	11,0	21,1	11,6	21,3	11,3	17,8	11,4	19,7
8	13,7	27,2	13,9	29,4	14,5	28,2	14,2	26,6	14,3	26,0

С увеличением количества слоев усилие прокола и нагрузка при прорезании увеличиваются, а с увеличением влажности - уменьшаются. С увеличением скорости движения индентора усилие прокола и нагрузка при прорезании увеличиваются.

На начальном этапе при испытании ткани на прокол в один слой практически не наблюдается различий в результатах испытаний, так как пика имеет острый наконечник, гладкую поверхность и малый диаметр в поперечнике, что позволяет ей легко проникать сквозь материал, независимо от его структурных характеристик. При увеличении количества слоев происходит увеличение усилия прокола. Данная зависимость определяется логарифмической функцией [2-3].

На усилие прокола влияет скорость движения индентора, так как при возникновении ситуации с применением холодного оружия скорость нанесения повреждений может быть различной. Данная зависимость определяется степенной функцией.

Необходимо отметить, что при общем условии увеличения прочности при повышении количества слоев и изменения влажности скорость движения индентора увеличивает усилие прокола. При скорости 100мм/мин практически все образцы имеют не большую разницу в усилии прокола. Наибольшие различия наблюдаются при скорости 500 мм/мин.

При анализе зависимости усилия прокола тканей от влажности можно сделать вывод, что изменение данного показателя у всех полотен происходит с одинаковой интенсивностью и кривые накладываются одна на другую.

В зависимости от увеличения влажности величина усилия прокола тканей снижается, так как нити становятся более гладкими, что позволяет индентору в виде пики с меньшим усилием прокалывать ткань. При проколе индентор практически не повреждает нити, так как наличие у индентора в виде пики заточенного наконечника и малой площади поперечного сечения позволяет раздвигать нити, не повреждая их, что значительно снижает усилие прокола, что по механике воздействия на ткань сильно отличает ее от воздействия при прорезании. Данная зависимость определяется полиномом второго порядка.

С увеличением количества слоев нагрузка при прорезании увеличивается, а с увеличением влажности – уменьшается. С увеличением скорости движения индентора нагрузка при прорезании увеличивается [4-6].

Геометрия насадок оказывает существенное влияние на антирокольные и антипрорезные характеристики, а также стрелу прогиба образцов. Все ткани имеют низкую прочность при прорезании, так как ножи имеют плоскую форму и легко проникают сквозь образец. Стрела прогиба имеет наибольшее значение только в начальный период разрушения. При проведении испытаний выявлено, что при прорезании ножом сначала происходит растяжение и раздвигаемость нитей, образующих ткань, а затем их разрушение, что приводит к увеличению площади поверхности образца, в то время как при прокалывании тканей пикой наблюдается только раздвигаемость нитей.

Диапазон скоростей оказывает существенное влияние на стойкость тканей к механическим воздействиям. Однако при прочих равных условиях нагрузка при прорезании индентором в виде ножа имеет более высокие значения, чем у индентора в виде пики. Это связано с геометрией строения инденторов. Наличие одного режущего лезвия у ножа и большей площадью поперечного сечения по сравнению с пикой приводит к увеличению нагрузки при прорезании. Механика проникновения ножа существенно отличается от механики проникновения в виде пики. При проникновении ножа ткань вначале удлиняется, а в дальнейшем происходит раздвижка нитей с одновременным их разрезанием, что и оказывает основное сопротивление ткани проникновению индентора, в отличие от пики, которая только раздвигает нити без разрушения

Установлено, что усилие прокола снижается при увеличении влажности тканей. Аналогичное действие влажность оказывает и на нагрузку при прорезании.

Структурные характеристики оказывают влияние на усилие прокола и нагрузку при прорезании. Для улучшения этих показателей необходимо использовать наиболее оптимальные виды переплетений, которые обеспечивают максимальные показатели стойкости к проколу и прорезанию.

Наилучшими характеристиками обладает ткань арт. 86294 полотняного переплетения, а наихудшими – арт. 86136 атласного переплетения [1].

Выводы

Для обеспечения безопасности необходимо использовать комплексный подход при формировании оптимального бронепакета, защищающего как от прокола, так и от прорезания, также данный пакет необходимо использовать как составную часть бронепакета для защиты от огнестрельного оружия, так как ткани, используемые для защиты от огнестрельного оружия, не обеспечивают защиту от холодного оружия или иных предметов, которыми при помощи мускульной силы человека можно нанести вред здоровью или причинить смерть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буланов Я.И. Разработка методов оценки и прогнозирование физико-механических свойств тканей баллистического назначения: диссертация ... кандидата технических наук: 05.19.01 / Буланов Ярослав Игоревич; [Место защиты: ФГБОУ ВО Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)], 2017

2. Bulanov Ya. I., Kurdenkova A.V. Effect on Piercing Resistance of Treating Ballistic Fabrics with Resin in Ethanol // Fibre Chemistry, May 2017, Volume 49, Issue 1, pp 64–66

3. Буланов Я.И., Курденкова А.В., Шустов Ю.С., Мошкало Н.Г. Прогнозирование усилия прокола тканей баллистического назначения при воздействии различных внешних факторов // Вестник технологического университета. 2017. Т.20, №18, с. 93-96

4. Bulanov Y.I., Shustov Y.S., Kurdenkova A.V. Study of the mechanical properties of ballistic fabrics taking into account the number of layers // Fibre Chemistry. 2015. Т. 46. № 5. С. 309-311

5. Буланов Я.И., Шустов Ю.С., Курденкова А.В. Исследование механических свойств баллистических тканей с учетом количества слоев // Химические волокна. 2014. № 5. С. 41

6. Bulanov, Y.I., Kurdenkova, A.V., Shustov, Y.S. Influence of External Factors on the Cutting Load and Puncture Force for Ballistic Fabrics // Fibre Chemistry, 2020, 51(6), с. 455-458

УДК 66.048.5, 66.040.387 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-79-82

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ
ENERGY TECHNOLOGIES OF PLANT RAW MATERIAL DEHYDRATION PROCESSES

Гаврилов Александр Викторович*, Носова Екатерина Васильевна**
Aleksandr V. Gavrilov*, Ekaterina V. Nosova**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Россия, Республика Крым, Симферополь*
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Russia, Republic of Crimea, Simferopol (e-mail: tehfac@mail.ru)
***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Россия, Республика Крым, Симферополь*
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Russia, Republic of Crimea, Simferopol (e-mail: kat.nosova.1990@bk.ru)

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности процессов обезвоживания материалов, приведены результаты экспериментального моделирования процессов обезвоживания в электромагнитном поле и обобщение этих результатов в виде критериальной зависимости.

Abstract: Some features of the processes of dehydration of materials are considered, the results of experimental modeling of dehydration processes in an electromagnetic field and the generalization of these results in the form of criterion dependence are presented.

Ключевые слова: обезвоживание, микроволновое излучение, моделирование.
Keywords: dehydration, microwave radiation, simulation.

Энергетическая ситуация в современной пищевой промышленности требует существенных изменений в культуре энергопотребления и в технологическом оборудовании. Для улучшения энергетического положения пищевой промышленности необходимы новые пути решения энергетических и технологических проблем. Значительная часть энергопотребления в пищевой промышленности приходится на процессы обезвоживания. Эти энергетически затратные процессы, кроме того имеют достаточно большую длительность в рамках технологического процесса. Также, эффективность использования потребляемой энергии значительно уменьшается при использовании на заводах устаревшего оборудования. То есть КПД таких процессов не превышает 40-60%. Для решения проблем энергоэффективности, продолжительности ведения технологического процесса и качества выпускаемой продукции следует кардинально менять энергетическую политику предприятий и проводить модернизацию оборудования с использованием инновационных технологических решений. Это касается и производства концентрированных пищевых продуктов, в частности концентрированных соков, сушеных фруктов и овощей и концентратов их использующих.

В технике обезвоживания используются 3 принципа удаления влаги: мембранный, выпаривание и криоконцентрирование. Всем присущи и достоинства и недостатки. Мембранные технологии получают все большее распространение в задачах опреснения и очистки сточных вод [1]. Для концентрирования соков и экстрактов мембранные технологии не получают распространения. Большие проблемы связаны с санитарной обработкой, заменой и приобретением мембран. Наибольшее применение для концентрирования пищевых растворов имеют выпарные технологии [2]. Объясняется это тем, что аппараты для выпаривания предельно просты, обеспечивают высокую производительность [2]. Вместе с тем, требования к качеству концентрата постоянно повышаются. При этом, главной

проблемой выпарных аппаратов является то, что с повышением концентрации раствора растет его вязкость, интенсивность циркуляции раствора в аппарате снижается, растет термическое сопротивление пограничного слоя и его температура. Удачных решений этой проблемы не найдено. На практике ограничиваются значением конечной концентрации готового продукта (от 25 до 60%).

Высокое качество готового продукта обеспечивают технологии криоконцентрирования [3], особенно блочного вымораживания [4]. Вместе с тем, несмотря на энергетические характеристики и гарантии высокого качества готового продукта, технологии криоконцентрирования ограничены конечными концентрациями до 30…50 brix. Поэтому актуальна задача разработки технологии концентрирования пищевых растворов, которая при высокой эффективности использования энергии и сохранении пищевой ценности продукта, обеспечивала значения конечных концентраций продукта выше, чем у традиционных технологий.Решение проблемы основано на гипотезе: «использование инновационной схемы подвода энергии к пищевому раствору при замене традиционной схемы при ГУ 3 рода на схему с ГУ 2 рода позволит осуществлять объемный подвод энергии к полярным молекулам, что обеспечит практически полное удаление влаги из раствора».Обеспечить такой объемный подвод энергии позволяет проведение процесса выпаривания в инновационной микроволновой технике. Здесь вообще отсутствует классическая теплопередача. Энергия электромагнитного поля непосредственно взаимодействует с молекулами воды. Это полярные молекулы и в условиях сверхвысокочастотного электромагнитного поля происходит диссипация энергии поля и образование паровой фазы [5, 6]. Таким образом, инновационная техника принципиально отличается от традиционной, аадресный подвод энергии непосредственно к молекулам воды позволит: поддерживать стабильную паропроизводительность вплоть до содержаний влаги в растворе 5-10% при простой схеме управления процессом.

Исходя из заявленной гипотезы, модель при ГУ 2 рода можно попытаться представитькак наличие в объеме продукта равномерно расположенных по этому объему внутренних источников энергии с соответствующими начальными и граничными условиями. По всей видимости, полученную модель в виде системы дифференциальных уравнений решить не удастся. Но есть возможность методами теории подобия трансформировать полученную модель в критериальную форму. Для проведения такой трансформации необходимо определиться с ключевыми параметрами процесса. Анализ работы [7] позволяет предположить, что: организация процесса парообразования при непосредственном подводе энергии к полярным молекулам раствора не вызывает формирования традиционных термических сопротивлений, и это может стать (при постоянной мощности поля) предпосылкой стабильной паропроизводительности, зависящей только от типа раствора и уровня давления в аппарате. В такой постановке традиционный коэффициент теплоотдачи, который характеризует термическое сопротивление конвективного теплообмена, теряет смысл.Для таких специфических условий выпаривания в электромагнитном, микроволновом поле предлагаются следующие основные параметры процесса:удельная теплота парообразования r, мощность микроволнового поля N, давление P, паропроизводительность W. Применение теории подобия позволило получить зависимость между безразмерными комплексами, которая может быть использована в практических задачах расчета и проектирования предлагаемого оборудования.

$$Bu = A \cdot P^n \cdot R^m \qquad (1)$$

где: *Bu=N/(W*r)* – число энергетического воздействия, P – отношение текущего давления в аппарате к базовому($P_Б$ = 5 кПа), а R – отношение удельных значений теплоты фазового перехода исследуемого раствора к базовому ($r_б$ = 525 Дж/кг). Из полученного значения числа Bu можно рассчитать либо необходимую общую мощность (при заданной паропроизводительности), либо сделать поверочный расчет и определить производительность аппарата при известной мощности электромагнитных генераторов.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили заявленные предположения и показали что, скорость выпаривания напрямую зависит от значения давления в аппарате и не зависит от значения концентрации сухих веществ в диапазоне концентраций до 80% (рис.1,2),а рост давления в аппарате приводит к уменьшению скорости выпаривания.

Существенная разность скоростей выпаривания (рис. 1) объясняется типом растворителя. Результаты опытов показали, что скорость влагоизвлечения в спиртосодержащих системах в 2-2,5 раза выше, чем в водорастворимых. В свою очередь, ацетоносодержащие растворы отличаются еще большей скоростью, которая в 5 раз превышает скорость влагоизвлечения водорастворимых систем.

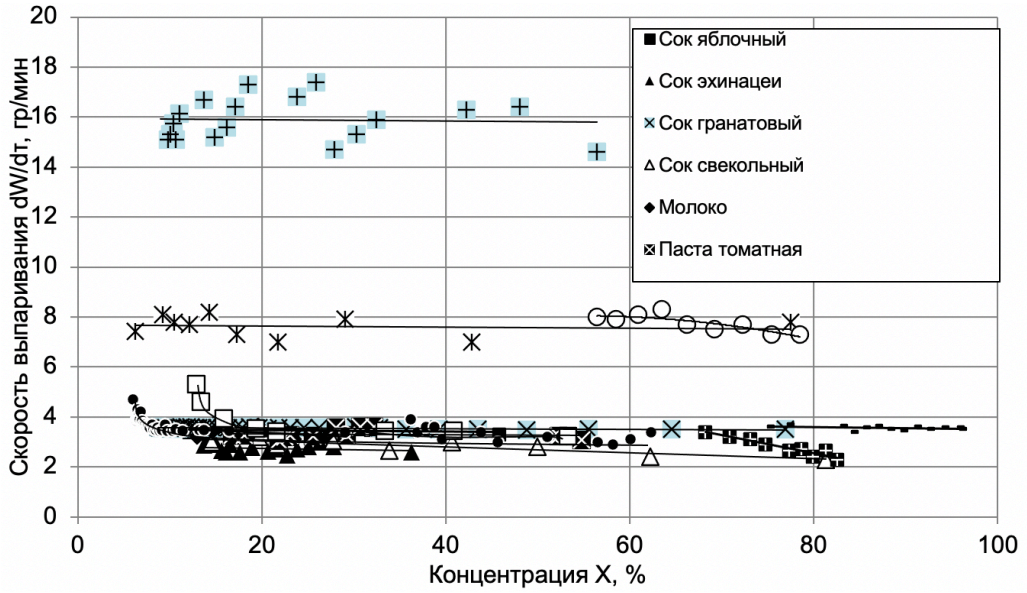


Рисунок 1– Зависимость скорости выпаривания от концентрации сухих веществ для различных систем

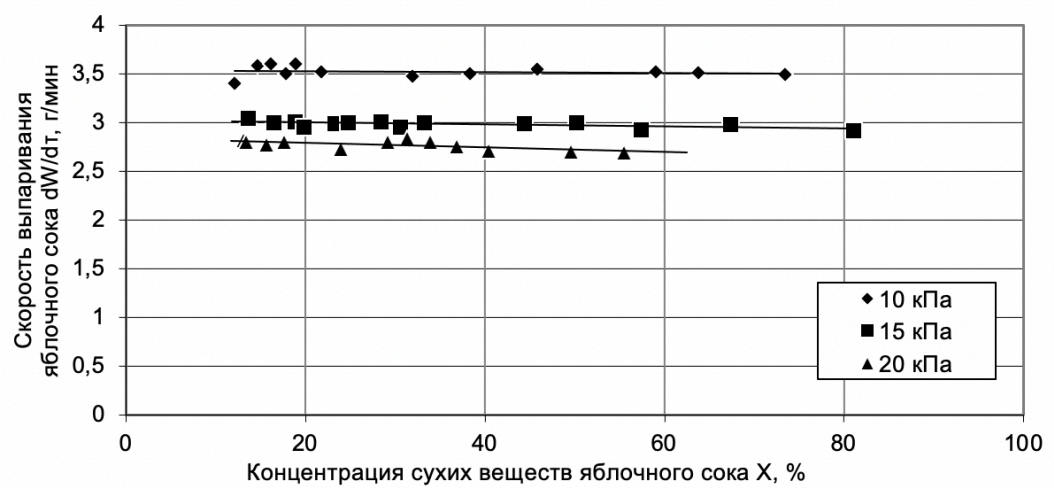


Рисунок 2 – Влияние давления на скорость выпаривания яблочного сока

Обобщение экспериментальных данных по концентрированию сахарного раствора, различных соков (яблочного, гранатового, свекольного, эхинацеи), молока, томатной пасты водных и спиртовых экстрактов из корня мискантуса, кофейного шлама, виноградных косточек (рис. 1, 2) позволило определить численные значения коэффициентов критериального уравнения (1).

$$Bu = 1{,}73 \cdot P^{0{,}07} \cdot R^{-0{,}2} \qquad (2)$$

Полученная модель в критериальной форме позволяет рассчитать микроволновой вакуум-выпарной аппарат периодического действия для растворов, содержащих полярные молекулы. В диапазоне безразмерного давления $2 \leq P \leq 22$, и при уровне безразмерной теплоты фазового перехода $1 \leq R \leq 4{,}56$ модель обеспечивает точность с максимальным отклонением в ± 8%.

В результате экспериментальных исследований были получены опытные образцы готового продукта, обладающего достаточно высоким качеством в сравнении с результатами классических выпарных аппаратов. Конечная концентрация сухих веществ доходит до 80-85 °brix, что на 20-25% выше, чем в традиционных установках.

Выводы

Приведен сравнительный анализ классических технологий обезвоживания и выделены основные проблемы, решение которых легло в основу сформулированной гипотезы о возможности перехода от ГУ 3 рода к ГУ 2 рода. Экспериментальные исследования подтвердили возможность получения высококонцентрированного продукта при сохранении его качества за счет применения технологий адресной доставки энергии микроволновым излучением. Полученное критериальное уравнение может быть использовано для проектирования устройств для обезвоживания продуктов при микроволновом подводе энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yang X.-B., Zhao L., Goh K., Sui X.-L., Meng L.-H., Wang Z.-B.* A phosphotungstic acid coupled silica-Nafion composite membrane with significantly enhanced ion selectivity for vanadium redox flow battery. // Journal of Energy Chemistry. 2019.V. 41, P. 177-184.

2. Simić S., Orašanin G., Golubović D., Milić D., Batinić K. Consideration of Opportunities for the Optimization of Heat Energy Consumption in Industry and Energetics. // Lecture Notes in Networks and Systems.2019. V. 76, P. 494-503.

3. *Khajehei F., Niakousari M., Eskandari M. H., Sarshar M.* Production of pomegranate juice concentrate by complete block cryoconcentration process. //Journal of Food Process Engineering.2015. V. 38(5), P. 488-498.

4. *Тришин Ф.А., Трач А.Р., Орловская Ю.В*. Управление потоками энергии в низкотемпературных разделительных установках. // Problemeenergeticiiregionale. 2018. V. 1(36), P. 72-86.

5. *Бурдо О. Г*. Эволюция сушильных установок. Одесса: Полиграф, 2010. 368с.

6. Гаврилов А.В. Экспериментальное моделирование процесса выпаривания водных растворов в условиях вакуума и микроволнового поля. // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина», 2020. Т. 1(95), С. 41-50.

7. Бурдо О.Г., Сиротюк И.В., Альхури Ю., Левтринская Ю. О. Микроволновая энергия, как фактор интенсификации тепломассопереноса и формирования полиэкстракта. // Problemeleenergeticiiregionale. 2018. V. 1(36), P. 58-71.

УДК 677.017 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-83-87

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТКАНЕЙ ДЛЯ СПЕЦОДЕЖДЫ РАБОТНИКОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ
INTEGRATED QUALITY ASSESSMENT OF FABRICS FOR WORKERS OF OIL AND GAS COMPLEX AFTER EXPOSURE TO OPERATIONAL FACTORS

Курденкова Алла Вячеславовна, Буланов Ярослав Игоревич
Alla V. Kurdenkova, Yaroslav I. Bulanov

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

Аннотация: В работе проведено исследование влияния количества стирок на физико-механические свойства тканей, предназначенных для изготовления спецодежды работников нефтегазового комплекса. Для комплексной оценки качества тканей был использован графический метод.

Abstract: The paper investigates the influence of the number of washings on the physical and mechanical properties of fabrics intended for the manufacture of overalls for workers in the oil and gas complex. For a comprehensive assessment of the quality of tissues, a graphical method was used.

Ключевые слова: ткани для специальной одежды, физико-механические свойства, комплексная оценка качества, многократные стирки, эксплуатационные факторы.

Keywords: fabrics for special clothing, physical and mechanical properties, comprehensive quality assessment, multiple washes, operational factors.

Одним из основных требований по безопасности и охране труда является обеспечение работников средствами индивидуальной защиты, к которым относится рабочая одежда. Это одежда (костюмы, комбинезоны, комплекты и т.д.), специально разработанная и предназначенная для защиты сотрудников предприятия от воздействия неблагоприятных и вредных производственных факторов, что в свою очередь позволяет снизить уровень профессиональных заболеваний среди сотрудников. Свойства спецодежды, будь то защитные или функциональные, зависят от правильного выбора материала применяемого для изготовления данной одежды [1].

Для исследования выбрали 4 образца различного переплетения (таблица 1). Ткани отличаются плотностью по основе и утку, а также линейной плотностью нитей. Волокнистый состав тканей также варьировали.

Изменения линейных размеров после мокрых обработок специальных тканей определяют по ГОСТ 30157.0 [2] и по ГОСТ 30157.1 [3].

Результаты расчёта изменения линейных размеров после мокрых обработок приведены в таблице 2.

Из данных, представленных в таблице 2 видно, у тканей произошла усадка. Наибольшую усадку имеет Ткань 2, выработанная с наименьшей поверхностной плотностью и низкой плотностью по утку. В этом случае, при набухании нитей под воздействием мокрых обработок, заполняется пространство между ними. Наименьшую усадку имеет Ткань 3, выработанная с одинаковой линейной плотностью нитей и практически одинаковой плотностью ткани по основе и утку. В процессе стирок усадка увеличивается по логарифмическому закону.

Таблица 1 – Структурные характеристики исследуемых тканей

Наименование показателей	Наименование ткани			
	Weldshield 450	Banwear	Flameshild 400	Weldersafe
Условные обозначения	Ткань 1	Ткань 2	Ткань 3	Ткань 4
Состав ткани	100% ХЛ	88% ХЛ, 12% ПА	100% ХЛ	100% ХЛ
Поверхностная плотность ткани М1, г/м^2	450	305	400	440
Линейная плотность нитей основы $Т_о$, текс	95	65	86	80
Линейная плотность нитей утка $Т_у$, текс	95	65	86	80
Число нитей основы на 100 мм ткани $П_о$	240	280	230	250
Число нитей утка на 100 мм ткани $П_у$	220	175	225	280
Толщина ткани b, мм	0,79	0,58	0,65	0,86
Вид переплетений	Сатин 8/1	Саржевое	Полотняное	Сатин 8/1
Пропитка	Огнестойкая технология Proban®			

Таблица 2 - Результаты расчёта изменения линейных размеров после мокрых обработок, %

Наименование ткани	Количество стирок									
	1		5		10		25		50	
	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток
Ткань 1	-0,62	-0,33	-1,35	-1,11	-1,56	-1,56	-2,56	-2,16	-2,76	-2,16
Ткань 2	-0,56	-0,78	-1,13	-2,00	-1,55	-2,42	-2,34	-2,89	-2,82	-2,89
Ткань 3	-0,81	-0,44	-1,25	-1,23	-1,67	-1,53	-2,13	-1,89	-2,56	-1,89
Ткань 4	-0,52	-1,33	-0,89	-1,56	-1,33	-2,19	-1,68	-2,62	-1,93	-2,62

Механические свойства тканей специального назначения определялись на испытательной системе Instron серии 4411 в соответствии с ГОСТ 3813 [4]. Результаты определения разрывной нагрузки приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты определения разрывной нагрузки тканей специального назначения

Количество стирок	Ткань 1		Ткань 2		Ткань 3		Ткань 4	
	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток
	Разрывная нагрузка, Н							
0	2023	655	1053	642	1770	783	1125	670
1	1992	598	992	585	1689	726	1097	613
5	1787	512	876	499	1586	640	992	527
10	1656	458	768	445	1458	586	856	473
25	1468	338	612	325	1231	466	757	353
50	1236	235	453	222	862	363	567	250

Наибольшей разрывной нагрузкой по основе обладает Ткань 1, выработанная из нитей с наибольшей линейной плотностью, а по утку Ткань 3 и Ткань 4. Это связано с различием плотностей тканей и видом переплетения.

Наименьшую разрывную нагрузку по основе имеет Ткань 2, а по утку Ткань 1. В процессе стирок происходит износ полотен, поэтому их прочность снижается.

В процессе стирки под действием моющих средств и механических воздействий происходит расшатывает структуры нитей, что негативно сказывается на механических свойствах тканей специального назначения.

Воздухопроницаемость тканей специального назначения определялась на приборе ВПТМ-2 в соответствии с ГОСТ 12088 [5]. Результаты определения приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Воздухопроницаемость тканей специального назначения после многократных стирок, $дм^3/м^2с$

Количество стирок	Ткань 1	Ткань 2	Ткань 3	Ткань 4
0	33,22	111,5	19,95	166,7
1	32,0	108,6	18,4	162,0
5	31,2	104,7	17,6	159,3
10	30,2	94,7	16,6	156,8
25	28,9	82,3	14,8	152,3
50	27,3	66,6	13,7	148,3

Наибольшей воздухопроницаемостью обладает Ткань4 выработанная с наибольшей пористостью. Наименьший показатель воздухопроницаемости имеет Ткань3 с наименьшим показателем пористости. Пористость зависит от линейной плотности нитей и плотности самой ткани.

Гигроскопичность характеризует способность ткани поглощать пары воды, что является актуальным для тканей специального назначения. Гигроскопичность в соответствии с ГОСТ 3816 [6]. Результаты испытаний приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Гигроскопичность тканей специального назначения после многократных стирок, %

Количество стирок	Ткань 1	Ткань 2	Ткань 3	Ткань 4
0	2,22	0,90	0,89	1,23
1	2,33	0,98	1,12	1,69
5	2,62	1,50	1,36	2,09
10	2,83	1,74	1,79	2,54
25	3,34	2,59	2,43	3,69
50	4,63	5,00	3,79	7,09

В начальный период все ткани обладают идентичными значениями показателя гигроскопичности. Достаточно низкие значения объясняются наличием пропитки различной степени. По мере увеличения количества стирок, происходит вымывание пропитки, что начинает позитивно сказываться на показателе гигроскопичности. Наибольшее изменение наблюдается у Ткани 4. Наименьшее изменение у Ткани 1.

Водопоглощение определяется также в соответствии с ГОСТ 3816 [27]. Результаты испытаний приведены в таблице 6.

Водопоглощение зависит от волокнистого состава ткани и степени пропитки. Наименьшим показателем водопоглощения обладает Ткань 3. Ткань незначительно впитывает воду, что позволяет одежде оставаться сухой при непосредственном контакте с водой, но при этом ткань хорошо пропускает воду. Наихудший показатель водопоглощения у Ткани 4, которая быстро впитывает влагу, но не пропускает её.

Таблица 6 – Водопоглощение тканей специального назначения после многократных стирок, %.

Кол-во стирок	Ткань 1	Ткань 2	Ткань 3	Ткань 4
0	48,56	56,23	13,25	72,16
1	50,50	59,13	14,40	74,74
5	55,90	61,50	16,00	78,78
10	58,10	63,90	18,90	82,00
25	64,64	69,80	21,60	90,00
50	76,47	82,02	28,16	99,23

Так как исследуемые ткани планируется применять для изготовления одежды сотрудников нефтегазового комплекса, необходимо исследовать поведение тканей при попадании на них таких веществ как нефть, масло и бензин.

Ткани 1, 2 и 4, без многократных стирок, является не стойкой к воздействиям масла, нефти и бензина. Причём бензин быстро растекается по капиллярам ткани, не образуя капель. Вещества проходят на изнаночную строну, что является не безопасным для работающего.

Ткань 3, после многократных стирок, остаётся стойкой к воздействиям масла, нефти, однако масло начинает проходить на изнаночную строну. Масло и нефть образуют на поверхности капли, при это м не растекаясь по капиллярам, при этом бензин На изнаночную строну капли не проходят.

Стойкость к воздействию открытого пламени определялась путём горизонтального и вертикального горения.

Под действием открытого пламени ткани начинают тлеть, а на «горизонтальных» образцах отчётливо виден ореол сгорающей пропитки. В месте воздействия открытым пламенем ткани становятся хрупкими и легко разрушаются.

Для расчета комплексной оценки фактические показатели качества были переведены в безразмерные. За базовые значения принимались значения показателей, полученных без стирок тканей. Исключением являлась усадка. За базовое значение в данном случае принимались фактические значения после 1 стирки.

На рисунке 1 приведена комплексная оценка качества исследуемых тканей.

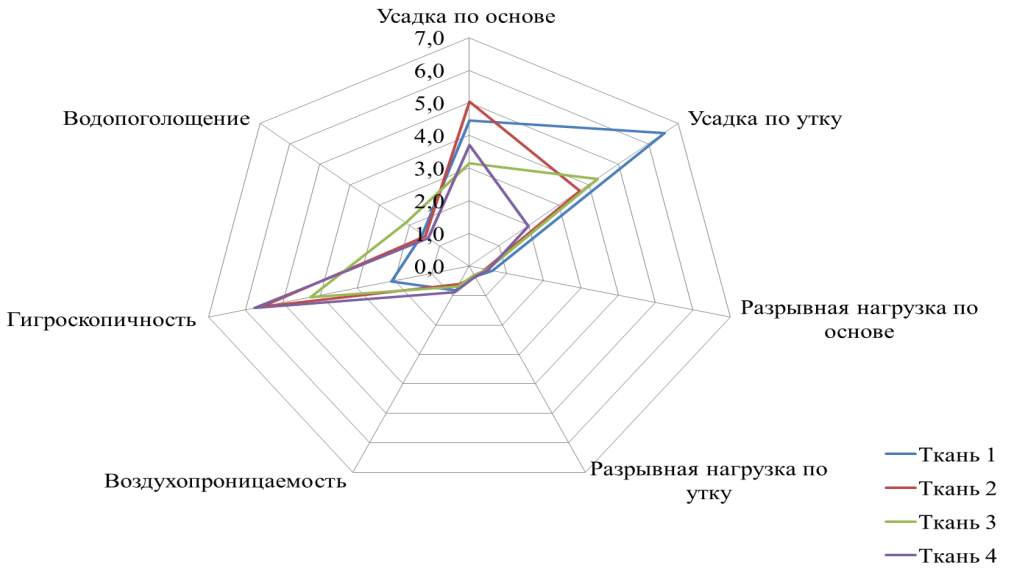


Рисунок 1 – Комплексная оценка качества исследуемых тканей

Из представленной на рисунке 1 диаграммы видно, что наибольшую площадь занимает многоугольник, соответствующий Ткани 2. Однако с учетом показателей стойкости к действию нефтепродуктов наилучшей является Ткань 3.

Вывод

Ткань 3 можно рекомендовать для пошива специальной одежды работников нефтегазового комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирюхин С.М., Шустов Ю.С. Текстильное материаловедение. – М.: КолосС, 2010. – 360 С.
2. ГОСТ 30157.0-95 «Методы определения изменения размеров после мокрых обработок или химической чистки. Общие положения»
3. ГОСТ 30157.1-95 «Методы определения изменения размеров после мокрых обработок или химической чистки. Режимы обработок»
4. ГОСТ 3813-72 (ИСО 5081-77, ИСО 5082-82) «Материалы текстильные. ткани и штучные изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении»
5. ГОСТ 12088-77 «Материалы текстильные и изделия из них. Метод определения воздухопроницаемости»
6. ГОСТ 3816-81 (ИСО 811-81) «Полотна текстильные. Методы определения гигроскопических и водоотталкивающих свойств»

УДК 536.12.(43) DOI: 10.37816/eeste-2021-1-87-89

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОЛУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ
COMPUTER SIMULATION AND OBTAINING AN EQUATION OF STATE FOR NANOFLUIDS

Сафаров Махмадали Махмадиевич *, Джумаева Нигина Эраджевна **, Джабборзода Матлаби *, Махмадиев Бахтиер Махмадалиевич *****
Mahmadali M.Safarov,Nigina E.Jumaeva**, Matlabi Jabborzoda***, Bakhtier M. Mahmadiev *****

**Таджикский технический университет имени ак. М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан*
**Tajik technical university by named akad.M.S.Osimi,Dushanbe,Tajikistan*
(e-mail:mahmad1@list.ru)
***Таджикский национальный университет, Душанбе,Таджикистан*
***Tajik national university , Dushanbe,Tajikistan*
(e-mail:nigina@mail.ru)
****Таджикский государственный педагогический университет им. С. Айни, Душанбе, Таджикистан*
Tajik developmad pedagogical university named S.Aini, Dushanbe, Tajikistan
(e-mail:matlab@mail.ru,e-mail:bahtiyer@list.ru)

Аннотация: В настоящей работе рассматривался процесс стационарного течение, цилиндрического полости заполненной неньютоновской жидкостью (коллоидная наножидкость), который распекался на нижней стенке рассматриваемой области. В качестве исследуемых образцов нами использована толуол с добавкой наночастиц с эффектами памяти. (микро-, наноразмерного) фракции. Разработанный численный алгоритм был детально протестирован в классе модельных задач и получил хорошее согласование с другими авторами.

Abstract: In this work, we considered the process of a stationary flow of a cylindrical cavity filled with a non-Newtonian liquid (colloidal nanofluid), which was melted on the lower wall of the

region under consideration. As the samples under study, we used toluene with the addition of nanoparticles with memory effects. (micro-, nanoscale) fractions. The developed numerical algorithm was tested in detail in the class of model problems and was in good agreement with other authors.

Ключевые слова: толуол, коллоидная наножидкость, наночастиц с эффектами памяти форм, плотность, метод гидростатического взвещивания.

Keywords: toluene, colloidal nanofluid, shape memory nanoparticles, density, hydro-static weighing method

Введение. При разработке новых материалов с заданными свойствами и их использование для высокотехнологичных отраслей промышленности крайне важно предсказание плотности и на его основе получит УС наножидкостей. При этом, несмотря на обширный накопленный опыт проектирования и эксплуатации наночастиц с эффектами памяти (микро-, наноразмерный) фракции и их использование для приготовления наножидкостей, на данный момент не существует единой теории и модели, объясняющей и предсказывающей все эффекты, которые можно наблюдать в эксперименте. Математическое моделирование с использованием распространенных программных пакетов широко применяется при работе с обычными жидкостями, но в случае композитов не дает достаточно надежных результатов для применения их на практике. Исследуемый процесс описывался нестационарными дифференциальными уравнениями. Данная методика позволяет исключить поле давления из числа неизвестных параметров, а безразмеривание позволяет обобщить полученные результаты на множество физических постановок. Сформулированная математическая модель с соответствующими граничными условиями решалась на основе метода конечных разностей.

В результате численного моделирования процесс текучести в замкнутой цилиндрической полости с источниками энергии был проведен анализ влияния характеризующих параметров: число Архимеда, число Био, числа Грассгофа и Прандтля, числа Рэлея, числа Нуссельта, число Пекли и др..

В случае моделирования динамического нагружения, как правило, применяются те же критерии разрушения, что и для статического. Еще одной из проблем, появляющихся при моделировании разрушения композиционных материалов, является то, что большая часть критериев разрушения формулируется для двумерного случая. В трехмерном случае многие критерии зачастую не только имеют сложную формулировку, но и требуют констант, которые крайне сложно получить при экспериментах. Разработки критериев разрушения представлены в работе. В данной работе приводится описание критериев текучести нано-жидкостей, которые используют определенный набор параметров материала, доступных для непосредственного измерения. Эти критерии используются во многих коммерческих расчетных пакетах. Также приводится расчет модельных задач, сравнение критериев друг с другом и анализ физических механизмов, на которых эти критерии основаны.

Кроме того, при составлении математической модели численно определяют энергии взаимодействия между частицами и молекулами наножидкостей, которые входит в дифференциальном уравнение. Теплофизические характеристики наножидкостей, которые используются при составлении компьютерного моделирования т.е. при вышеперечисленных расчетах применяются из Справочников или их получают экспериментальным исследованием.

Для нашего случая для наножидкости системы толуола с добавкой наночастиц из двуокиси титана (с эффектами памяти форм) для некоторых теплофизических характеристик, в том числе коэффициента динамической вязкости (кинематической и динамической), плотности при различных температурах и давлениях использованы установки, приведенные в работах [1-8].

Выводы. Для составления и расчета физические модели необходимо иметь данные по теплофизическим характеристиками наножидкостей при высоких параметров состояния. На основе экспериментальных данных и установлена, что плотность наножидкостей с повышением температуры падает и рост давления приводит к увеличения плотности

растворов. Для получения уравнения состояния (УС) использована метод Мамедова – Ахундова. Составлен алгоритм расчета калорический свойства исследуемых растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тиллоева, Т.Р., Гуломов М.М.,Сафаров М.М. Теплофизические и термодинамические свойства коллоидного водного раствора серебра. Монография, Душанбе, Изд. ТТУ им. акад.М.С.Осими, 2020.-131с.

2. Зарипова, М.А. Влияние наночастиц на изменение теплофизических, термодинамических свойств некоторых кислородосодержащих, азотосодержащих органических жидкостей при различных температурах и давлениях. /М.А. Зарипова //Дис…… д.т.н., Душанбе, 2016. 305с.

3. Зарипова, М.А. Теплопроводность и плотность водных растворов гидразина при высоких параметрах состояния / М.М. Сафаров, М.А. Зарипова. //Тез. докл. Респ. науч. - техн. конф. по ТСВ., 1992, Баку. 48 с.

4. Давлатов, Н.Б. Экспериментальное исследование плотности и теплоёмкости жидкого чистого гидразина при введении в него чистых сухих фуллеренов / В.А. Алтунин, Н.Б. Давлатов, М.А. Зарипова, М.М. Сафаров, И. Н. Алиев, М.Л. Яновская // Инженерный жур-нал: наука и инновации, 2020, вып. 2. http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-2-1957.

5. Давлатов, Н.Б. Влияние некоторых наноамфотерных оксидов Ag (99,99%) и фуллерена на изменение физико-химических свойств ракетных топлив (Обзор-эксперимент)/А.С. Назруллоев, И.Б. Маниш, Т.Р. Тиллоева, Н. Б.Давлатов, М.М. Сафаров, М.А. Зарипова и др. // Матер. 10 Международной теплофизической школы, 3-8 октября 2016 г., «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий». Душанбе-Тамбов, 2016. -С.109-120.

6. Давлатов, Н.Б. Плотность и уравнение состояния бинарных водных растворов (0,5 N_2H_4+0,5H_2O) мол. / Н.Б. Давлатов, М.М. Сафаров, М.А. Зарипова // 4 Конф. «Евро-Азия-2014». 2014. М., -С.45-49.

7. Гусейнов, К.Д. Исследование термодинамических свойств ряда кислородосодержащих органических веществ в широком интервале параметров состояния/Камал Дадаш огли Гусейнов//Дис…. д. т. н. Баку, 1979. 392с.

8.Сафаров,М.М.,Гусейнов К.Д.Теплофизические свойства простых эфиров в широком интервале параметров состояния. Душанбе, 1996.-196с.

УДК 66.02 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-90-93

МАССОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СУШКЕ ЯДЕР И ОБОЛОЧЕК СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА
MASS CONDUCTIVITY FOR DRYING NUCLEI AND SHELLS OF SUNFLOWER SEEDS

Рудобашта Станислав Павлович*, Зуева Галина Альбертовна, Дмитриев Вячеслав Михайлович*****
Stanislav P. Rudobashta*, Galina A. Zueva, Vyacheslav M. Dmitriev*****

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Россия, Москва
*Russian state agrarian University – MAA after K. A. Timiryazev, Russia, Moscow
(e-mail: rudobashta@mail.ru)
**Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Москва
** Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia, Moscow
университет, Россия
(e-mail: zueva_galina15@mail.ru)
***Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
*** Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(e-mail: dmitriev_tstu@mail.ru)

Аннотация: Экспериментально получены и проанализированы массопроводные свойства при сушке ядер и оболочек семян подсолнечника.

Abstract: Experimentally obtained and analyzed the mass transfer properties during drying of kernels and shells of sunflower seeds.

Ключевые слова: массопроводность, семена посолнечника, ядро, оболочка.
Keywords: mass conductivity, sunflower seeds, core, shell.

Важной составной частью проектирования массообменных аппаратов, к числу которых относятся и сушилки, является их кинетический расчет, целью которого является определение рабочего объема аппарата. В последние годы для целей кинетического расчета все чаще стали применять теоретические методы расчета, которые характеризуются тем, что расчет проводится только с использованием теплофизических характеристик материала, без предварительного (перед расчетом) физического моделирования процесса сушки в лабораторных условиях [1]. Это обусловлено: 1) развитием теории сушки, 2) повсеместным распространением персональных компьютеров, 3) наличием современных эффективных быстродействующих вычислительных комплексов, 4) наличием базы данных по теплофизическим характеристикам материалов. Теоретические методы расчета кинетики сушки базируются на решениях дифференциальных уравнений взаимосвязанного тепломассопереноа [2], записываемых по отношению к единичному высушиваемому телу. Математическая модель формулируется сначала по отношению к единичной частице (микрокинетика процесса), а затем расчет распространяется на всю совокупность частиц, находящихся в аппарате (макрокинетика процесса).

В число высушиваемых дисперсных сельскохозяйственных материалов входят семена, состоящие из ядра и оболочки, резко различающихся по своим теплофизическим и физико-механическим свойствам, такие, как семена подсолнечника, тыквы, дыни, арбуза и др. Применение теоретических методов описания микрокинетики сушки данных материалов требует раздельного учета теплофизических свойств их составных частей.

В связи с этим целью данной работы было экспериментальное изучение массопроводности при сушке ядра и оболочки семени подсолнечника. Коэффициент массопроводности k (м^2/с) высушиваемого материала зависит от его влагосодержания u (кг/(кг сух. м-ла) и

температуры t (°С): $k = f(u,t)$. Для определения концентрационных зависимостей коэффициента массопроводноости ядра и оболочки семени подсолнечника при различных температурах использовали зональный метод [3]. В соответствии с этим методом снимали кривые сушки ядер и оболочек семени при отсутствии внешнего диффузионного сопротивления, которое достигалось за счет достаточно большой скорости обдува семян (5 м/с).

Исследования проводили на установке, показанной на рис. 1. Она состоит из термостатированного шкафа1, внутри которого находится рабочий канал 2 с подвешенными к весам образцами ядер или оболочек семян подсолнечника, помещенными между витками пружинной подвески 3, центробежный вентилятор 4, создающий рециркуляционный поток воздуха в пределах его скоростей 0,5 - 5 м/с, электрический калорифер 5 для нагрева воздуха до необходимой температуры (40 или 50°С), терморегулятор 6, торсионные весы 7 марки PRLT фирмы Techniport для взвешивания образцов с погрешностью 1 мг. Байпасные воздуховоды 9 с регулируемым расходом воздуха служили (при необходимости) для частичного обновления воздуха внутри термостата. Скорость воздуха, обдувающего высушиваемые образцы, измеряли термоанемометром с погрешностью ± 0,05 м/с), температуру воздуха – термопарой марки ХК с вторичным прибором 2 ТРМОА (погрешность - 0,2 °С). Внутрь термостата были помещены кюветы с адсорбентом (силикагелем) для осушения рециркуляционного воздуха – с целью поддержания его постоянной низкой влажности в камере, близкой к нулевой. Катетометр 6, которым укомплектована установка, в данной работе не использовался (он используется, когда образцы подвешиваются к кварцевой пружине в качестве весоизмерительного инструмента). Исследовали ядра и оболочки семян подсолнечника сорта «МАС 95 ОЛ».

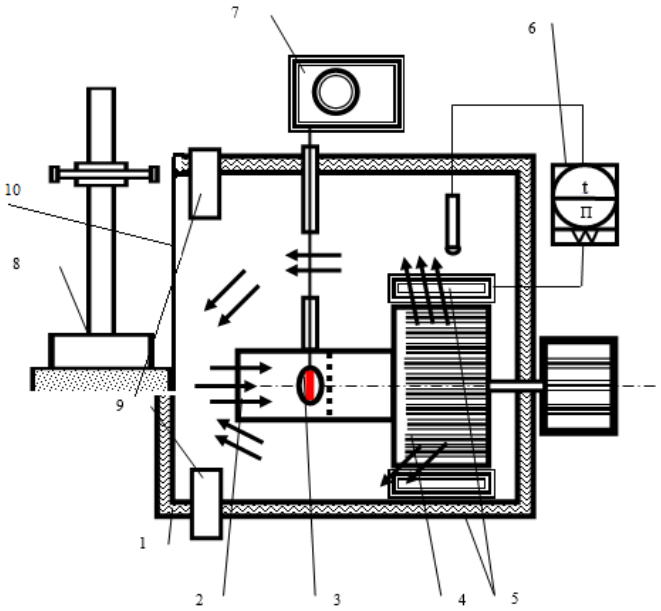


Рисунок 1 – Схема установки: 1 – термостатированный шкаф; 2 – рабочий канал; 3 – подвеска с образцами; 4 – центробежный вентилятор; 5 – электрокалорифер; 6 – терморегулятор; 7 – весы ; 8 – катетометр; 9 – байпасные воздуховоды; 10 – прозрачная стенка

Полученные кривые сушки приведены на рис. 1 и 2. Их характер свидетельствует о том, что при скорости воздуха 5 м/с сушка полностью протекает во втором периоде, что характерно для капиллярно-пористых коллоидных материалов.

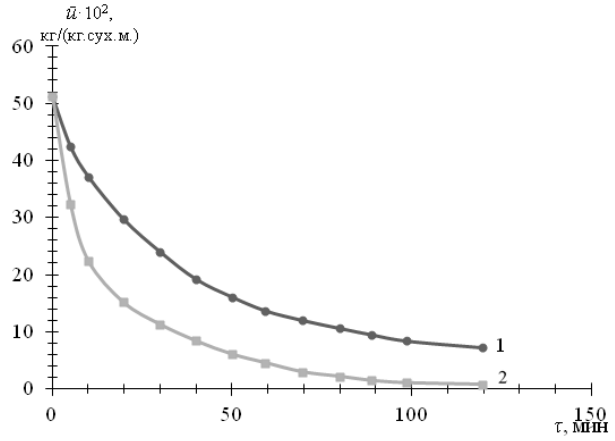


Рисунок 2 – Кривые сушки ядра семени подсолнечника сорта МАС 95 ОЛ:
1 - t = 40°С; 2 - t = 50°С

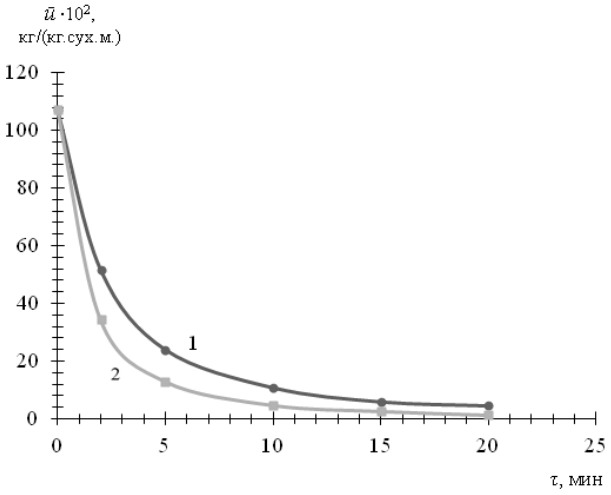


Рисунок 3 – Кривые сушки оболочки семени подсолнечника сорта МАС 95 ОЛ:
1 – t = 40°С; 2 - t = 50°С

Порядок эксперимента был следующим. Выводили установку на заданный температурный режим, затем в нее быстро помещали подвеску с ядрами или оболочкми в количестве 20 штук (каждый образец обдувался индивидуально), взвешивали, включали секундомер и начинали опыт, в ходе которого через определенные промежутки времени измеряли вес подвески с образцами (вентилятор во время взвешивания выключали). По окончании опыта образцы извлекали из рабочей камеры и определяли их сухую массу весовым методом по ГОСТ10856 - 96. «Метод определения влажности» (дата актуализации 21.04.2018г.) Для этого их в течение 4 часов высушивали в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ при температуре 130ºС для полного удаления из них влаги и после охлаждения взвешивали с точностью до 0,001 г. Кривые сушки получали с трехкратной повторностью.

Из полученных кривых сушки по уравнению (1) зональным методом были рассчитаны зависимости коэффициента массопроводности от влагосодержания материала

$$k_i = \frac{R^2}{\tau_i \mu_i} \ln \frac{B}{\bar{E}_i}, \qquad (1)$$

где i – номер концентрационной зоны; B – параметр, который согласно рекомендациям [3] принимали равным 1; μ_i - первый положительный корень характеристического уравнения решения задачи массопроводности для тела соответствующей формы (для ядра - сфера, для оболочки – пластина); R – радиус сферы или половина толщины пластины, м.

Необходимые для расчетов данные по геометрическим размерам образцов получали пикнометрическим методом – с помощью мерных цилиндров. В этих опытах для повышения точности измерений использовали 30 штук семян или их ядер. Находили отдельно средний объем цельного семени и его ядра. Далее, уподобляя образцы сферам, находили их эквивалентный диаметр $d_э$ (мм) – по формуле

$$d_э = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}, \qquad (2)$$

где V – объем одного образца, мм^3.

Было найдено: для семени в целом $d_{э.с}$ = 5,94 мм, для ядра $d_{э.я}$ = 4,56 мм. Толщину оболочек измеряли штангенциркулем, получив следующее среднее значение толщины: l = 0,42 мм, разница же значений ($d_{э.с}$ - $d_{э.я}$)/2 = 0,69 мм. Это указывает на то, что оболочки семян плотно не прилегают к своим ядрам, между ними есть воздушный зазор толщиной примерно 0,27 мм. Это надо учитывать при расчете кинетики сушки семени подсолнечника по математической модели как для двухслойного тела на основе решений дифференциального

уравнения массопроводности. Была исследована также плотность абсолютно сухих ядер и оболочек, которые оказались соответственно равными: $\rho_я = 1248$ кг/м^3; $\rho_{об} = 2828$ кг/м^3.

При расчете k по уравнению (1) принимали для ядра: $R = 2{,}28$ мм, $\mu = \pi$ (сфера); для оболочки: $R = l = 0{,}42$ мм; $\mu = \pi/2$ (пластина). Полученные путем обработки кривых сушки зависимости $k = f(u)$ приведены на рис. 4 и 5. Их них видно, что коэффициент k как ядер, так и оболочек зависит от влагосодержания материала, что необходимо учитывать при расчете кинетики процесса. Коэффициент k у ядер на разных участках влагосодержания материала в 15-25 раз больше, чем у оболочек, что объясняется их разным морфологическим строением. Вид зависимостей $k = f(u)$ для ядер аналогичен таковым для семян различных культур и имеет достаточно близкие численные значения [4] (порядок коэффициента 10^{-9} м^2/с). Зависимость $k = f(u)$ для оболочки, имеющей древовидное строение, аналогична таковой для древесины [2].

Характер зависимости $k = f(u)$ в данном случае у обоих материалов также одинаков, что объясняется схожестью морфологического строения древесины и оболочек семян. Коэффициенты k оболочек семян и древесины также имеют порядок 10^{-9} м^2/с. Сложный характер зависимости $k = f(u)$ древесины от влагосодержания объясняется изменением с влагосодержанием доминирующего механизма внутреннего массопереноса в процессе сушки [2]. В области малых u доминирующим механизмом массопереноса по А.В. Лыкову является осмотический перенос влаги, а при больших влагосодержаниях – диффузия пара [2]. При весьма больших влагосодержаниях материала имеет место капиллярная массопроводность. Этот участок зависимости $k = f(u)$ наблюдается у древесины при $u > 1$, у оболочек семян области $u > 1$ просто нет (рис. 5).

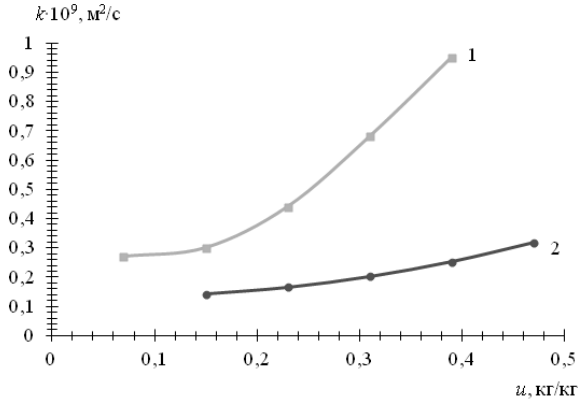


Рисунок 4 – Зависимости $k = f(u)$ для ядра семени подсолнечника МАС 95 ОЛ:
1 – t = 50°С; 2 - t = 40°С

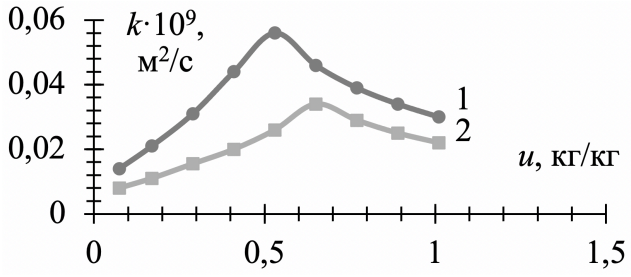


Рисунок 5 – Зависимости $k = f(u)$ для оболочки семени подсолнечника МАС 95 ОЛ:
1 – t = 50°С; 2 - t = 40°С

Вывод

Исследована и проанализирована массопроводность при сушке ядер и оболочек семян подсолнечника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Рудобашта С.П. Современное состояние и направления развития теории и практики сушки // Сб. научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ – 2020», 13−15 октября 2020, Москва, Изд. ООО «Мегаполис». С. 13-21.

2. Лыков А.В. Теория сушки. Изд. 2-е, перер. и доп. М.: Энергия, 1968. 422 с.

3. Рудобашта С.П**.** Массоперенос в системах с твердой фазой М.: Химия, 1980. 248с.

4.Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Зуев Н.А. Массопроводность при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2014. Т. 57. Вып. 1. С.103-107.

УДК 519.876.5 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-94-97

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАССОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ К-300-240
MATHEMATICAL MODEL OF THE MASS-ENERGY BALANCE OF THE STEAM TURBINE UNIT K-300-240

Солонарь Сергей Фёдорович
Sergiu F. Solonari

Институт Прикладной Физики, Кишинэу, Республика Молдова
Institute of Applied Physics, Chisinau, Republic of Moldova
(e-mail: solonari@phys.asm.md)

Аннотация: Рассмотрены особенности составления математической модели паротурбинной установки К-300-240. Приведенаматематическаямодель.

Abstract: The features of drawing up a mathematical model of the steam turbine installation K-300-240 are considered. Amathematicalmodelarepresented.

*Ключевые слова:*математическая модель, паротурбинная установка К-300-240

*Keywords:*mathematical model, steam turbine unit K-300-240

Оптимизация энергетических потоков для повышением энергетической эффективности паротурбинной установки К-300-240 возможно провести путём математического моделирования на основе массово-энергетического баланса.

Составление материально-энергетических балансов паротурбинной установки К-300-240-2.

1. Материальный баланс

$$D_0 = D_I + D_{II} + D_{III} + D_{IV} + D_V + D_{VI} + D_{VII} + D_{VIII} + D_{IX} + D_K, \quad (1)$$

где D_0 – массовый расход пара парогенератора, $D_I - D_{IX}$ – массовый расход пара регенеративногоотбора паротурбинной установки, D_K – массовый расходпара в конденсатор.

2. Энергетический баланс паротурбинной установки

$$\begin{gathered} D_I(h_{\text{ПГ}} - h_I) + (D_{II} + D_{III} + D_{IV} + D_V + D_{VI} + D_{VII} + D_{VII} + D_{IX} + D_K) \times \\ \times (h_{\text{ПГ}} - h_{II}) + D_{III}(h_{\text{ПП}} - h_{III}) + D_{IV}(h_{\text{ПП}} - h_{IV}) + D_V(h_{\text{ПП}} - h_V) + \\ + D_{VI}(h_{\text{ПП}} - h_{VI}) + D_{VII}(h_{\text{ПП}} - h_{VII}) + D_{VIII}(h_{\text{ПП}} - h_{VIII}) + \\ + D_{IX}(h_{\text{ПП}} - h_{IX}) + D_K(h_{\text{ПП}} - h_K) = N_{\text{эл}}^{\text{макс}}, \end{gathered} \quad (2)$$

где $h_{\text{ПГ}}$ – энтальпия потока пара парогенератора, $h_{\text{ПП}}$ – энтальпия потока пара пароперегревателя, $h_I - h_{IX}$ – энтальпия расходов пара регенеративного отбора, h_K – энтальпия потока пара в конденсатор.

3. Энергетический баланс подогревателя высокого давления № 8

$$D_0(h_0 - h_8) = D_I(h_I - h_I'), \quad (3)$$

где h_0 – энтальпия пара перед парогенератором, h_8 – энтальпия пара перед подогревателем высокого давления № 8, h_I' - энтальпия конденсата I отбора.

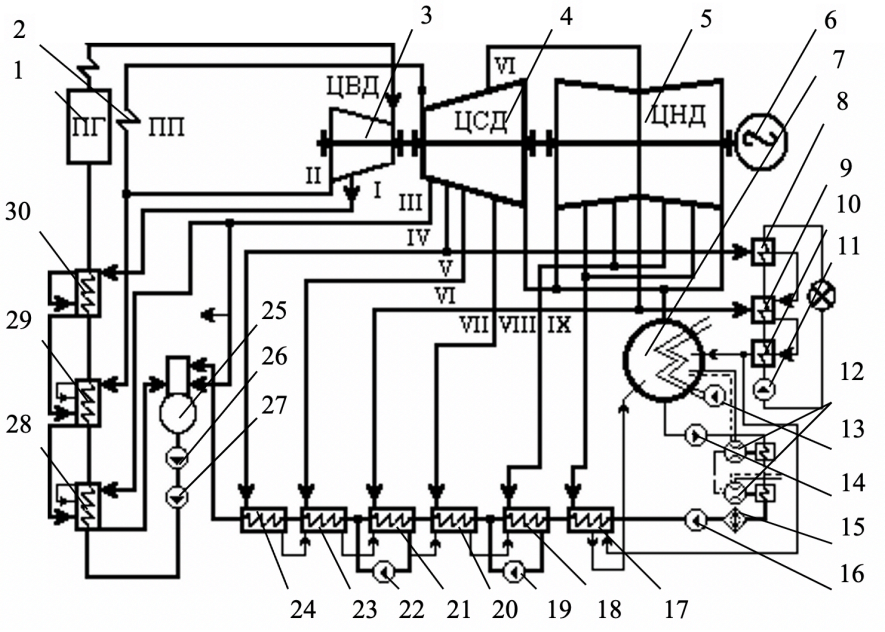


Рисунок 1 – Схема энергетических потоков турбоустановки К-300-240 [1]
1 – парогенератор, 2 – пароперегреватель, 3 – цилиндр высокого давления, 4 - цилиндр среднего давления, 5 - цилиндр низкого давления, 6 – электрический генератор, 7 – конденсатор, 8, 9, 10 – установка сетевых подогревателей (пиквый и основной бойлеры, охладитель дркнажа), 11 – насос сетевой воды, 12 – эжекторная группа (основной эжектор и эжектор уплотнений с охладителями пара), 13 – циркуляционный насос, 14 – конденсатный насос I ступени (КН I), 15 – блочная абсоливающая установка,16 – конденсатный насос IIступени (КН II), 17 – подогреватель низкого давления (ПНД № 1), 18 – ПНД № 2, 19 – насос дренажный ПНД № 2 (ДН 2), 20 – ПНД № 3а, 21 – ПНД № 3, 22 – насос дренажный (ДН 1), 23 – ПНД № 4, 24 – ПНД № 5 с встроенным пароохладителем, 25 – деаэратор, 26 – бустерный насос, 27 – питательный насос с электроприводом, 28 – 30 – подогреватели высокого давления (ПВД № 6, 7, 8), I – IXномера регенеративных отборов пара.

4. Энергетический баланс подогревателя высокого давления № 7

$$D_0(h_8 - h_7) = D_I(h'_I - h'_{II}) + D_{II}(h_{II} - h'_{II}), \quad (4)$$

где h_7 – энтальпия пара перед подогревателем высокого давления № 7, h'_{II} – энтальпия конденсата II регенеративного отбора.

5. Энергетический баланс подогревателя высокого давления № 6

Расход пара III-го регенеративного отбора разделяется на два потока, первый из которых направляется в подогреватель высокого давления № 6, а второй – в деаэратор.

$$D_{III} = D_{III.1} + D_{III.2}, \quad (5.1)$$

$$D_0(h_7 - h_6) = (D_I + D_{II})(h'_{II} - h'_{III}) + D_{III.1}(h_{III} - h'_{III}), \quad (5.2)$$

где $h_6 = h'_{\text{деаэратора}}$ – энтальпия пара перед подогревателя высокого давления № 6, h'_{III} –энтальпия конденсата III отбора.

6. Энергетический баланс деаэратор [2]

$$D_0 h_6 = D_{III.2} h_{III} + (D_{IV} + D_V + D_{VI} + D_{VII} + D_{VIII} + D_{IX} + D_K) h_{0.\text{деаэратора}} + \\ + (D_I + D_{II} + D_{III.1}) h'_{III}, \quad (6)$$

где $h_{0.\text{деаэратора}}$ – энтальпия воды перед деаэратором и после подогревателя низкого давления № 5

7. Энергетический баланс подогревателя низкого давления № 5

$$D_{IV}(h_{IV} - h'_{IV}) = (D_{IV} + D_V + D_{VI} + D_{VII} + D_{VIII} + D_{IX} + D_K)\left(h_{0.\text{деаэратора}} - h_5\right) \quad (7)$$

где h_5 – энтальпия воды перед подогревателя низкого давления № 5

8. Энергетический баланс подогревателя низкого давления № 4

$$D_V(h_V - h'_V) + D_{IV}(h'_{IV} - h'_V) = (D_{IV} + D_V + D_{VI} + D_{VII} + D_{VIII} + D_{IX} + D_K)(h_5 - h_{4.2}) \quad (8.1)$$

Расход конденсата подогревателя низкого давления № 3 разделяется на два потока, первый поток поднимается дренажным насосом (ДН 1), второй поток конденсата направляется в следующий подогреватель

$$D_{IV} + D_V + D_{VI} = D_{VI.1} + D_{VI.2} \quad (8.2)$$

Процесс смешения перед подогревателем низкого давления № 4 имеет две энтальпии до и после смешения, $h_{4.1}$, $h_{4.2}$ – энтальпия воды до и после смешения.

$$D_{VI.1}(h'_{VI} - h_{4.2}) = (D_{VI.2} + D_{VII} + D_{VIII} + D_{IX} + D_K)(h_{4.2} - h_{4.1}) \quad (8.3)$$

где h'_{VI} – энтальпия конденсата VI регенеративного отбора пара.

9. Энергетический баланс подогревателя низкого давления № 3

$$D_{VI}(h_{VI} - h'_{VI}) + (D_{IV} + D_V)(h'_V - h'_{VI}) = (D_{VI.2} + D_{VII} + D_{VIII} + D_{IX} + D_K)(h_{4.1} - h_3) \quad (9)$$

где h_3 – энтальпия воды до подогревателя низкого давление № 3

10. Энергетический баланс подогревателя низкого давления № 3а

Перед подогревателем низкого давления имеет место процесс смешения

$$D_{VII}(h_{VII} - h'_{VII}) + D_{VI.2}(h'_{VI} - h'_{VII}) = (D_{VI.2} + D_{VII} + D_{VIII})(h_3 - h'_{VIII}) + (D_{IX} + D_K)(h_3 - h_{3a}) \quad (10)$$

h'_{VIII} –энтальпия конденсата VII регенеративного отбора пара.[3].

11. Энергетический баланс подогревателя низкого давления № 2

$$D_{VIII}(h_{VIII} - h'_{VIII}) + (D_{VI.2} + D_{VII})(h'_{VII} - h'_{VIII}) = (D_{IX} + D_K)(h_{3a} - h_2) \quad (11)$$

где h'_{VIII} – энтальпия конденсата VIII регенеративного отбора пара.

12. Энергетический баланс подогревателя низкого давления № 1

$$D_{IX}(h_{IX} - h'_{IX}) = (D_{IX} + D_K)(h_2 - h'_K) \quad (12)$$

где h'_{IX} – энтальпия конденсата IX регенеративного отбора, h'_K – энтальпия воды из конденсатора.

13. Количество тепла отданного парогенератором (ПГ) и пароперегревателем (ПП)

$$Q = D_0(h_{\text{ПГ}} - h_{0.\text{ПГ}}) + (D_0 - D_I - D_{II})(h_{\text{ПП}} - h_{II}) \quad (13)$$

Составленные алгебраические уравнения (1) – (12) представляет систему n = 15 линейных алгебраических уравнений с n = 15 неизвестными. Совокупность вектора неизвестных и их коэффициентовзаписано в виде таблицы. Данная таблица коэффициентов 15^2 элементов состоящая n строк и n столбцов, называемой квадратной матрицей порядка n [4].

$$
\begin{array}{cccccccccccccc}
D_0 & D_I & D_{II} & D_{III} & D_{III.1} & D_{III.2} & D_{IV} & D_V & D_{VI} & D_{VI.1} & D_{VI.2} & D_{VII} & D_{VIII} & D_{IX} & D_K \\
-1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
0 & h_{\Pi\Gamma}-h_I & h_{\Pi\Gamma}-h_{II} & \begin{array}{c} h_{\Pi\Gamma}-h_{II}+ \\ h_{\Pi\Pi}-h_{III} \end{array} & 0 & 0 & \begin{array}{c} h_{\Pi\Gamma}-h_{II}+ \\ h_{\Pi\Pi}-h_{IV} \end{array} & \begin{array}{c} h_{\Pi\Gamma}-h_{II}+ \\ h_{\Pi\Pi}-h_{V} \end{array} & \begin{array}{c} h_{\Pi\Gamma}-h_{II}+ \\ h_{\Pi\Pi}-h_{VI} \end{array} & 0 & 0 & \begin{array}{c} h_{\Pi\Gamma}-h_{II}+ \\ h_{\Pi\Pi}-h_{VII} \end{array} & \begin{array}{c} h_{\Pi\Gamma}-h_{II}+ \\ h_{\Pi\Pi}-h_{VIII} \end{array} & \begin{array}{c} h_{\Pi\Gamma}-h_{II}+ \\ h_{\Pi\Pi}-h_{IX} \end{array} & \begin{array}{c} h_{\Pi\Gamma}-h_{II}+ \\ h_{\Pi\Pi}-h_{K} \end{array} \\
-(h_0-h_8) & h_I-h_I' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-(h_8-h_7) & h_I'-h_{II}' & h_{II}-h_{II}' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-(h_7-h_6) & h_{II}'-h_{III}' & h_{II}'-h_{III}' & 0 & h_{III}-h_{III}' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-h_6 & h_{III}' & h_{III}' & 0 & h_{III}' & h_{III} & h_{0.д} & h_{0.д} & h_{0.д} & 0 & 0 & h_{0.д} & h_{0.д} & h_{0.д} & h_{0.д} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \begin{array}{c} h_{IV}-h_{IV}' \\ -(h_{0.д}-h_5) \end{array} & h_{0.д}-h_5 & h_{0.д}-h_5 & 0 & 0 & h_{0.д}-h_5 & h_{0.д}-h_5 & h_{0.д}-h_5 & h_{0.д}-h_5 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \begin{array}{c} h_{IV}'-h_V \\ -(h_5-h_{4.2}) \end{array} & \begin{array}{c} h_V-h_V' \\ -(h_5-h_{4.2}) \end{array} & -(h_5-h_{4.2}) & 0 & 0 & -(h_5-h_{4.2}) & -(h_5-h_{4.2}) & -(h_5-h_{4.2}) & -(h_5-h_{4.2}) \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_{VI}'-h_{4.2} & h_{4.2}-h_{4.1} & h_{4.2}-h_{4.1} & h_{4.2}-h_{4.1} & h_{4.2}-h_{4.1} & h_{4.2}-h_{4.1} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_V'-h_{VI}' & h_V'-h_{VI}' & h_{VI}-h_{VI}' & 0 & h_{4.1}-h_3 & h_{4.1}-h_3 & h_{4.1}-h_3 & h_{4.1}-h_3 & h_{4.1}-h_3 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \begin{array}{c} h_{VI}'-h_{VII}' \\ -(h_3-h_{VIII}') \end{array} & \begin{array}{c} h_{VII}-h_{VII}' \\ -(h_3-h_{VIII}') \end{array} & -(h_3-h_{VIII}') & -(h_3-h_{3a}) & -(h_3-h_{3a}) \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_{VII}'-h_{VIII}' & h_{VII}'-h_{VIII}' & h_{VIII}-h_{VIII}' & -(h_{3a}-h_2) & -(h_{3a}-h_2) \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \begin{array}{c} h_{IX}-h_{IX}' \\ -(h_2-h_K') \end{array} & -(h_2-h_K') \\
\end{array}
\qquad (14)
$$

Используя понятие матрицы А, совокупность составленных алгебраических уравнений (1) – (12) можно записать в матричном виде AD = B, где D - вектор неизвестных, B – вектор свободных членов,который равен нулю, кроме второго члена $B[2]=N_{эл}$.

Выводы

Построена общая математическая модель паротурбинной установки К 300-240-2 с последующим её решения, системы линейных арифметических уравнений, методом Гаусса. В качестве примера расчета взяты параметры максимального режима $N_{эл}^{макс}=319$ МВт .

Можно с полным основанием утверждать, что решение линейных систем является одной из самых распространённых и важных задач вычислительной математики.

Математическая модель и её решение имеет возможность модификации параметров и мощности в зависимости от номинального функционального состояния, изменения энергетических потоков путём внесения изменений в балансы отделных компонент паротурбинной установки (подогреватель низкого давления № 1 может быть отключён, что приводит к необходимости уменьшения порядка матрицы) [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паровая турбина К-300-240 ХТГЗ / Под общей ред. Ю.Ф. Косяка –М.: Энергоиздат, 1982. – 272 с. ил.

2. Справочное пособие теплоэнергетика электрических станций. / А. М. Леонков, Н. П. Волков, Б. В. Яковлев и др. –Минск.: Беларусь, 1974. – 368 с.

3. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 424 с., ил.

4. Турчак Л.И. Основы численных методов. Учеб. пособие. –М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. Лит., 1987. – 320 с.

5. Sergiu Solonari, ModeleMatematice, Chişinău: Editura TEHNICA-INFO, 2013. – 46 p. ISBN 978-9975-63-353-6.

УДК 66.048.3 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-98-102

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ С ТАРЕЛКАМИ ИЗ ВЫСОКОПОРИСТОГО ПРОНИЦАЕМОГО ЯЧЕИСТОГО МАТЕРИАЛА
MODELING THE OPERATION OF A RECTIFICATION COLUMN WITH TRAYS MADE OF HIGHLY POROUS PERMEABLE CELLULAR MATERIAL

Васильев Пётр Сергеевич, Тишина Полина Владимировна
Pyotr S. Vasilyev, Pauline V. Tishina

Волгоградский государственный технический университет, Россия, Волгоград
Volgograd State Technical University
(e-mail: nestorvv@mail.ru, polina.tishina.1997@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены основные особенности выполнения технологического расчёта ректификационных колонн с контактными устройствами из высокопористого проницаемого ячеистого материала. Приведены результаты модельных расчётов процесса ректификации смеси этанол – вода.

Abstract: The main features of performing the technological calculation of rectification columns with contact devices made of highly porous permeable cellular material are considered. The results of model calculations of the process of rectification of an ethanol – water mixture are presented.

Ключевые слова: ректификация, контактное устройство, высокопористый проницаемый ячеистым материал.

Keywords: rectification, contact device, highly porous permeable cellular material.

В настоящее время проявляется значительный интерес к контактным устройствам (КУ) колонных тепломассообменных аппаратов, насадочным [1-3] и тарельчатым [4-6], частично или полностью изготовленным из высокопористых проницаемых ячеистых материалов (ВПЯМ) – пенопластов и губчатых резин, обладающих большей удельной поверхностью и меньшим гидравлическим сопротивлением [1].

Изготовление КУ из ВПЯМ не представляет технологических трудностей, поэтому область их практического применения включает в себя различные тепломассообменные и биореакционные процессы [2].

По своим эксплуатационным свойствам они не уступают КУ из других материалов. Например, изменяя состав резиновых смесей при введении в них различных каучуков и термопластичных материалов, можно добиться получения губчатых резин с заданными свойствами. Так введение полиметилсилоксанового каучука с винильными группами (СКТВ-1) позволяет получить губчатую резину с температурой эксплуатации от -55 °С до +250 °С [1].

Выполнение технологического расчёта насадочного тепломассообменного аппарата с насадкой из ВПЯМ не составляет трудностей, если известны её основные характеристики – порозность и удельная поверхность. Последние можно легко определить по методике [2]. В случае же тепломассообменного аппарата с тарельчатыми КУ из ВПЯМ, каждая из которых по сути представляет собой отдельный слой насадки (аналогично [4]), традиционные расчётные методики не применимы.

В связи с этим разработка математического подхода к расчёту тепломассообменных аппаратов с тарельчатыми КУ из ВПЯМ является актуальной задачей и представляет собой цель настоящей работы.

В качестве объекта математического моделирования был выбран один из самых энергозатратных тепломассообменных процессов – ректификация.

Предлагаемый авторами подход основывается на равенстве числа действительных тарелок ректификационной колонны с числом единиц переноса в её насадочной части (ВПЯМ). Ниже приведены основные математические выкладки.

Минимальное флегмовое число определяют по формуле [7, 8]:

$$R_{min} = \frac{x_D - y_F^*}{y_F^* - x_F}, \quad (1)$$

где x_F – концентрация легколетучего компонента в исходной смеси, кмоль/кмоль см.;

x_D – концентрация легколетучего компонента в дистилляте, кмоль/кмоль см.;

y_F^* – равновесная концентрация в паре, соответствующая исходной смеси, кмоль/кмоль см.

Рабочее флегмовое число R определяют из условия минимизации объёма колонны, т. е. определяют минимум функции $R = f\left[N_T \cdot (R+1)\right]$, где N_T – число теоретических тарелок в колонне, определённое по диаграмме фазового равновесия в координатах $y = f(x)$.

Число единиц переноса в исчерпывающей и укрепляющей частях колонны рассчитывают по уравнению:

$$n_{0y} = \int_{y_н}^{y_к} \frac{dy}{y^* - y}, \quad (2)$$

для исчерпывающей части $y_н = y_W$ и $y_к = y_F$, для укрепляющей – $y_н = y_F$ и $y_к = y_D$.

Значение среднего КПД по Мэрфри для исчерпывающей и укрепляющей частей колонны рассчитывают по уравнению [7]:

$$E_y = 1 - \exp(-n_{0y}). \quad (3)$$

Число действительных тарелок в исчерпывающей и укрепляющей частях колонны определяют по формуле:

$$N_Д = \frac{N_T}{E_y}. \quad (4)$$

Высоту насадочной части (ВПЯМ) колонны в её исчерпывающей и укрепляющей частях определяют по формуле [8]:

$$H_H = \frac{w_{ОПТ} \cdot n_{0y}}{K_{YV}}, \quad (5)$$

где $w_{ОПТ}$ – скорость пара, соответствующая оптимальному режиму работы насадочной колонны (составляет примерно 80% от скорости захлёбывания), м/с:

$$w_{ОПТ} = \frac{Re_y \cdot \mu_y}{d_Э \cdot \rho_y}, \quad (6)$$

$Re_y = 0{,}045 \cdot Ar^{0{,}57} \cdot \left(\frac{G}{L}\right)^{0{,}43}$ – критерий Рейнольдса для пара;

$Ar = \frac{g \cdot d_Э^3 \cdot \rho_x \cdot \rho_y}{\mu_y^2}$ – критерий Архимеда; G – средний массовый расход пара, кг/с;

L – средний массовый расход жидкости, кг/с; $d_Э$ – эквивалентный диаметр пор ВПЯМ, м;

ρ_x – средняя плотность жидкости, кг/м^3; ρ_y – средняя плотность пара, кг/м^3; μ_y – средняя вязкость пара, Па·с;

K_{YV} – объёмный коэффициент массопередачи, с$^{-1}$:

$$K_{YV} = \frac{Nu' \cdot D_y}{d_Э^2}, \quad (7)$$

$Nu' = 0{,}035 \cdot Re_y^{0,8} \cdot Pr_y'^{0,3}$ – диффузионный критерий Нуссельта;

$Pr_y' = \frac{\mu_y}{\rho_y \cdot D_y}$ – диффузионный критерий Прандтля; D_y – коэффициент диффузии пара, м^2/с.

Толщину слоя ВПЯМ одной тарелки исчерпывающей и укрепляющей частей колонны определяют следующим образом:

$$h_T = \frac{H_H}{N_Д}. \quad (8)$$

Гидравлическое сопротивление сухого слоя ВПЯМ одной тарелки исчерпывающей и укрепляющей частей колонны традиционно определяют по уравнению Дарси-Вейсбаха [7, 8], при этом коэффициент трения рассчитывают по формуле [1]:

$$\lambda = \frac{160}{Re_y}. \quad (9)$$

Предложенный алгоритм был использован при выполнении модельного расчёта ректификационной колонны с тарельчатыми КУ из ВПЯМ для разделения смеси этанол – вода на производительность по азеотропной смеси. Исходные данные к расчёту приведены в таблице 1.

Диаграмма фазового равновесия смеси этанол – вода в координатах $y = f(x)$ приведена на рисунке 1 [9].

Таблица 1 – Исходные данные для выполнения технологического расчёта ректификационной колонны с тарельчатыми КУ из ВПЯМ для разделения смеси этанол – вода

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	Производительность по исходной смеси	кг/ч	G_F	10000
2	Концентрация легколетучего компонента в исходной смеси	кг/кг см.	$\overline{x_F}$	0,25
3	Концентрация легколетучего компонента в дистилляте	кг/кг см.	$\overline{x_D}$	0,95
4	Концентрация легколетучего компонента в кубовом остатке	кг/кг см.	$\overline{x_W}$	0,95
5	Абсолютное давление в колонне	МПа	P	0,10
6	Порозность ВПЯМ	м^2/м^3	ε	0,75
7	Удельная поверхность ВПЯМ	м^3/м^3	σ	900

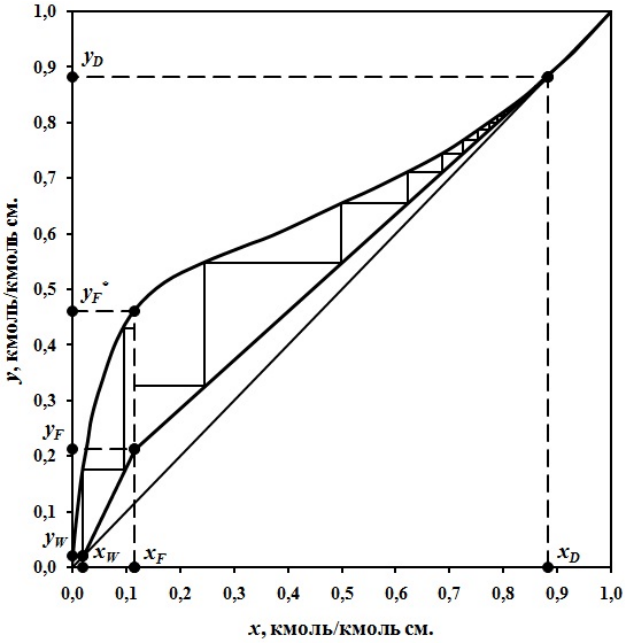


Рисунок 1 – Диаграмма фазового равновесия смеси этанол – вода в координатах $y = f(x)$ [9] с указанием теоретических тарелок в исчерпывающей $N_{T,исч}$ и укрепляющей $N_{T,укр}$ частях ректификационной колонны

Таблица 2 – Основные результаты технологического расчёта ректификационной колонны с тарельчатыми КУ из ВПЯМ для разделения смеси этанол – вода

№ п/п	Наименование параметра	Размер-ность	Обозна-чение	Вели-чина
1	Минимальное флегмовое число	-	R_{min}	4,43
2	Рабочее флегмовое число	-	R	6,87
3	Число теоретических тарелок в исчерпывающей части колонны	-	$N_{T,исч}$	1,15
4	Число теоретических тарелок в укрепляющей части колонны	-	$N_{T,укр}$	28,68
5	Число единиц переноса в исчерпывающей части колонны	-	$n_{0y,исч}$	0,83
6	Число единиц переноса в укрепляющей части колонны	-	$n_{0y,укр}$	36,79
7	Средний КПД по Мэрфри для исчерпывающей части колонны	-	$E_{y,исч}$	0,56
8	Средний КПД по Мэрфри для укрепляющей части колонны	-	$E_{y,укр}$	1,00
9	Число действительных тарелок в исчерпывающей части колонны	-	$N_{Д,исч}$	3
10	Число действительных тарелок в укрепляющей части колонны	-	$N_{Д,укр}$	29
11	Высота насадочной части (ВПЯМ) в исчерпывающей части колонны	м	$H_{Н,исч}$	0,19
12	Высота насадочной части (ВПЯМ) в укрепляющей части колонны	м	$H_{Н,укр}$	6,54
13	Толщина слоя ВПЯМ одной тарелки исчерпывающей части колонны	м	$h_{T,исч}$	0,06
14	Толщина слоя ВПЯМ одной тарелки исчерпывающей части колонны	м	$h_{T,укр}$	0,23
15	Принятый стандартный диаметр колонны	м	D	2,6
16	Общая высота колонны	м	H	23
17	Полное гидравлическое сопротивление колоны	Па	ΔP	4150

Основные результаты модельного расчёта приведены в таблице 2.

Дополнительно по тем же исходным данным были выполнены два сравнительных технологических расчёта ректификационных колонн для разделения смеси этанол – вода:

1) насадочной (металлические кольца Рашига размером 10×10×0,5 мм), имеющей следующие параметры: $D = 3{,}8$ м, $H = 30$ м, $\Delta P = 5000$ Па;

2) тарельчатой (сетчатые тарелки с диаметром отверстий 8 мм), имеющей следующие параметры: $D = 1{,}8$ м, $H = 18$ м, $\Delta P = 4600$ Па.

Выводы

Таким образом, разработанный математический подход позволяет вести инженерное проектирование тепломассообменных аппаратов с тарельчатыми КУ из ВПЯМ, которые при прочих равных условиях обладают наименьшим гидравлическим сопротивлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голованчиков А.Б.*, *Шагарова А.А.*, *Васильев П.С.*, *Чёрикова К.В.* Porous Plastic Packing for Heat and Mass Transfer Processes // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 53. Is. 11-12. P. 759-764.

2. *Васильев П.С.*, *Рева Л.С.*, *Шагарова А.А.* Метод расчёта основных геометрических характеристик насадок из пропластовых материалов // Химическая технология. 2019. Т. 20. № 9. С. 429-432.

3. *Голованчиков А.Б.*, *Васильев П.С.*, *Дулькина Н.А.*, *Агеева Т.Б.*, *Разуваев В.В.*, *Закурский В.Я.* Насадка для массообменного аппарата. Патент на полезную модель № 131311. Кл. МПК-2006.01:B01J19/00. 20.08.2013.

4. *Голованчиков А.Б.*, *Васильев П.С.*, *Рева С.Л.*, *Рева Л.С.*, *Юдина А.С.*, *Альменова А.Е.* Массообменная тарелка. Патент на полезную модель № 135522. Кл. МПК-2006.01:B01D3/00. 20.12.2013.

5. *Васильев П.С.*, *Голованчиков А.Б.*, *Рева С.Л.*, *Рева Л.С.*, *Чёрикова К.В.*, *Максимов А.А.* Клапанная тарелка. Патент на полезную модель № 143613. Кл. МПК-2006.01:B01D3/22. опубл. 27.07.2014.

6. *Васильев П.С.*, *Голованчиков А.Б.*, *Рева С.Л.*, *Рева Л.С.*, *Чёрикова К.В.*, *Железникова В.Д.* Клапанная тарелка. Патент на полезную модель № 158005. Кл. МПК-2006.01:B01D3/00. 20.12.2015.

7. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Альянс. 2008. 750 с.

8. Справочник химика. Т. 5 / гл. ред. Б.П. Никольский. Л.; М.: Химия. 1966. 976 с.

9. *Коган В.Б.*, *Фридман В.М.*, *Кафаров В.В.* Равновесие между жидкостью и паром. Кн. 1. М.; Л.: Наука. 1966. 640 с.

УДК 536.24:621.365.5:625.717 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-103-105

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-НАГРЕВА ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИОННОГО ШВА
MODELING OF MICROWAVE HEATING OF MATERIALS-FILLERS OF EXPANSION JOINTS

Дорняк Ольга Роальдовна*, Недоносков Александр Борисович**
Olga R. Dornyak*, Alexander B. Nedonoskov **

**Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Россия, Воронеж*
**Voronezh state forestry engineering University named after G. F. Morozov, Russia, Voronezh (e-mail: ordornyak@mail.ru)*
***ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, г. Воронеж*
***VUNC VVS "VVA named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Russia, Voronezh*

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности диэлектрического нагрева деформационного шва с учетом различия тепло- и электрофизических свойств материалов-наполнителей.

Abstract: Some features of the dielectric heating of the expansion joint are considered, taking into account the differences in the thermal and electrophysical properties of the filler materials.

Ключевые слова: аэродромные покрытия, СВЧ-нагрев, математическое моделирование.
Keywords: expansion joint, microwave heating, mathematical modeling.

Эксплуатация жестких аэродромных покрытий приводит к появлению повреждений различного типа, локализация которых имеет место, в том числе, в деформационных швах. Совершенствование технологий ремонта деформационных швов, направленное на снижение их трудоемкости, является актуальной задачей. Одним из эффективных методов поддержки рабочего состояния деформационных швов является профилактическая термообработка герметизирующего материала шва с использованием специальной СВЧ-установки. Интенсивный нагрев герметизирующего материала приводит его в текучее состояние, способствующее "залечиванию" мелких дефектов. В данной работе проведено моделирование процесса диэлектрического нагрева трехслойного деформационного шва с целью выбора тех режимных параметров, которые обеспечат восстановление повреждений герметика.

Деформационный шов обычно имеет трехслойную структуру, его поперечное сечение показано на рисунке 1. Нижний слой - уплотненный песок, над ним - жгут из вспененного полиэтилена или пористой резины, верхний слой – битум или полимерно-битумная мастика. Волновод перемещаются вдоль шва со скоростью V. Величина скорости должна, с одной стороны, обеспечить прогрев битума до текучего состояния (~145ºС), с другой стороны, не допустить перегрева битума до температуры вспышки (~220ºС), который будет способствовать его ускоренной термодеструкции. Важно выяснить, насколько долго удержится жидкотекучее состояние битумного заполнителя, обеспечивающее результативность процесса заплывания дефектов, а также не будет ли термоповреждений жгута, способного лишь кратковременно выдержать температуру около 100ºС.

Математическая модель СВЧ-нагрева деформационного шва предполагает, что СВЧ-генератор создает равномерное излучение, перпендикулярное нагреваемой поверхности. Все материалы рассматриваются как гомогенные и изотропные. Электромагнитная волна в диэлектрике является затухающей по глубине.

Уравнение теплопроводности [1]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) + I_{mw} \quad (1)$$

учитывает удельную поглощенную мощность СВЧ-излучения I_{mw}, *Вт/м*^{3} [2]:

$$I_{mw} = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon \cdot tg\delta \cdot f\mathrm{E}^2, E = E_0 \exp(-D(h-z)); \; D = 2\pi / \lambda_{mw} \cdot tg\delta\sqrt{\varepsilon}. \quad (2)$$

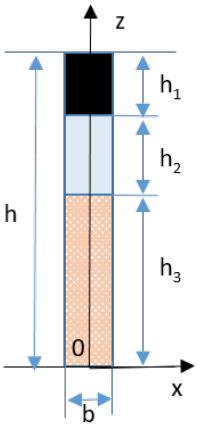


Рисунок 1 – Схема деформационного шва

где T – температура, *К*; t – время, *с*; x, y, z – декартовы координаты, *м*; ρ – плотность, *кг/м*^{3}; c_{p} – удельная теплоёмкость при постоянном давлении, *Дж/(кг·К)*; λ – коэффициент теплопроводности, *Вт/(м·К)*; ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала шва; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; f – частота излучения, *Гц*; E, E_0 – напряженность электрического поля, *В/м*; ε_0 – электрическая постоянная, *Ф/м*; D – показатель поглощения, *м*$^{-1}$; λ_{mw} – длина электромагнитной волны, *м*. В соответствие с рисунком 1 ось y направлена вдоль шва.

Область тепловыделения имеет размеры ($a \times b \times h$). Она смещается со скоростью V вдоль шва (a – длина участка облучения, b – ширина шва, h – высота трехслойного шва).

Начальное условие записано для однородного распределения температуры:

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

Совокупность граничных условий включает соотношения на поверхностях контакта шва и бетонных плит; на поверхности шва, контактирующего с окружающей средой; условия симметрии; уравнения идеального теплового контакта разнородных элементов шва:

$$-\lambda \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=b/2} = \alpha_1 \left(T\big|_{x=b/2} - T_\infty^{(1)}\right); \qquad \lambda \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=0} = \alpha_2 \left(T\big|_{z=0} - T_\infty^{(2)}\right); \quad (4)$$

$$-\lambda \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=h} = \alpha_c \left(T\big|_{z=h} - T_c\right) + \varepsilon_c \sigma_0 \left[T^4\big|_{z=h} - T_c^4\right]; \; \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} = 0, \; \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y\to\pm\infty} = 0; \quad (5)$$

$$T\big|_{z=h_3-0} = T\big|_{z=h_3+0}, T\big|_{z=h_3+h_2-0} = T\big|_{z=h_3+h_2+0}; \; q\big|_{z=h_3-0} = q\big|_{z=h_3+0}, q\big|_{z=h_3+h_2-0} = q\big|_{z=h_3+h_2+0}, \quad (6)$$

где $T_\infty^{(1)}$, $T_\infty^{(2)}$ – средняя температура бетонных плит вблизи боковых поверхностей шва и под деформационным швом, *К*; α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи, *Вт/(м*^{2}*·К)*; $q = -\lambda \partial T / \partial z$; σ_0 - постоянная Стефана-Больцмана *Вт/(м*^{2}*К*^{4}*)*; T_c – температура воздуха, *К*; α_c – коэффициент конвективной теплоотдачи, *Вт/(м*^{2}*·К)*; ε_c – степень черноты материала шва.

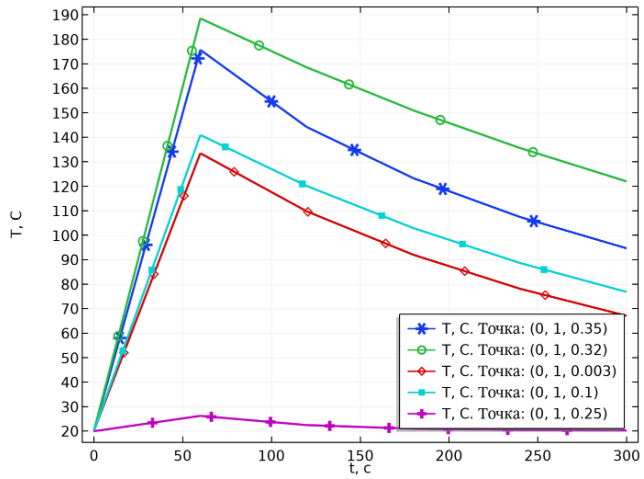


Рисунок 2 – Зависимость от времени значений температуры в трехслойном шве в точках с различной координатой z, м при V=0.02 *м/с*, f=915 МГц, E_0=1.45·10^5 *В/м*.

Нестационарная трехмерная математическая модель (1-6) исследована с помощью метода конечных элементов в универсальной среде численного моделирования COMSOL Multiphysics. Все теплофизические параметры являются постоянными [3]. Геометрические параметры шва следующие: b=10 *мм*; h_1=6 *мм*; h_2=9 *мм*; h_3=20*мм*. На рисунке 2 приведены расчетные зависимости температуры от времени в различных по высоте точках поперечного сечения деформационного шва (x=*0*, y=1*м*). Как видно из графиков, при выбранных режимных параметрах текучее состояние битума сохраняется в течение ~75 с. Температура жгута из вспененного полиэтилена остается низкой в среднем ~30ºС, слой песка нагревается, но менее значительно, чем битум – в среднем до ~140 ºС. Такое неоднородное распределение температуры связано с существенно различными тепло- и электрофизическими свойствами материалов шва.

Проведенное моделирование СВЧ-обработки деформационного шва аэродромного покрытия на основе представленной модели позволяет подобрать рациональные режимные параметры процесса, обеспечивающие выполнение требований технологии восстановления мелких дефектов битумного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1971. 324 с.
2. Нетушил А.В., Жуховицкий Б.Я, Кудин В.Н., Парини Е.П. Высокочастотный нагрев диэлектриков и проводников - М.: Госэнергоиздат, 1959. 480 с.
3. Дорняк О.Р., Недоносков А.Б. Способ термообработки деформационного шва аэродромного покрытия с использованием СВЧ-воздействия // Воздушно-космические силы. Теория и практика, 2021. № 17. С. 66-75. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45399718 (дата обращения 16.04.2021).

УДК 66.012+66.048.3 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-106-108

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ ПОЛУЧЕНИЯ АЗОТА
SIMULATION OF ENERGY-EFFICIENT MODES OF AIR SEPARATION IN A RECTIFICATION COLUMN FOR NITROGEN PRODUCTION

Слюсарев Михаил Иванович*, Ряжских Виктор Иванович,**
Богер Андрей Александрович*, Кокарев Александр Михайлович*
Mikhail I. Slyusarev*, Victor I. Ryazhskikh, Andrey A. Boger*, Alexander M. Kokarev***

**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж*
**Military Educational and Scientific Centre of The Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Russia, Voronezh*
(e-mail: slyusarev-mi@yandex.com, a-boger@yandex.ru, kokarev36@bk.ru)
***Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж*
***Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh*
(e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru)

Аннотация: Использованием динамической модели колонны получения азота газодобывающей станции ТКДС-100В показана возможность увеличения ее производительности при снижении рабочего давления в ректификационном аппарате. Натурные испытания воздухоразделительной установки показали энергоэффективность предложенного режима при обеспечении необходимого количества жидкости в кубе колонны.

Abstract: Using the dynamic model of the nitrogen production column of the ТКДС-100В gas production station, the possibility of increasing its productivity with a decrease in the working pressure in the rectifier is shown. Field tests of the air separation unit have shown the energy efficiency of the proposed mode while ensuring the required amount of liquid in the column bottom.

Ключевые слова: моделирование, динамическая модель, ректификация воздуха, получение азота, энергоэффективность.

Keywords: modeling, dynamic model, air rectification, nitrogen production, energy efficiency.

Ректификация является одним из основных методов разделения жидких смесей и характеризуется высоким удельным потреблением энергии. Энергосбережение при ректификации является необходимым условием реализации таких технологий, так как суммарное потребление энергии на осуществление процессов дистилляции достигает огромных величин. Так, например, в США на процессы ректификации приходилось около 3 % национального потребления энергии [1].

При производстве жидких продуктов разделения воздуха потребляемая энергия дополнительно расходуется не только на процесс разделения смеси газов на составляющие ее компоненты, но и на перевод их в конденсированное состояние с учетом того, что работа ожижения существенно выше работы разделения газов. Доля энергетических затрат в себестоимости продуктов разделения воздуха достигает 60 % [3]. В связи с этим рассмотрение вопросов, определяющих снижение удельных затрат на производство продукции, полученной с применением ректификационных процессов, является актуальной задачей.

Для получения жидкого азота в полевых условиях применяют газодобывающую станцию ТКДС-100В, в которой используют разрезной двухколонный аппарат с 22 ситчатыми тарелками, что обеспечивает выполнение требований по габаритам, предъявляемым к транспортабельным воздухоразделительным установкам (ВРУ) двойного назначения. Для компенсации повышенных теплопритоков в малогабаритных ВРУ и из-за получения

продуктов в жидком виде в установке использован комбинированный холодильный цикл высокого давления с детандером.

В [2-4] проведен энергетический анализ функционирования воздухоразделительных установок большой и средней производительности. В колонне получения азота станции ТКДС-100В тарелка питания отсутствует, а ввод дроссельного и детандерного потоков осуществляется под нижнюю тарелку. Данные по исследованию работы ректификационных колонн с такими отличительными особенностями ограничены. В [5] отмечена недостаточная производительность станции ТКДС-100В по жидкому азоту, поэтому идентификация условий увеличения производства жидкого азота при обеспечении одновременного снижения удельных энергозатрат является целью работы.

Так как экспериментальное изучение энергопотребления при работе мобильных ВРУ затруднено из-за высоких материальных и энергетических затрат, в настоящем исследовании применен метод математического моделирования. В работе использована описанная в [6,7] вместе с системой принятых упрощающих допущений динамическая модель колонны получения азота станции ТКДС-100В, которая методом установления [8] позволяет получить статические характеристики процесса ректификации. Математическую модель ректификации воздуха, представляющую собой систему нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений, решали численными методами с использованием вычислительной среды MatLab/Simulink.

Анализ энергосбережения при ректификации воздуха показал, что повышение эффективности работы газодобывающей станции ТКДС-100В на азотном жидкостном режиме целесообразно осуществлять минимизацией концентрационных напоров за счет уменьшения орошения колонны, которое можно реализовать увеличением отбора дистиллята.

Минимизировать потери от необратимости процесса теплопередачи в конденсаторе-испарителе азотной колонны при имеющемся запасе теплообменной поверхности можно уменьшением рабочего давления процесса ректификации, что не только снижает температурный напор, но и повышает относительную летучесть компонентов воздуха. Возможное увеличение при этом производительности колонны сопровождается изменением плотности паровой смеси, температуры и других взаимосвязанных параметров процесса ректификации и требует дополнительного изучения.

Для исследования влияния производительности колонны по жидкому продукту на концентрацию в нем азота при различных значениях давления в процессе разделения воздуха был проведен вычислительный эксперимент (рисунок 1), в котором использовали значения основных входных параметров модели, соответствующие Руководству по эксплуатации ВРУ: расход воздуха B =0,005684 кмоль/с; манометрическое давление в колонне P_0 = 0,4–0,6 МПа; температура воздуха на входе в испаритель $T_н$ =143 К; давление воздуха $P_н$ =20 МПа; доля детандерного потока z =0,5; диаметр колонны – 0,35 м; тип тарелок – ситчатые.

Анализ показывает, что в колонне с 20 тарелками снижение давления улучшает условия разделения воздуха на компоненты. Установлено, что чистота продукционного азота при давлении 0,6 МПа начинает резко падать, начиная с доли отбора продукта 0,25 кмоль/кмоль воздуха и выше. При давлении 0,4 МПа существенное снижение чистоты азота наблюдается, начиная с доли отбора продукта 0,3 кмоль/кмоль воздуха и выше, что позволяет увеличить до 20 % отбор продукционного азота требуемого качества и снизить расход энергии на 1 кг жидкого азота.

Для проверки результатов моделирования, свидетельствующих о возможности повышения производительности ВРУ по жидкому азоту при снижении давления процесса ректификации, были проведены натурные испытания газодобывающей станции ТКДС-100В.

Эксперимент показал, что рекомендуемый Руководством по эксплуатации уровень кубовой жидкости 200–260 мм по шкале штатного уровнемера не обеспечивает стабильной работы ВРУ. В связи с этим для стабилизации процесса разделения воздуха при давлении в колонне 0,56 МПа в соответствии с [6] количество кубовой жидкости было увеличено и составило в среднем 388 мм по шкале уровнемера.

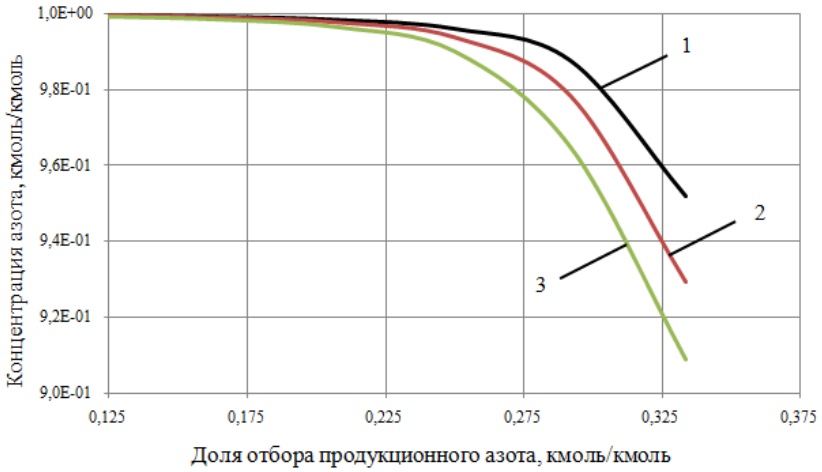


Рисунок 1 – Чистота продукционного азота при давлении в колонне:
1 – 0,4 МПа, 2 – 0,5 МПа, 3 – 0,6 МПа

Производительность газодобывающей станции при этом была равна 60,9 кг жидкого азота в час, а удельные энергозатраты составили 3,07 кВт·ч/кг азота. Из-за наличия взаимных нелинейных связей между величинами, характеризующими процесс ректификации, поддержание уровня жидкости в кубе колонны при изменении давления оказалось невозможным. Поэтому при снижении давления в колонне до 0,37 МПа уровень кубовой жидкости был в среднем равен 490 мм по шкале прибора, а увеличение производительности ректификационной колонны получения азота при этом достигло 36,1 %, что привело к снижению удельных затрат энергии на 18,2 %.

Выводы

Энергоэффективные режимы функционирования колонны получения азота станции ТКДС-100В могут быть реализованы снижением рабочего давления в ректификационном аппарате до минимально возможного значения, определяемого запасом теплопередающей поверхности конденсатора-испарителя, при повышенном по сравнению с рекомендациями Руководства по эксплуатации количестве кубовой жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Основы конструирования и проектирования промышленных аппаратов. М.: Химия, 1997. 364 с.

2. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы. В 2 т. Т.1. Основы теории и расчета. М.: Машиностроение, 1996. 576 с.

3. Криогенные системы. В 2 т. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем / А.М. Архаров [и др.]. М.: Машиностроение, 1999. 719 с.

4. Наринский Г.Б. Ректификация воздуха. М.: Машиностроение, 1978. 248 с.

5. Кокарев А.М., Гунин А.Л., Слюсарев М.И. Анализ работы воздухоразделительной установки ТКДС – 100В в режиме получения жидкого азота // Авиакосмические технологии (АКТ-2017): Труды XVIII Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж: ООО Фирма «Элист», 2017. С. 167-172.

6. Ряжских В.И., Кокарев А.М., Слюсарев М.И. Стабилизация функционирования воздухоразделительной установки малой производительности в азотном режиме // Труды Академэнерго. 2019. №3. С. 52-70.

7. Ряжских В.И., Кокарев А.М., Слюсарев М.И. Стабилизация давления в ректификационной колонне транспортабельной газодобывающей станции при получении азота // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т.19. №3. С. 5-12.

8. Kender R. [et al.]. Pressure-driven dynamic simulation of distillation columns in air separation units // Chemical Engineering Transactions. 2018. V.69. P. 271-276.

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-109-112

МОДЕЛЬНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛОНОВ
MODEL AND EXPERIMENTAL TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF CYCLONES

Белоусов Александр Сергеевич, Абрамин Владислав Юрьевич
Alexander S. Belousov, Wladislav Iu. Abramin

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(as.belousov-2@yandex.ru)

Аннотация: Исследованы различные уровни моделей технологической характеристики циклонов. Показаны возможности вычислительной гидродинамики и полуэмпирических моделей. Установлена наиболее адекватная модель для типовых циклонов.

Abstract: Various levels of models of technological characteristics of cyclones are investigated. The capabilities of computational fluid dynamics and semi-empirical models are shown. The most adequate model for typical cyclones has been established.

Ключевые слова: модели эффективности циклонов, турбулентность, фракционное улавливание.

Keywords: cyclone efficiency models, turbulence, fractional capture.

В настоящее время исследования процессов пылеулавливания в циклонах ведутся как на основе численных методов, так и помощью моделей, опирающихся на экспериментальные данные [1-3]. Вихревые течения, аналогичные циклонным, используются также для решения ряда других технологических задач: процессов в камерах сгорания, сушилках, вихревых горелках, устройствах вихревого прядения и т.п.

В данной работе рассматриваются возможности расчета основных технологических характеристик циклонного процесса, как в рамках вычислительной трехмерной гидродинамики, так и на основе полуэмпирических моделей. Анализ моделей опирается на специализированные лабораторные эксперименты, и на полупромышленные опыты, проводимые по отработанной единой методике [3-4].

Течение турбулентных закрученных потоков полидисперсной газовзвеси внутри аппаратов представляет собой систему со сложным внутренним строением, большим числом элементов и взаимосвязей. Для этих аппаратов характерна высокая чувствительность технологических характеристик к значениям режимно-конструктивных параметров, поэтому расчет макрогидродинамики должен быть достаточно точным. При малом содержании плотной фазы расстояние между частицами велико по сравнению с их размерами, поэтому можно не учитывать влияние твердой фазы на газовую. В этом случае можно пренебречь взаимодействием частиц между собой и рассматривать Эйлеро-Лагранжеву модель одностороннего взаимодействия: исследование газовой фазы проводится отдельно, в системе Эйлеровых координат, а затем рассматривается движение частиц в полученном поле скоростей газа.

Рассмотрим сначала особенности моделирования плотной фазы. В вихревых аппаратах, как и в большинстве химико-технологических аппаратов, особенностью процессов является детерминированно-стохастический характер. Распределение частиц по траекториям обусловливается неравномерностью профилей скоростей, турбулизацией потоков, застойными и циркуляционными зонами, концевыми неравномерностями. Эти явления приближенно можно учесть в уравнениях движения частиц в виде стохастической

многомерной модели. Во втором варианте модели будут рассматриваться в приближенном и упрощенном виде, с корректировкой по экспериментальным данным.

Запишем общий вид уравнений трехмерного движения частиц в турбулентном потоке:

$$\frac{dW_z}{dt} = \frac{3}{4}\frac{\rho}{(\rho_p \cdot d)} C_d\left(\mathrm{Re}\left(\left|\vec{V}-\vec{W}\right|\right)\right)\cdot((V_z + V_z^{'}) - W_z) - g, \quad (1)$$

$$\frac{dW_r}{dt} = \frac{3}{4}\frac{\rho}{(\rho_p \cdot d)} C_d\left(\mathrm{Re}\left(\left|\vec{V}-\vec{W}\right|\right)\right)\cdot((V_r + V_r^{'}) - W_r) + \frac{W_\varphi^2}{r} \quad (2)$$

$$\frac{dW_\varphi}{dt} = \frac{3}{4}\frac{\rho}{(\rho_p \cdot d)} C_d\left(\mathrm{Re}\left(\left|\vec{V}-\vec{W}\right|\right)\right)\cdot((V_\varphi + V_\varphi^{'}) - W_\varphi) + 2\cdot\frac{\left(W_\varphi \cdot W_r\right)}{r}, \quad (3)$$

где (z,r,φ)- цилиндрические координаты; ρ, ρ_p - плотность соответственно газа и плотной фазы; C_d - параметр силы аэродинамического сопротивления; $W,V,V^{'}$ - скорость частиц, осредненная скорость сплошной среды и скорость турбулентных пульсаций.

Сначала оценим точность моделирования характеристик сплошной среды. В работах [5-7] был исследован ряд моделей турбулентности в сравнении с лазерными экспериментами для различных конструкций закрученных потоков. Рассмотрена типовая *k-ε* модель, которая описывает турбулентные напряжения в уравнениях Рейнольдса через кинетическую энергию турбулентности k и диссипацию турбулентности ε. В этой модели напряжения Рейнольдса рассчитываем на основе концепции эффективной вязкости:

$$-\sigma_{ij} = (\nu_t)\left(\frac{\partial\overline{V_i}}{\partial X_j} + \frac{\partial\overline{V_j}}{\partial X_i}\right) - \frac{2}{3}\cdot k\delta_{ij} \quad (4)$$

Модель ренормализированных групп с учетом вращения потока (RNG-S) имеет вид:

$$\begin{cases} U\dfrac{\partial k}{\partial x} + V\dfrac{\partial k}{\partial y} + W\dfrac{\partial k}{\partial z} = \dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{\partial k}{\partial y}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_k}\right) + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{\partial k}{\partial z}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_k}\right) + G - \varepsilon \\ U\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial y} + W\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial y}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial z}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) + c_1\cdot\varepsilon/k\cdot G - c_2\cdot\varepsilon^2/k + R_\varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

где U,V,W - вектора осредненных скоростей сплошной среды; k - энергии пульсаций, ε - скорость диссипации энергии турбулентности; $\mathrm{G_k}G$ - член, характеризующий генерацию энергии турбулентности под влиянием градиентов средних скоростей; R_ε - дополнительный член, учитывающий кривизну течения в RNG-S. Основные характеристики моделей напряжений Рейнольдса (RSM) и больших вихрей (LES) приведены в работе [8].

Анализ результатов этих работ показал, что даже с точки зрения адекватности только для осредненных скоростей, универсальной модели не существует. Оказалось, что для одного класса закрученных потоков, но для разных аппаратов, приходится подбирать разные модели турбулентности. В работе [5] наилучшие результаты для высоких степеней закрутки показала модель RSM, а *k-ε* модель оказалась нереалистична; для средних и малых закруток в работах [5,7] хорошие результаты получены для RNG-S модели; в работе [6] напротив модель RSM дала нереалистичные результаты, а модель *k-ε* показала лучшее согласие с экспериментом для конструкции с одним входным патрубком; для конструкции с двумя входными патрубками лучше результаты были у модели LES, но они потребовали очень большого времени расчета и специальной схемы численного моделирования. Для основного важного показателя турбулентности - кинетической энергии, все модели показали результаты сильно отличные от эксперимента. Результаты отличались в 2-3 раза, а в некоторых областях – даже на порядок. С учетом того, что пульсации входят непосредственно в уравнения движения частиц (1-3), неточности моделирования будут существенно влиять на расчет технологических характеристик аппаратов. Обзор, выполненный в работе [9] показал, что ошибка в

определении технологической характеристики $d_{\eta=50}$ для разных циклонов составляет около 50-60 %, что не обеспечивает точности расчета процесса разделения.

Имеются зарубежные полуэмпирические модели, в которых учитываются геометрические размеры конструкций [10]. Однако анализ, проведенный в работе [10], показал, что даже для наиболее известной модели Лайта и Лихта, в интервале входной скорости 5-15 м/с ошибка в определении $d_{\eta=50}$ составляет 40-50 %, что также недопустимо.

В России методы расчета рабочих параметров циклонов, основаны на критериальном подходе и экспериментальных константах, полученных в основном для типовых конструкций НИИОГАЗ. Параметры расчетных методов определены с помощью экспериментов на полупромышленных аппаратах, которые проводились по специально отработанной методике [3,4]. В этих работах система (1-3) упрощена до одномерного движения с учетом турбулентной диффузии, рассматриваемой как марковский случайный процесс.

Рассмотрим основную характеристику качества процесса разделения газовзвесей - фракционную эффективность улавливания. Фракционная эффективность η_{F_i} - это степень улавливания пыли i - той фракции

$$\eta_{F_i} = \frac{M_{Y_i}}{M_{in_i}} 100 \tag{6}$$

где M_{Y_i} и M_{in_i} – соответственно масса уловленных частиц i - той фракции и масса внесенных газами в аппарат частиц этой же фракции за одинаковое время. Анализ кривых фракционных эффективностей пылеуловителей [3,4,9] показывает, что фракционная эффективность хорошо описывается интегральной функцией логарифмически нормального распределения (ЛНР). В этом случае уравнение фракционной эффективности улавливания имеет вид

$$\eta(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lg\sigma_\eta} \int_{-\infty}^{\lg d} e^{-\left[\frac{(\lg d - \lg d_{\eta=50})^2}{2\lg^2\sigma_\eta}\right]} d\lg d \tag{7}$$

где параметр σ_η определяет дисперсию функции $\eta(d)$. Параметры $d_{\eta=50}$ и σ_η определены на полупромышленных моделях аппаратов НИИОГАЗ [3,4]. Пересчет данных на промышленные размеры геометрически подобного аппарата проводится по критерию Стокса.

В литературе представлены две полуэмпирические методики. Одна основана на автомодельном режиме движения частиц при высоких числах Рейнольдса [2], также на ЛНР и приводит к полуэмпирическому уравнению для параметра $d_{\eta=50}$:

$$d_{50} = 14.5 \cdot 10^5 \zeta^{-0.51} \sqrt{\frac{D\mu}{V_0 \rho_m}} \tag{8}$$

где ρ_m – плотность частиц, μ, V_0 – вязкость и скорость газа; D – диаметр аппарата.

Известен также полуэмпирический метод, основанный на минимизации энергозатрат в инерционных пылеуловителях [11]. Он реализован путем обобщения экспериментальных данных по фракционному коэффициенту проскока в виде экспоненциальных функций от числа Стокса:

$$K_\delta = C_{\delta-out} \Big/ C_{\delta-in} = e^{-a \cdot St^n} \tag{9}$$

Результаты расчетов характеристик по методу (9) и экспериментальные кривые фракционной эффективности представлены на рис.1.

Как видно из кривых фракционной эффективности на рис. 1 методика (9) видимо описывает характеристики только специализированных циклонов Кестнера и Давидсона, необходимые для отбора продуктовых фракций порошкообразных моющих средств [3].

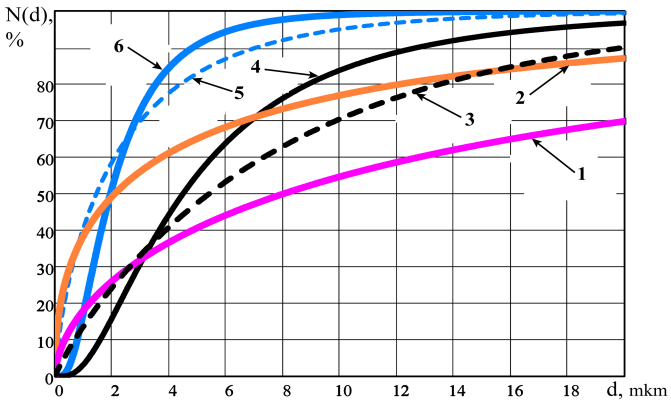


Рисунок 1 – Характеристики фракционной эффективности циклонов:
1 – Давидсона;
2 – Кестнера;
3 – ЦН-15 по уравнению (9);
4 – ЦН-15 эксперимент;
5 – СКЦН-34 по уравнению (9);
6 – СКЦН-34 эксперимент.

Описание фракционных характеристик циклонов НИИОГАЗ, с помощью этой методики весьма приблизительно (в частности для ЦН-15 ошибка по $d_{\eta=50}$ составляет 20 %, а по параметру σ_η - 62 %). В методике (8) для циклонов НИИОГАЗ параметр σ_η принимается равным экспериментальному, а средняя ошибка по $d_{\eta=50}$ составляет 9,5 % (для ЦН-15 -5,6 %). Таким образом, достаточно надежные данные и методика расчета имеется в основном для группы аппаратов НИИОГАЗ. Для новых циклонов желательно проведение специализированных экспериментов, и разработка точных методик расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hoffmann A.C., Stein L.E. Gas Cyclones and Swirl Tubes. Berlin Heidelberg New York: Springer. 2008. 422 P.

2. Вальдберг А.Ю. Современные тенденции в развитии теории и практики пылеулавливания //Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2007. №7. С.48-50.

3. Коузов П. А. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности / П. А. Коузов, А. Д. Мальгин, Г. М. Скрябин. - 2-е изд., переработ. и доп. СПб.: Химия, 1993. 320 с.

4. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под общ. ред. Русанова А.А. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

5. Абрамин В.Ю., Овсянников Д.А., Белоусов А.С. Моделирование течений газа в вихревом аппарате с обратным конусом// Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности (ИНТЕКС-2019): сборник материалов Международной научной студенческой конференции. Часть 3. М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2019. С. 157-160.

6. Hreiz R., Gentric C., Midoux N. Numerical investigation of swirling flow in cylindrical cyclones //Chemical Engineering Research and Design, 2011, V. 89, №12, P. 2521-2539.

7. Escue, A., Cui, J., 2010. Comparison of turbulence models in simulating swirling pipe flows //Applied Mathematical Modelling, V. 34, P. 2840–2849.

8. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Балт. гос. Техн. ун-т, 2001. 108 с.

9. Белоусов А.С., Казачек В.Г. Системный подход к моделированию пылеулавливания в вихревых и циклонных аппаратах // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского. Т. 2. М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2016. С. 274-278.

10. Altmeyer S., Mathieu V., Jullemier S., Contal P., Midoux N., Rode S., Leclerc J.-P. Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software. //Chemical Engineering and Processing, 2004, V. 43, P. 511-522.

11. Шиляев М.И., Шиляев А.М.,. Гормолысова И.В., Оленев И.Б. К фракционному методу расчета инерционных пылеуловителей // Известия вузов. Строительство. 2006. № 1. С. 62–67.

УДК 665.6 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-113-117

НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКЦИИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ
A NEW APPROACH FOR DETERMINATION OF REACTION PARAMETERS OF THE LIQUID HYDROCARBON THERMAL DECOMPOSITION

Малько Михаил Владимирович*, Василевич Сергей Владимирович, Митрофанов Андрей Василевич***, Шпейнова Наталия Сергеевна*****
Mihail V. Mal'ko, Sergej V. Vasilevich, Andrey V. Mitrofanov, Natalia S. Shpeynova

**Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*
Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
(e-mail: mikhailvm@bas-net.by)
***Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь*
Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Belarus
(e-mail: svasilevich@yandex.ru)
****Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, Россия, Иваново*
****Ivanovo State Power Engineering University, Russia, Ivanovo*
(e-mail: and2mit@mail.ru; shpejnova@mail.ru)

Аннотация: На основе модификации метода Коутса-Редферна предложен новый подход к расчету кинетических параметров комплексного процесса термического разложения пиролизной смолы в неизотермических условиях.

Abstract: A new kinetic calculation approach for the complex process of the heavy tar thermal decomposition under non-isothermal conditions is proposed based on modification of Coats-Redfern method.

Ключевые слова: пиролиз, формальная кинетика, термогравиметрический анализ, пиролизные смолы, поддерживающая кривая.

Keywords: pyrolysis, formal kinetic, thermogravimetric analysis, tar, fitting curve.

Итоговая интенсивность гетерогенного термопреобразования твердых топлив (газификация, горение, пиролиз) зависит от скорости ряда последовательно-параллельных реакций. Для адекватного описания и прогнозирования подобных процессов используются методы формальной кинетики, при которых весь процесс описывается одной суммарной брутто реакцией, так как с технологической точки зрения нецелесообразно (а в ряде случаев и невозможно) изучать элементарные реакции процесса [1-3]. Подобные допущения позволяют установить кинетические закономерности термической переработки топлив, наблюдая за изменением массы небольшой навески топлива, т.е. термогравиметрически [1-2]. Несмотря на то, что экспериментальное получение термогравиметрических данных относительно доступно, анализ и интерпретация полученных результатов часто вызывает дискуссии [1-3]. В то же время, необходимо отметить, что именно в результате анализа устанавливаются кинетические параметры реакции и определяются соотношения для прогнозирования протекания процесса в представительном объеме аппарата, что в свою очередь открывает возможность для выбора подхода к построению моделей функционирования реактора как системы с распределенными характеристиками [4-5].

В настоящей работе предпринята попытка проверки одного из наиболее распространенных методов обработки термогравиметрических данных (метода Коутса-Редферна [6]) и его совершенствования с точки зрения качества прогнозирующих возможностей получаемого регрессионного уравнения.

Как правило, брутто реакция рассматривается с точки зрения степени ее завершенности α [2-3]:

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_\infty}, \quad (1)$$

где m_0 и m – начальное и текущее значения массы образца, t – время процесса, m_∞ – масса образца в момент завершения всех реакций.

Со скоростью процесса α связывается соотношением вида:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot f(\alpha), \quad (2)$$

где k – константа скорости реакции, а слагаемое f(α) называется моделью реакции и представляет собой функцию порядка реакции n [2-4].

Константа скорости зависит от температуры процесса [2-4]:

$$k = A \cdot exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (3)$$

где A – предэкспоненциальный фактор, E – энергия активации, R – газовая постоянная.

Для неизотермических условий, вводя скорость нагрева β=dT/dt и разделяя переменные, можно привести (2) к следующему виду [1,2,3,7]:

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot dT. \quad (4)$$

Интегрируя (4) и вводя новое обозначение x= E/(RT), получим

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = g(\alpha) = \frac{A \cdot E}{\beta \cdot R} \cdot \int_x^\infty \frac{\exp(-x) \cdot dx}{x^2}, \quad (5)$$

где g(α) – интегральная функция (модель) реакции [1-3].

Подынтегральное выражение в правой части содержит показательную функцию, и этот интеграл не может быть представлен в виде аналитической функции. Выходом из данной ситуации может служить поиск некоторой аппроксимации (анализ возможных способов рассматривается в работе [7]). На практике наиболее распространенным способом преодоления указанной трудности является использование метода Коутса-Редферна [6], который по сути является способом подгонки, так как для получения адекватного кинетического триплета при его использовании приходится перебирать многие известные механизмы реакции с целью выбора такого механизма, который приводит к линейности функции $\ln(g(\alpha)/T^2)$ $\mathrm{Ln}\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right)$ от обратной температуры. Такая линейная зависимость может быть интерпретирована как равенство единице коэффициента детерминации R^2 при аппроксимации значений этой функции от обратной температуры (на практике, естественно, строгой функциональной зависимости не наблюдается, но необходимо стремиться, чтобы R^2 был близок к 1). Основное уравнение метода Коутса-Редферна [6] имеет следующий вид:

$$ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right) = ln\left(\frac{A \cdot R}{\beta \cdot E}\left(1 - \frac{2 \cdot R \cdot T}{E}\right)\right) - \frac{E}{R \cdot T}, \quad (6)$$

С учетом того, что (2RT/E)<<1, соотношение (6) можно записать в более удобной форме [1-3]:

$$ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right) = ln\left(\frac{A \cdot R}{\beta \cdot E}\right) - \frac{E}{R \cdot T}, \quad (7)$$

Как было указано, метод предполагает перебор различных известных моделей реакций. Перечень используемых нами в настоящем исследовании представлен в таблице 1.

В сравнении с традиционным методом Коутса-Редферна в настоящем исследовании предлагается модифицированный метод идентификации кинетических параметров. Сущность его состоит в том, что модель реакции выбирается обычным путем (методом Коутса-Редферна), а кинетические параметры восстанавливаются непосредственно из экспериментальных данных.

Таблица 1 – Дифференциальная, f(α), и интегральная, g(α), функции кинетического уравнения, применяемые для различных типов разложения твердого тела [1-3].

№	Модель реакции	Код	f(α)	g(α)
1	Степенной закон	P1	4·α 3/4	α
2	Степенной закон	P3/2	(2/3)·α-1/2 $\alpha^{-1/2}$	α2/3
3	Степенной закон	P2	2·α1/2	α1/2
4	Степенной закон	P3	3·α 2/3	α1/3
5	Степенной закон	P4	4·α 3/4	α1/4
6	Аварами-Ерофеева	A2	2·(1- α)·[-ln(1- α)]1/2	[-ln(1- α)]1/2
7	Аварами-Ерофеева	A3	3·(1- α)·[-ln(1- α)]2/3	[-ln(1- α)]1/3
8	Аварами-Ерофеева	A4	4·(1- α)·[-ln(1- α)]3/4	[-ln(1- α)]1/4
9	Сокращающаяся поверхность	R2	2·(1- α)1/2	1-(1- α)1/2
10	Сокращающийся объем	R3	3·(1- α)2/3	1-(1- α)1/3
11	Одномерная диффузия	D1	1/(2·α)	α2
12	Двумерная диффузия	D2	$[-\ln(1-\alpha)]^{-1}$	(1- α) ln(1- α)+ α
13	Объемная диффузия	D3	$\frac{3\cdot(1-\alpha)^{2/3}}{2\cdot\left(1-(1-\alpha)^{1/3}\right)}$	$\left(1-(1-\alpha)^{1/3}\right)^2$
14	Реакция n-го порядка	Fn	(1- α)n	[1-(1- α)1-n]/(1-n)

Так, константа скорости реакции k устанавливается непосредственным анализом экспериментальных термогравиметрических данных как:

$$k_j = \frac{g(\alpha_j^{exp})}{t_j^{exp}}, \tag{8}$$

где j – номер опыта, функция g – принятая с помощью метода Коутса-Редферна модель реакции, время обработки материала t^{exp} (включая индукционный период), соответствующее экспериментально установленному значению степени завершения реакции α^{exp}.

Рисунки 1 и 2 служат иллюстрацией примеров линеаризации искомых функций и прогнозирующих возможностей полученных корреляций при установлении кинетических параметров методом Коутса-Редферна и с помощью предлагаемого метода. Поскольку наиболее подходящая модель реакции в обоих случаях подбирается методом Коутса-Редферна, то в обоих случаях была принята модель реакции третьего порядка (R^2=0,995).

Прямая линия на рисунке 1а описывается уравнением (метод Коутса-Редферна):

$$y = -13{,}732 \cdot x_T + 9{,}3178, \tag{9}$$

где $y=\ln(g(\alpha)/T^2)$ и $x_T=1000/T$, что позволяет получить следующее выражение для константы скорости реакции:

$$k = 1{,}70 \cdot 10^8 \cdot \exp\left(-\frac{114{,}2 \cdot 10^3}{R \cdot T}\right). \tag{10}$$

Прямая линия на рисунке 2а описывается уравнением (предлагаемый метод):

$$y = -11{,}645 x_T + 13{,}784, \tag{11}$$

где $y=\ln(k)$ и $x_T=1000/T$, что позволяет получить следующее выражение для константы скорости реакции:

$$k = 9{,}69 \cdot 10^5 \cdot \exp\left(-\frac{96{,}8 \cdot 10^3}{R \cdot T}\right). \tag{12}$$

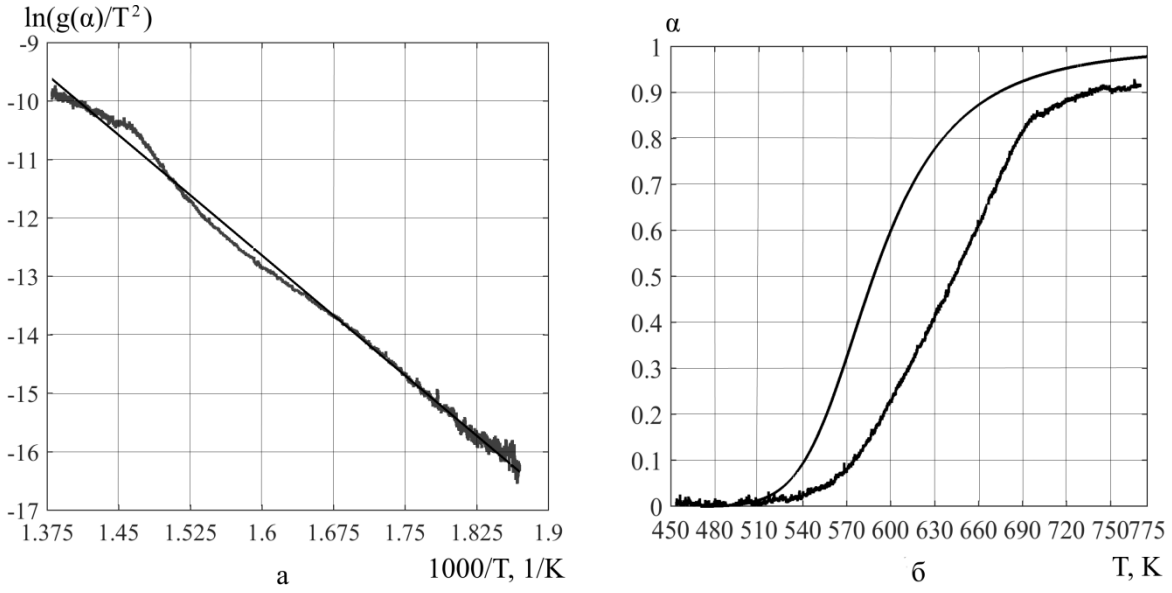


Рисунок 1 – а: линеаризация зависимости $\ln(g(\alpha)/T^2)=f(1/T)$ для метода Коутса-Редферна (линия – зависимость (9), точки – экспериментальные данные); б: зависимость степени превращения пиролизной смолы от температуры, полученная в эксперименте (точечная линия) в сравнении с расчетными результатами (линия).

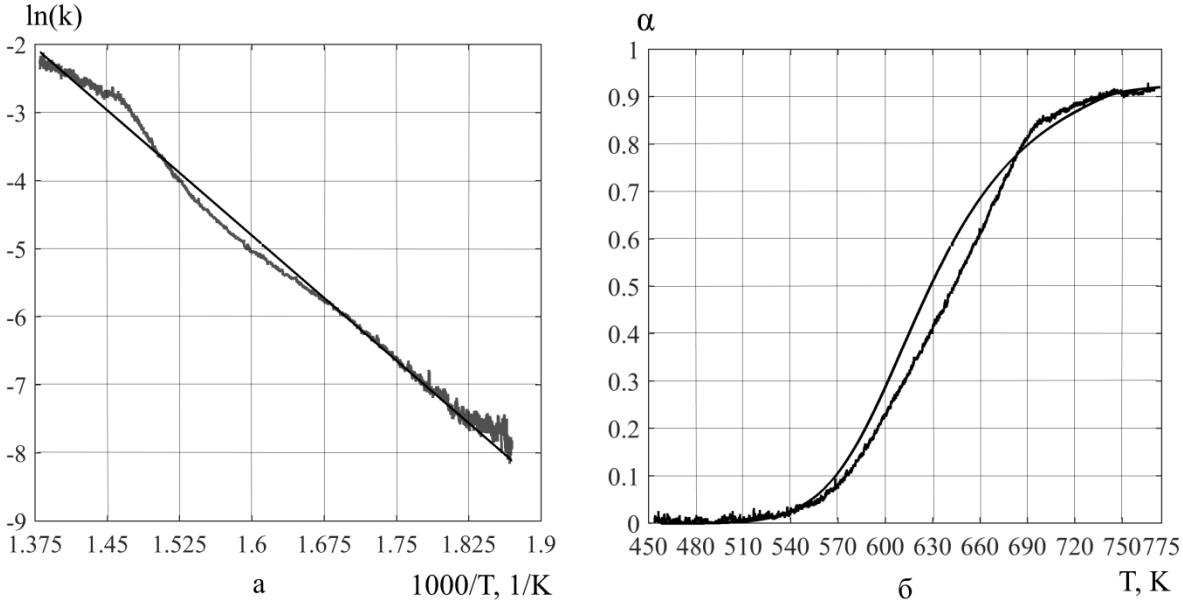


Рисунок 2 – а: график зависимости $\ln(k)=f(1/T)$ для предлагаемого метода (линия – зависимость (11), точки – экспериментальные данные); б: зависимость степени превращения пиролизной смолы от температуры, полученная в эксперименте (точечная линия) в сравнении с расчетными результатами (линия).

Как видно из рисунков 1 и 2, завышенные значения энергии активации и предэкспоненциального фактора в случае применения Коутса-Редферна приводят к явно ошибочным значениям степени разложения, что указывает на отсутствие сохранения кинетического триплета. И, наоборот, корректное описание степени разложения в условиях термогравиметрических исследований с использованием предложенного интегрального метода свидетельствует о том, что обеспечивается сохранение кинетического триплета. Последнее означает, что зависимость (8) может также использоваться для описания разложения вещества в изотермических условиях.

Выводы

Проведено экспериментальное исследование кинетики термического разложения пиролизной смолы и предложена модификация метода Коутса-Редферна для установления кинетических параметров реакции в неизотермических условиях, позволяющая обеспечить сохранение кинетического триплета и более адекватное описание процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khawam A., Flanagan DR. Role of isoconversional methods in varying activation energies of solid-state kinetics: II. Nonisothermal kinetic studies // Thermochimica Acta. 2005. Vol. 436. P. 101-112.

2. Козлов А.Н., Свищев Д.А., Худякова Г.И., Рыжков А.Ф. Кинетический анализ термохимической конверсии твердых топлив // Химия твердого топлива. 2017. № 4. С. 12–21.

3. Lopes F.C.R., Tannous K., Rueda-Ordóñez Y.J. Combustion reaction kinetics of guarana seed residue applying isoconversional methods and consecutive reaction scheme // Bioresource Technology. 2016. Vol. 219. P. 392–402.

4. Mitrofanov A., Mizonov V., Camelo A., Tannous K. Application of the theory of Markov chains to theoretical study of processes in a circulating fluidized bed // Particulate Science and Technology. 2019. Vol. 37. No. 8. P. 1028-1033.

5. Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Василевич С.В., Малько М.В. Расчетно-экспериментальное исследование термического разложения природного доломита в кипящем слое // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2018. Т. 61. Вып. 3. С. 93-99.

6. Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic parameters from thermogravimetric data // Nature. 1964. Vol. 201 (4914). P. 68-69.

7. Flynn J.H. The ‘Temperature integral’– Its use and abuse // Thermochimica Acta. 1997. Vol. 300. P. 83-92.

УДК 664.97, 664.844 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-118-121

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОСЦИЛЛИРУЮЩИХ РЕЖИМОВ СУШКИ
METHOD FOR CALCULATING ENERGY EFFICIENT OSCILLATING DRYING MODES

Дяченко Эдуард Павлович*, Иванова Мария Ивановна*,
Дяченко Мария Михайловна**
Eduard P. Dyachenko*, Maria I. Ivanova*, Maria M. Dyachenko**

**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)
***Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии*
***Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography*
(e-mail: amed-nauka@yandex.ru)

Аннотация: Разработана методика расчета энергоэффективных осциллирующих режимов сушки, позволяющая на основе эмпирических данных о кинетике сушки спрогнозировать и выбрать рациональные осциллирующие режимы процесса, обеспечивающие максимальную его энергоэффективность. Методика базируется на использовании многозонного метода аппроксимации кривых сушки и энергокинетического критерия, учитывающего интенсивность процесса и обеспечивающие ее удельные энергозатраты.

Abstract: A method for calculating energy-efficient oscillating drying modes has been developed, which allows, on the basis of empirical data on the kinetics of drying, to predict and select rational oscillating modes of the process that ensure its maximum energy efficiency. The technique is based on the use of a multi-zone method for approximating drying curves and an energy-kinetic criterion that takes into account the intensity of the process and the specific energy consumption that ensures it.

Ключевые слова: энергоэффективный режим, осциллирующие режимы, энергокинетический критерий, многозонный метод аппроксимации, инфракрасный энергоподвод.

Keywords: energy-efficient mode, oscillating modes, energy-kinetic criterion, multi-zone approximation method, infrared energy supply.

В настоящее время инфракрасная сушка остается одним из наиболее перспективных методов, как с позиции энергоэффективности, так и с позиций скорости влагоудаления и качества сухого продукта [1, 2]. Однако, несмотря на интерес к инфракрасному энергоподводу, одним из основных факторов, сдерживающих его широкое внедрение в промышленность является сравнительно высокая энергоемкость процесса.

Энергозатраты входят в издержки предприятия и имеют существенное экономическое влияние на конечную цену продукции, поэтому их сокращение является приоритетной для производства и актуальной научно-технической задачей. Как следствие, отечественными исследователями последнее время уделяется большое внимание разработке и внедрению энергоэффективных способов сушки, основанных на комбинированных методах энергоподвода, а также нестационарных – осциллирующих, переменных режимах [1].

В настоящей работе авторами предлагается методика, позволяющая на основе эмпирических данных о кинетике сушки спрогнозировать и выбрать рациональные осциллирующие режимы процесса сушки, обеспечивающие максимальную его энергоэффективность. Методика базируется на использовании энергокинетического критерия (отношения удельных текущих энергозатрат на сушку единицы количества высушиваемого материала к скорости сушки) [3] и многозонного метода, предложенного И. Ю. Алексаняном [4].

Энергокинетический критерий через скорость сушки учитывает интенсивность процесса и обеспечивающие ее удельные энергозатраты, чем меньше величина критерия, тем эффективнее использование энергии на реализацию процесса [3].

Многозонный метод, предложенный И.Ю. Алексаняном, подобен двухзональному методу Лыкова А.В. при логарифмровании кривых скорости и заключается в условном разбиении кривой скорости влагоудаления на зоны и последующем их математическом описании. Причем каждая зона кривой (период влагоудаления) соответствует определенному этапу обезвоживания, обусловленному изменением характеристик продуктов, энергетики и вида связи влаги с материалом.

Суть предлагаемой в настоящей работе методики заключается в определении значений режимных параметров (режимов), варьируемых в процессе сушки и обеспечивающих минимальные значения энергокинетического критерия в каждой зоне кривой скорости сушки. Другими словами, минимальные значения критерия в каждой зоне позволяют определить режимы процесса, обеспечивающие наиболее эффективное использование энергии в каждом периоде сушки, соответствующему определенному характеру переноса влаги внутри слоя, качественному и энергетическому состоянию связи влаги с материалом. При этом в качестве делителя для определения критерия используется суммарная, интегральная скорость в зоне, а расчеты проводятся в границах концентраций сухих веществ в продукте c, кг/кг и варьируемых режимных параметров, обеспечивающих качество готового продукта.

Исходными данными являются кривые сушки, аппроксимацией которых определяются зависимости времени сушки τ, с от c, кг/кг и варьируемых в процессе сушки энергозависимых режимов, q_i=const:

$$\tau = f_1 (q_i, c), \quad (1)$$

где i – количество энергозависимых режимов сушки (например, плотность теплового потока, температура теплоносителя и т.д.).

Далее, путем произведения энергозависимого режима q_i на функциональную зависимость времени сушки (с последующим сложением указанных произведений, в случае, если параметров несколько), определяется функциональная зависимость фактически понесенных энергозатрат Q в процессе сушки:

$$Q = \sum_{i=1}^{i} [q_i \cdot f_1(q_i, c)]. \quad (2)$$

Уравнение скорости сушки от концентрации сухих веществ в продукте и варьируемых в процессе сушки энергозависимых режимов определяется путем дифференцирования функциональной зависимости времени сушки по dc и последующих математических преобразований [5]:

$$\frac{dc}{d\tau} = f_2(q_i, c) \quad (3)$$

Затем по сингулярным точкам кривых скорости сушки определяются и математически описываются границы зон, в результате на границе получаем функциональные зависимости концентрации сухих веществ в продукте от энергозависимых режимов:

$$c_n = f_3 (q_i), \quad (4)$$

где n – порядковый номер границы зоны (от начала процесса сушки).

Далее путем интегрирования устанавливаются суммарные максимальные скорости сушки в каждой зоне (в пределах границ концентраций соответствующей зоны):

$$F_1 = \int_{C_0}^{C_1} \frac{dc}{d\tau} dc\,, \qquad F_2 = \int_{C_1}^{C_2} \frac{dc}{d\tau} dc \ldots F_{n+1} = \int_{C_n}^{C_k} \frac{dc}{d\tau} dc, \tag{5}$$

где F_1, F_2 и F_{n+1} – суммарная максимальная скорость сушки в каждой зоне; c_0 и c_k – концентрации сухих веществ в нативном и высушенном продукте, кг/кг; c_1, и c_2 – функциональные зависимости концентрации сухих веществ в продукте от энергозависимых режимов в 1 и 2 границах зон, кг/кг.

Функциональная зависимость энергокинетического критерия A от варьируемых в процессе сушки режимных параметров (от энергозависимых режимов) определяется для каждой зоны отношением зависимостей (2) и (5), с учетом энергозатрат в каждой зоне:

$$A_1 = \frac{Q_1}{F_1} = \frac{\sum_{i=1}^{i}[q_i \cdot f_1(q_i, c_1)]}{\left(\int_{C0}^{C_1} \frac{dc}{d\tau} dc\right)},$$

$$A_2 = \frac{Q_2}{F_2} = \frac{\sum_{i=1}^{i}[q_i \cdot f_1(q_i, c_2)] - \sum_{i=1}^{i}[q_i \cdot f_1(q_i, c_1)]}{\left(\int_{C1}^{C_2} \frac{dc}{d\tau} dc\right)} \tag{6}$$

$$A_{n+1} = \frac{Q_{n+1}}{F_{n+1}} = \frac{\sum_{i=1}^{i}[q_i \cdot f_1(q_i, c_2)] - \sum_{i=1}^{i}[q_i \cdot f_1(q_i, c_1)] - \sum_{i=1}^{i}[q_i \cdot f_1(q_i, c_1)]}{\left(\int_{C_n}^{C_k} \frac{dc}{d\tau} dc\right)}$$

Минимальное значение искомой функции A в каждой зоне рассчитывается в среде «Mathcad» с использованием функции «minimize». Таким образом, значения q_n, при которых в каждой зоне достигаются минимальные A, являются искомыми режимными параметрами, обеспечивающими энергоэффективность процесса в зависимости от механизма тепломассопереноса в материале в процессе сушки.

Рациональный режим для всего диапазона концентраций обезвоживания определяется путем подстановки полученных для каждой зоны параметров q_n в уравнение скорости сушки соответствующей зоны $c_n=f_3(q_n)$. Аппроксимирующее уравнение скорости сушки для каждой зоны при рациональном режиме строится путем совмещения полученных зависимостей скорости сушки в виде комплекса уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dc}{d\tau} = f_2(q_1, c),\ c_0 \le c \le c_1 \\ \dfrac{dc}{d\tau} = f_2(q_2, c), \qquad c_1 \le c \le c_2 \\ \qquad\qquad \ldots \\ \dfrac{dc}{d\tau} = f_2(q_n, c),\ c_n \le c \le c_k \end{cases} \tag{7}$$

Предлагаемая методика расчета энергоэффективных осциллирующих режимов сушки реализована в виде программного обеспечения [6]. В результате проведенных по методике расчетов с использованием эмпирических данных по кинетике инфракрасной сушки ряда растительных и белковых продуктов (томатов [7], раствора желатина [9], экстракта коня солодки [9], ферментированных отходов лососевых рыб и др.) были выбраны энергоэффективные режимы процессов сушки указанных продуктов, подтверждена адекватность методики и целесообразность ее применения при оптимизации процесса.

Выводы

Разработана и апробирована методика расчета энергоэффективных осциллирующих режимов сушки, позволяющая на основе эмпирических данных о кинетике обезвоживания спрогнозировать и выбрать рациональные осциллирующие режимы процесса с целью обеспечения максимальной его энергоэффективности. Предлагаемая методика может быть использована при создании и повышении энергоэффективности технологических процессов сушки и промышленных сушильных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубилин Е.И., Виневский Е.И. Энергоемкость сушки растительного сырья: проблемы и пути решения // Технический оппонент. 2019. № 1(2). С 48–53.

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

3. Гавриленков А.М., Емельянов А.Б., Шаров А.В. Экологические аспекты интенсификации конвективной сушки // Вестник ВГУИТ. № 3. 2012. С 137–139.

4. Алексанян И.Ю., Буйнов А.А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование. Астрахань: Изд-во Астрахан. гос. техн. ун-та, 2004. 380 с.

5. Дяченко Э.П. Комплексное исследование тепломассообмена при сушке сульфонола во вспененном состоянии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Махачкала. 2009. 24 с.

6. Дяченко Э.П., Дяченко М.М., Синельщиков А.В. и др. Прогнозирование и выбор энергоэффективных осциллирующих режимов в процессе сушки / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2021612129. Заявл. 28.12.2020, зарег. 11.02.2021.

7. Дяченко Э.П., Алексанян И.Ю., Разин О.А., Иванова М.И. Исследование влияния конвективного энергоподвода на интенсивность инфракрасной сушки плодов томата // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств» 2019. № 4. С. 40–47.

8. Макаров А.В., Максименко Ю.А., Дяченко Э.П. Исследование конвективно-радиационной сушки вспененного желатинового бульона из отходов переработки рыбы // Техника и технология пищевых производств. 2019. Т.49. № 4. С. 594–603.

9. Хайбулов Р.А. Исследование теплофизических и массовлагообменных параметров вакуумной пеносушки экстракта корня солодки при инфракрасном энергоподводе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Астрахань. 2006. 20 с.

УДК 630*232.315.3 : 664.8.037.523 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-122-125

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ СЕМЯН СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ПОГРУЖЕНИЕМ В ЖИДКОСТЬ
FEATURES OF THE SCOTS PINE SEEDS BY LIQUID IMMERSION FREEZING

Дорняк Ольга Роальдовна, Новиков Артур Игоревич
Olga R. Dornyak, Arthur I. Novikov

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Россия, Воронеж
Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russia, Voronezh
(e-mail:ordornyak@mail.ru O.R.; arthur.novikov@vglta.vrn.ru A.N.)

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности формирования капсул семян сосны обыкновенной как объекта замораживания погружением в воду с песчаной дисперсией на основе процессов тепломассопереноса.

Abstract: Some theoretical features of the formation of Scots pine seeds capsules as an object of immersion freezing by water with sand dispersion based on heat-and-mass transfer processes are considered.

Ключевые слова: Pinus sylvestris L., замораживание погружением в жидкость, тепломассоперенос.

Keywords: Pinus sylvestris L.; liquid immersion freezing; heat-and-mass transfer.

Технология подготовки семян сосны обыкновенной, связанная с их погружением в водонасыщенную дисперсную среду на основе речного песка (SiO_2 – 98%, остальное – AI_2O_3 и Fe_2O_3) и последующим замораживанием в капсуле нужной формы, направлена на повышение качества и эффективности аэросева [1]. Ожидается, что при замерзании воды будет сформирована капсула с более прочным структурным каркасом по сравнению с чистой ледяной оболочкой. Замораживание в полевых условиях можно осуществить, используя в качестве замораживающего агента гранулы диоксида углерода, не оказывающего при правильном использовании вредного воздействия на природу и человека.

При замораживании в воздушной среде погружением герметично упакованных семян рода *Pinus* в жидкий азот (–196 °С) [14] до температуры (–172 °С) семена сохраняют всхожесть без криопротекторов [16]. При этом качество криовоздействия на семена определяется параметрами скорости замораживания и влажности семян [14]. Отсутствие контроля скорости изменения температуры в течение процесса «замораживание-оттаивание» приводит к заметному ухудшению показателей всхожести: у сосны обыкновенной разница с контролем по энергии прорастания составляет 8-16%, по лабораторной всхожести – 10-13 % [4]. При этом у 80–90 % семян сосны происходит растрескивание внешней оболочки, что может послужить основой криоскарификации. В то же время Jabłoński et al. [8] сообщают о необходимости скарификации семян перед высевом с достаточно твердой оболочкой (в том числе и сосны обыкновенной) после длительного хранения с целью интенсификации процессов прорастания. Крупные лесные семена в большинстве случаев чувствительны к высушиванию [15], а мелкие, особенно сосны обыкновенной, возможно для лучшего переноса низкой температуры высушивать до влажности 4 % [14].

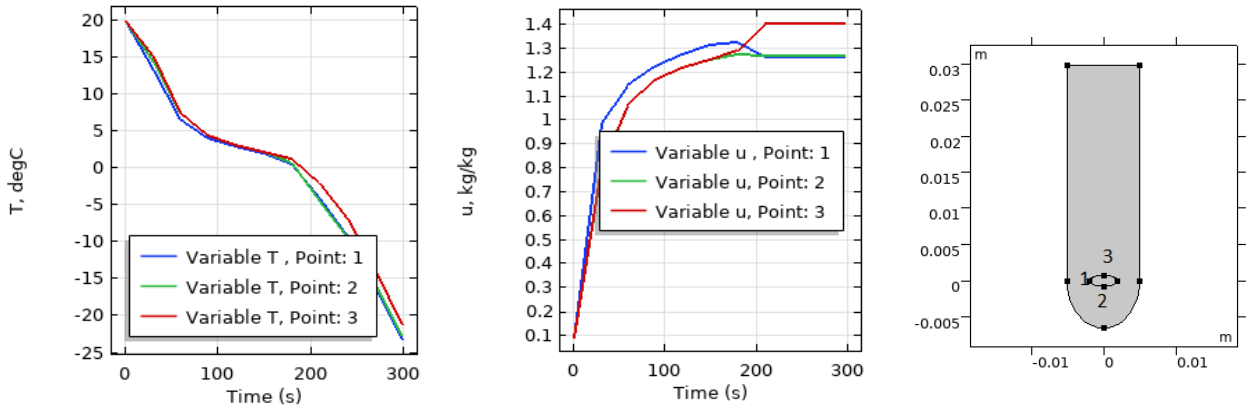
Экспериментальные исследования, связанные с замораживанием лесных семян путем погружения в жидкую среду, практически отсутствуют. В обзоре стратегий капсулирования семян с 1949 по 2019 годы, проведенном Gornish et al. [7], нет информации о возможном содержании в капсулах воды в стадии замерзания. Известны работы в области замораживания биологических объектов методом погружения в жидкость, цель которых – сохранение пищевых продуктов [5, 9, 10, 17, 18]. По сравнению с замораживанием в воздушной среде

иммерсионное замораживание сопровождается более интенсивными процессами тепло- и массопереноса как в семени, так и в окружающей оболочке. При этом в биологических объектах, как показано в работах Chourott et al., массообмен сводится не только к транспорту воды, но и к диффузии растворенных в воде веществ [5]. Этот процесс, по мнению Lucas и Raoltwack, «может контролироваться изменением времени иммерсионного замораживания [10]».

Объектом исследования является процесс иммерсионного замораживания единичного семени сосны обыкновенной в процессе создания ледяных капсул для аэросева [2, 3, 13].

Нестационарная математическая модель процессов тепло- и массопереноса на основе уравнений А. В. Лыкова [11] при замораживании капсулы, содержащей водонасыщенную дисперсную среду и семя сосны обыкновенной, с внутренней подвижной границей, является нелинейной [6]. При этом предполагается, что: фронт фазового перехода в насыщенной крупнодисперсной системе «песок – вода» представляет собой область с размерностью на единицу меньшей, чем размерность задачи, то есть межфазная граница является «резкой», не размытой, что справедливо, когда доля связанной воды в капиллярно-пористой системе незначительна по сравнению с долей свободной воды; влиянием градиента температуры на перенос влаги в системе можно пренебречь; семя имеет воду только в связанном состоянии. Исследование модели проведено с помощью численных методов на базе кроссплатформенного программного обеспечения COMSOL Multiphysics 5.5 (COMSOL Inc., Стокгольм, Швеция). Следует отметить, что имеются параметры, которые должны быть получены экспериментальным путем, но до сегодняшнего момента таких исследований пока не проведено. К таким параметрам относятся теплофизические характеристики твердой фазы семени, а также коэффициент влагопроводности k^s, влагоотдачи α_D. Для проведения модельных расчетов указанные величины выбраны близкими к соответствующим значениям для древесного вещества, а также для соразмерных семян сельскохозяйственных растений. Коэффициент теплоотдачи от гранул диоксида углерода к дисперсной смеси в капсуле α зависит от многих факторов, в том числе от площади контакта гранул со стенкой капсулы и интенсивности теплопередачи. Согласно результатам исследования [12], выполненного для замораживания грунта, можно принимать α из диапазона 25-100 Вт $(м^2 \cdot K)^{-1}$.

Изменение времени замораживания от 0 до 360 с приводит к снижению значений температуры на 40 С и повышение значений влагосодержания в некоторых точках на поверхности семени в 1,4 раза (рисунок 1).



а) б) в)

Рисунок 1 – Зависимости температуры (а) и влагосодержания (б) в соответствующих точках на поверхности семени (*в*), находящегося в водонасыщенной дисперсной среде, от времени замораживания.

В связи с небольшим размером семени значения температуры на его поверхности различаются незначительно. Когда вода в дисперсии вблизи границ семени замерзает при T = 273 K (примерно τ = 180 с), поступление воды в семя прекращается, изменение влагосодержания здесь возможно только за счет внутреннего массопереноса. Поле температуры в изучаемой системе достаточно неоднородно, что связано с формой капсулы и различием теплофизических свойств материалов, используемых в заготовке. Режим замораживания через 300 с приводит к формированию льдистой структуры во всем объеме капсулы. При этом температура в семени практически однородна и имеет значение вблизи -10 °С, что означает отсутствие кристаллов льда в семени, поскольку начальное влагосодержание семени (u_{0s}=0.09) соответствует наличию в нем только связанной воды, у которой температура замерзания несколько ниже.

Выводы

Процесс замораживания с помощью диоксида углерода капсулы, содержащей водную дисперсию речного песка (SiO_2 – 98 %, остальное – AI_2O_3 и Fe_2O_3), в которую погружено семя сосны обыкновенной, является нелинейным; численно определена зависимость влагосодержания и температуры в характерных точках на поверхности семени от времени погружного замораживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков А.И. Совершенствование технологии получения высококачественного лесосеменного материала : автореф. дис. … д-ра техн. наук : 05.21.01. Воронеж: ВГЛТУ, 2021. 32 с.

2. Соколов С.В. Тенденции развития операционной технологии аэросева беспилотными летательными аппаратами в лесовосстановительном производстве / С. В. Соколов, А. И. Новиков // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7. № 4. С. 190–205.

3. Пат. 2710721 Российская Федерация, МПК A 01 C 1/06. Способ капсулирования семян для аэросева / Альбеков А.У., Драпалюк М.В., Морковина С.С., Новиков А.И., Вовченко Н.Г., Соколов С.В., Новикова Т.П. ; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. лесотехн. ун-т. – № 2019100845 ; заявл. 10.01.2019 ; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1

4. Butenko O.U. Influence of freezing and thawing on the germination of pine and spruce seeds / O. U. Butenko, A. S. Bondarenko, N. N. Pelevina // Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2014. V. 1. P. 38–46.

5. Chourot J.M. Behaviour of green beans during the immersion chilling and freezing / J. M. Chourot, J. Lauwers, N. Massoji, T. Lucas // International Journal of Food Science and Technology. 2001. V. 36. № 2. P. 179–187.

6. Dornyak O. Immersion Freezing of a Scots Pine Single Seed in a Water-Saturated Dispersion Medium: Mathematical Modelling / O. Dornyak, A. Novikov // Inventions. 2020. V. 5. № 4. Id 51.

7. Gornish E. Review of seed pelletizing strategies for arid land restoration / E. Gornish, H. Arnold, J. Fehmi // Restoration Ecology. 2019. V. 27. № 6. P. 1206–1211.

8. Jabłoński M. Colour-based binary discrimination of scarified quercus robur acorns under varying illumination / M. Jabłoński, P. Tylek, J. Walczyk, R. Tadeusiewicz, A. Piłat // Sensors. 2016. V. 16. № 8. id 1319.

9. Lucas T. Freezing of a porous medium in contact with a concentrated aqueous freezant: numerical modelling of coupled heat and mass transport / T. Lucas, J. M. Chourot, P. Bohuon, D. Flick // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2001. V. 44. № 11. P. 2093–2106.

10. Lucas T. Immersion chilling and freezing: Phase change and mass transfer in model food / T. Lucas, A. L. Raoult-Wack // Journal of Food Science. 1996. V. 61. № 1. P. 127–132.

11. Лыков А.В. Тепломассообмен. М., Энергия, 1978. 480 с.

12. Николаев П.В. Обоснование параметров технологии замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода в подземном строительстве: автореф. дис. … канд. техн. наук. М.: МиСИС, 2016. 24 с.

13. Novikov A.I. Aerial seeding of forests in Russia: A selected literature analysis / A. I. Novikov, B. T. Ersson // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 226. id012051.

14. Pita J.M. Cryopreservation: An alternative method for the conservation of endangered populations of two Iberian pines (Pinus nigra Arnold and Pinus sylvestris L.) / J. M. Pita, S. Barrero, A. Escudero // Silvae Genetica. 1997. V. 46. № 4. P. 250–252.

15. Pukacki P.M. Desiccation sensitivity and cryopreservation of the embryonic axes of the seeds of two Acer species / P. M. Pukacki, K. Juszczyk // Trees. 2015. V. 29. № 2. P. 385–396.

16. Sirman D. Influence of cryofreezing on germination of seeds of some members of the genus pine (Pinus) on the background of the use of one-and two-component cryoprotectors / D. Sirman, M. Blyalova, Z. Seilbek // Theory and practice of scientific research. P. 11-25.

17. Zorrilla S.E. Mathematical modeling for immersion chilling and freezing of foods. Part II: Model solution / S. E. Zorrilla, A. C. Rubiolo // Journal of Food Engineering. 2005. V. 66. № 3. P. 339–351.

18. Zorrilla S.E. Mathematical modeling for immersion chilling and freezing of foods. Part I: Model development / S. E. Zorrilla, A. C. Rubiolo // Journal of Food Engineering. 2005. V. 66. № 3. P. 329–338.

УДК 536.24 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-125-130

РАСЧЕТ СБЛИЖЕНИЯ ПЛОСКИХ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ
CALCULATION OF THE CONVERGENCE OF FLAT ROUGH SURFACES OF A CONTACT PAIR

Попов Виктор Михайлович, Дорняк Ольга Роальдовна
Victor M. Popov, Olga R. Dornyak

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Россия, Воронеж
Voronezh state forestry engineering University named after G. F. Morozov, Russia, Voronezh
(e-mail: ordornyak@mail.ru)

Аннотация: Представлено решение задачи упругого деформирования металлических контактных пар с плоскими шероховатыми поверхностями. Определена величина относительного сближения элементов контактной пары в зависимости от давления и геометрических характеристик контактирующих поверхностей

Abstract: The solution of the problem of elastic deformation of metal contact pairs with flat rough surfaces is presented. The value of the relative convergence of the elements of the contact pair is determined depending on the pressure and geometric characteristics of the contacting surfaces

Ключевые слова: контактная взаимодействие, шероховатость, деформирование
Keywords: contact interaction, roughness, deformation

Проблема расчета термического сопротивления контакта требует своего решения при проектировании новых устройств и технологических процессов, связанных с термовлажностной обработкой материалов. В задачах теплопередачи в разъемных соединениях выделяются аспекты, связанные с деформированием элементов контактной пары, поскольку часто контакт осуществляется за счет прижимных усилий. Изучение особенностей контактного взаимодействия связано с решением сопряженной задачи деформирования и теплообмена. Для практики термомеханических расчетов важна оценка величины сближения контактных поверхностей вследствие механического нагружения [1-2]. В данной работе выполнен расчет этой величины для металлических контактных пар с плоскошероховатыми поверхностями.

Рассмотрим соединение, элементы которого 21 и 22 (рис. 1) выполнены из одного материала. Относительное сближение определяется, как отношение разности перемещений линий впадин двух поверхностей a к наибольшей эквивалентной высоте профиля $\varepsilon_{отн}=a/R_{max}$, $R_{max}=R_{max21}+R_{max22}$ [1]. Некоторые исследователи используют для относительного сближения отношение $\varepsilon_{отн1}=a/R_p$ [3]. Величина R_p - представляет собой эквивалентную высоту сглаживания шероховатости: $R_p=R_{p21}+R_{p22}$. Очевидно $\varepsilon_{отн}=\varepsilon_{отн1}/2$.

Известны эмпирические соотношения, которые позволяют вычислить относительное сближение [1-3]. Для поверхностей, которые обработаны шлифованием

$$\varepsilon_{отн}=\left(0.0125p_{12}/HB\right)^{0.185}, \quad (1)$$

где p_{12}, МПа – контактное давление; НВ, МПа – твердость материала по Бринеллю. На основе экспериментов получена зависимость сближения от номинального давления вида

$$\varepsilon_{отн1}=\left(p_{12}/t_m HB\right)^{\frac{1}{\nu}}, \quad (2)$$

где ν, t_m – параметры опорной кривой. В [3] представлена модификация формулы (2), которая учитывает взаимное влияние микровыступов на величину сближения поверхностей:

$$\varepsilon_{отн1}=\left(p_{12}/t_m HB\right)^{1/\nu}\left(1+\left(p_{12}/t_m HB\right)^{2}\right)^{1/2\nu} \quad (3)$$

Для мало нагруженных соединений расчеты по формулам (2-3) практически совпадают [3].

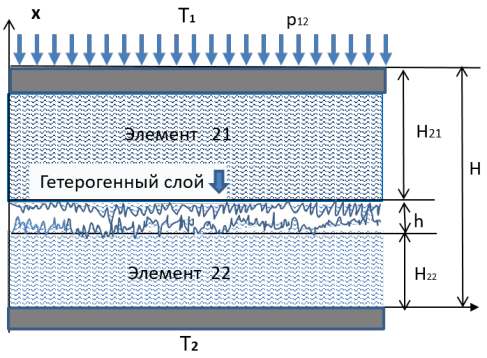


Рисунок 1 – Расчетная схема.

Величина относительного сближения может быть получена с использованием математической модели контактного взаимодействия, построенной на основе механики гетерогенных систем [4-5]. Контактная пара рассматривается как совокупность трех слоев (рис. 1). Верхний и нижний слои - это гомогенные области, выделенные из элементов пары. Объем промежуточного слоя содержит микровключения обоих элементов, а также газообразную среду. Высота h гетерогенного слоя равна сумме наибольших высот профилей обеих плоскошероховатых поверхностей $h=R_{max21}+R_{max22}$. Для определения сближения границ гетерогенного слоя проведен анализ напряженно-деформированного состояния слоев под действием сжимающих усилий, равномерно распределенных с интенсивностью p_{12} по внешней границе изучаемой системы. Элементы имеют разную температуру T_1 и T_2. Время установления температуры много больше длительности процесса деформирования, поэтому влияние теплообмена на механические характеристики контакта не рассматривается. Температурные деформации в областях 21 и 22 вычисляются по значениям T_1 и T_2, а в гетерогенном слое по усредненному значению, которое в данной работе принято равным температуре идеального контакта.

Следуя [4-5], запишем уравнения равновесия контактной пары в одномерном приближении:

$$\partial\sigma_2^{11}/\partial x_1=0. \quad (4)$$

Здесь σ_2^{11} - компонента полного тензора напряжений, который в гетерогенном слое выражается через тензоры напряжений в отдельных фазах, а также представляется как сумма фиктивного тензора и тензора напряжений в газовой фазе [6]:

$$\sigma_2^{kl} = \alpha_1 \left\langle \sigma'^{kl}_1 \right\rangle_1 + \alpha_2 \left\langle \sigma'^{kl}_2 \right\rangle_2, \tag{5}$$

$$\sigma_2^{kl} = \sigma_{f2}^{kl} - p_1 \delta^{kl},\ \sigma_{f2}^{kl} = \alpha_2 (\left\langle \sigma'^{kl}_2 \right\rangle_2 - \left\langle \sigma'^{kl}_1 \right\rangle_1). \tag{6}$$

В гетерогенном слое можно положить

$$\sigma_{f2}^{11} \approx \alpha_2 \left\langle \sigma'^{11}_2 \right\rangle_2,\ \ \sigma_2^{11} = \sigma_{f2}^{11}. \tag{7}$$

Используя граничное условие

$$\sigma_2^{11}\big|_{x_1 = H} = -p_{21}\ ,$$

получим решение задачи в напряжениях в условиях одноосного сжатия [7]:

$$\sigma_2^{11} = -p_{21},\ \sigma_2^{ij} = 0,\ \ i \neq 1, j \neq 1. \tag{8}$$

Выражения для компонент тензора деформаций имеют вид [4,6]

$$\varepsilon_2^{11} = \begin{cases} \Pi_{21}^{s} \sigma_2^{11} + \Lambda_{s21} \Theta_{21},\ x_1 \in [H - H_{21}, H] \\ \left\langle \varepsilon'^{11}_2 \right\rangle_2 + \varepsilon_{f2}^{11},\ \langle \varepsilon'^{11}_2 \rangle_2 = \Pi_2^{s} \langle \sigma'^{11}_2 \rangle_2 + \Lambda_{s2} \Theta_2,\ \varepsilon_{f2}^{11} = \Pi_2^{f} \sigma_{f2}^{11},\ x_1 \in (H_{22}, H - H_{21}) \\ \Pi_{22}^{s} \sigma_2^{11} + \Lambda_{s22} \Theta_{22},\ x_1 \in [0, H_{22}] \end{cases} \tag{9}$$

$$\varepsilon_2^{22} = \varepsilon_2^{33} = \begin{cases} -\nu_{21}^{s} \Pi_{21}^{s} \sigma_2^{11} + \Lambda_{s21} \Theta_{21},\ x_1 \in [H - H_{21}, H] \\ \left\langle \varepsilon'^{22}_2 \right\rangle_2 + \varepsilon_{f2}^{22},\ \ \langle \varepsilon'^{22}_2 \rangle_2 = -\nu_2^{s} \Pi_2^{s} \langle \sigma'^{11}_2 \rangle_2 + \Lambda_{s2} \Theta_2,\ \varepsilon_{f2}^{22} = -\nu_2^{f} \Pi_2^{f} \sigma_{f2}^{11},\ x_1 \in (H_{22}, H - H_{21}) \\ -\nu_{22}^{s} \Pi_{22}^{s} \sigma_2^{11} + \Lambda_{s22} \Theta_{22},\ x_1 \in [0, H_{22}] \end{cases}$$

$\varepsilon_2^{ij} = 0,\ \ i \neq j.$

Параметры Π_2^{s} , Π_2^{f} представляют собой значения эффективной податливости вещества и «скелета» твердой фазы гетерогенного слоя соответственно. Величина податливости обратна значению модуля упругости $\Pi_i^{s} = 1/E_i^{s}$, $\Pi_i^{f} = 1/E_i^{f}$ (i=21, 22). В гетерогенном слое определим эффективные параметры по правилу смесей [8]:

$$\Pi_2^{s} = \frac{1}{\alpha_2}(\alpha_{21}\Pi_{21}^{s} + \alpha_{22}\Pi_{22}^{s}),\ \Pi_2^{f} = \frac{1}{\alpha_2}(\alpha_{21}\Pi_{21}^{f} + \alpha_{22}\Pi_{22}^{f}), \tag{10}$$

$$\nu_2^{s} = \frac{1}{\alpha_2}(\alpha_{21}\nu_{21}^{s} + \alpha_{22}\nu_{22}^{s}),\ \nu_2^{f} = \frac{1}{\alpha_2}(\alpha_{21}\nu_{21}^{f} + \alpha_{22}\nu_{22}^{f}),\ \ \Lambda_2^{s} = \frac{1}{\alpha_2}(\alpha_{21}\Lambda_{21}^{s} + \alpha_{22}\Lambda_{22}^{s}) \tag{11}$$

Из (8-9) следует, что в слоях 21 и 22 упругие деформации постоянны, а в гетерогенном слое зависят от координат x_1. Вид этой зависимости определяют функции объемной крнцентрации твердой фазы каждого из двух материалов $\alpha_i(x_1)$ (i=21, 22). Как показано в [4], функции $\alpha_i(x_1)$ идентичны функциям, описывающим опорные кривые шероховатых поверхностей. Опорные кривые $t_p(e_m)$ получают после обработки профилограмм поверхностей. В [9] показано, что адекватное описание опорных кривых шероховатых слоев может быть выполнено с помощью регуляризованной неполной бэта-функции:

$$\alpha_2(e_m) = t_p(e_m) = \frac{\Gamma(m+n)}{\Gamma(m)\Gamma(n)} \int_0^{e_m} x^{(m-1)}(1-x)^{n-1} dx,\ e_m = \frac{z}{R_{\max}}. \tag{12}$$

Здесь z - расстояние от выбранной плоскости до плоскости нулевого уровня, которая параллельна срединной плоскости и проходит через вершину выступа максимальной высоты.

Из (8-9) следует, что распределение перемещений твердой фазы в поперечном направлении вдоль оси $x_1=x$ можно получить, решая краевую задачу следующего вида:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial\langle \mathrm{h'}_2\rangle_2}{\partial x} = -\mathrm{p}_{21}\Pi^{\mathrm{s}}_{21} + \Lambda_{\mathrm{s}21}\Theta_{21},\ x\in[\mathrm{H}-\mathrm{H}_{21},\mathrm{H}]\\
&\frac{\partial\langle \mathrm{h'}_2\rangle_2}{\partial x} = -\mathrm{p}_{21}\left(\frac{\Pi^{\mathrm{s}}_2}{\alpha_2}+\Pi^{\mathrm{f}}_2\right) + \Lambda_{\mathrm{s}2}\Theta_2,\ x\in(\mathrm{H}_{22},\mathrm{H}-\mathrm{H}_{21})\\
&\frac{\partial\langle \mathrm{h'}_2\rangle_2}{\partial x} = -\mathrm{p}_{21}\Pi^{\mathrm{s}}_{22} + \Lambda_{\mathrm{s}22}\Theta_{22},\ x\in[0,\mathrm{H}_{22}]
\end{aligned} \tag{13}$$

$$\langle \mathrm{h'}_2\rangle_2\Big|_{\mathrm{x}=0} = 0;\ \langle \mathrm{h'}_2\rangle_2\Big|_{\mathrm{x}=\mathrm{H}_{22}-0} = \langle \mathrm{h'}_2\rangle_2\Big|_{\mathrm{x}=\mathrm{H}_{22}+0};\ \langle \mathrm{h'}_2\rangle_2\Big|_{\mathrm{x}=\mathrm{H}-\mathrm{H}_{21}-0} = \langle \mathrm{h'}_2\rangle_2\Big|_{\mathrm{x}=\mathrm{H}-\mathrm{H}_{21}+0}.$$

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (13) является линейной, ее решение может быть записано в квадратурах. Анализ этого решения, когда опорные кривые заданы произвольной функцией, выполняется с использованием методов численного интегрирования. Искомое сближение поверхностей контактной пары $a=\langle \mathrm{h'}_2\rangle_2\Big|_{x=\mathrm{H}_{22}} - \langle \mathrm{h'}_2\rangle_2\Big|_{x=\mathrm{H}-\mathrm{H}_{21}-0}$ выражается следующим образом:

$$a = \mathrm{p}_{21}\int_{\mathrm{H}_{22}}^{\mathrm{H}-\mathrm{H}_{21}}\left(\frac{\alpha_{21}\Pi^{\mathrm{s}}_{21}+\alpha_{22}\Pi^{\mathrm{s}}_{22}}{\alpha_2^2}+\frac{\alpha_{21}\Pi^{\mathrm{f}}_{21}+\alpha_{22}\Pi^{\mathrm{f}}_{22}}{\alpha_2}\right)\mathrm{dx} - \Lambda_{\mathrm{s}2}\Theta_2\mathrm{h}. \tag{14}$$

Отметим, что решение краевой задачи (13) позволяет определить новое распределение концентраций фаз и компонент $\alpha^{\varepsilon}_n(x^{\varepsilon})$ в поперечном сечении гетерогенного слоя после его деформирования. Следуя [4],

$$\alpha^{\varepsilon}_n(x^{\varepsilon}) = \frac{\alpha_n(x)}{I_{\varepsilon_2}(x)+1},\ \ n=1, 2, 21, 22\ .$$

Здесь x^{ε} - координаты частиц слоя, вычисляемые как $x^{\varepsilon} = x + \langle h'_2(x)\rangle_2$.

В гетерогенном слое для $x\in(\mathrm{H}_{22},\mathrm{H}-\mathrm{H}_{21})$, имеем

$$\langle \mathrm{h'}_2(x)\rangle_2 = (-\mathrm{p}_{21}\Pi^{\mathrm{s}}_{22} + \Lambda_{\mathrm{s}22}\Theta_{22})\mathrm{H}_{22} + \int_{\mathrm{H}_{22}}^{x}(-\mathrm{p}_{21})\left(\frac{\Pi^{\mathrm{s}}_2}{\alpha_2}+\Pi^{\mathrm{f}}_2\right)\mathrm{d}x + \left(\Lambda_{\mathrm{s}2}\Theta_2\right)(x-\mathrm{H}_{22}). \tag{15}$$

Перемещения частиц, принадлежащих гомогенным областям деформируемого соединения, при сделанных предположениях записываются следующим образом:

$$\langle \mathrm{h'}_2(x)\rangle_2 = \begin{cases}
\left(-\mathrm{p}_{21}\Pi^{\mathrm{s}}_{22} + \Lambda_{\mathrm{s}22}\Theta_{22}\right)\mathrm{H}_{22} + \left\{(-\mathrm{p}_{21}\Pi^{\mathrm{s}}_{21} + \Lambda_{\mathrm{s}21}\Theta_{21})\left[x-(\mathrm{H}-\mathrm{H}_{21})\right]\right\} + \Lambda_{\mathrm{s}2}\Theta_2 h + \\
+\int_{\mathrm{H}_{22}}^{\mathrm{H}-\mathrm{H}_{21}}(-\mathrm{p}_{21})\left(\frac{\alpha_{21}\Pi^{\mathrm{s}}_{21}+\alpha_{22}\Pi^{\mathrm{s}}_{22}}{\alpha_2^2}+\frac{\alpha_{21}\Pi^{\mathrm{f}}_{21}+\alpha_{22}\Pi^{\mathrm{f}}_{22}}{\alpha_2}\right)\mathrm{d}x,\ x\in[\mathrm{H}-\mathrm{H}_{21},\mathrm{H}]; \\
\left(-\mathrm{p}_{21}\Pi^{\mathrm{s}}_{22} + \Lambda_{\mathrm{s}22}\Theta_{22}\right)x,\ x\in[0,\mathrm{H}_{22}]
\end{cases} \tag{16}$$

Выражение для сближения шероховатых поверхностей (14) при упругом деформировании под действием сжимающей нагрузки показывает, что величина *a* зависит от давления на внешней границе, распределения концентрации твердой фазы в гетерогенном слое, величин податливости материала и структурного каркаса, а также от коэффициента линейного расширения материала и температуры на границе контакта.

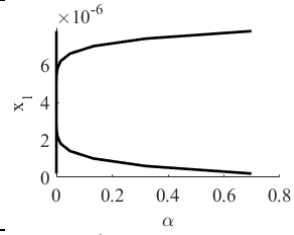
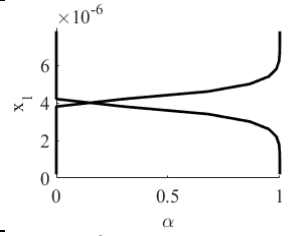
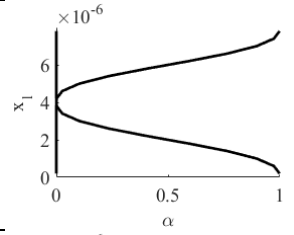
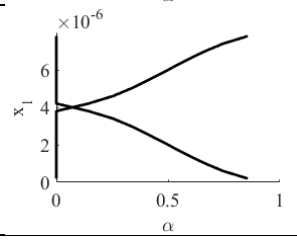
В таблице 1 представлены расчетные параметры, а в таблицах 2,3 - результаты расчетов величины относительного сближения двух одинаковых элементов пары из сплава Д1Т и стали марки 45. Начальное объемное содержание твердой фазы в гетерогенном слое определялось в соответствие с опорной кривой вида (12). Параметры m и n опорной кривой варьировались. Усредненная температура гетерогенного слоя T_k= 414 K.

Таблица 1 – Значения геометрических и механических параметров элементов контактных пар.

Параметр/Материал	Сплав Д1Т	Сталь 45
Максимальная высота шероховатости R_{max}, *мкм*	4	4
Высота образца *H*, *м*	0.04	0.04
Модуль упругости материала E^s, Па	$7.1 \cdot 10^{10}$	$1.98 \cdot 10^{11}$
Коэффициент Пуассона $\nu^s=\nu^f$	0,26	0,26
Модуль упругости структурного каркаса E^f, Па	$7.1 \cdot 10^{7}$	$4 \cdot 10^{7}$
Коэффициент линейного расширения материала Λ_s, K^{-1}	22.9e-6	13.1e-6
Твердость по Бринеллю, МПа	950	217

Из таблицы 2 видно, что величина относительного сближения зависит от деформативности гетерогенного слоя, которая тем выше, чем более "заполнен" слой микровключениями. Так для обоих сплавов при шероховатости поверхности, соответствующей бэта-распределению с параметрами m=7, n=1 сближение существенно выше, по сравнению с другими вариантами. Величина эффективного модуля упругости структурного каркаса в геторогенном слое для стали 45 ниже, чем для сплава Д1Т, что приводит к меньшему сопротивлению сжатия и большему значению относительного сближения.

Таблица 2 – Расчетные значения относительного сближения плоских шероховатых поверхностей a/R_{max} при $p_{12} = 10$ МПа в зависимости от характера распределения микронеровностей поверхностей контактной пары

Параметры напорной кривой	Вид кривых распределения концентраций твердой фазы по сечению гетерогенного слоя	Расчетное значение a/R_{max} по (14)	
		Д1Т	сталь 45
m=7, n=1		0.35	0.32
m=1, n=7		0.13	0.24
m=n=3		0.14	0.24
m=n=0.5		0.13	0.24

Сравнивая полученные расчеты на основе решения (14) со значениями сближения по известным формулам (1-2), т.е. данные таблиц 2 и 3, можно сделать вывод, что полученная

формула (14) адекватно описывает относительное сближение малонагруженных контактных пар. Следует отметить, что формула (1), которая не связывает величину относительного сближения с профилем шероховатой поверхности дает некоторое среднее значение *a*.

Таблица 3 – Расчетные значения относительного сближения плоских шероховатых поверхностей a/R_{max} при p_{12}=10 МПа по известным формулам [1-3].

Расчет по формуле (1) [1]		Расчетное по формуле (2) [3]		
Д1Т	сталь 45	Параметры опорной кривой [3]	Д1Т	сталь 45
0.19	0.25	ν=2, t_m=0.5	0.07	0.15
		ν=3, t_m=0.5	0.13	0.22
		ν=4, t_m=0.5	0.19	0.27
		ν=7, t_m=0.5	0.28	0.35

Вывод. Проведенные расчеты показали, что математическая модель контактного взаимодействия позволяет рассчитать сближение шероховатых поверхностей контактной пары с учетом интегральной характеристики шероховатости, заданной в виде опорной кривой.

Обозначения*:* $<\ldots>_i$ – усреднение по объему фазы *i*; e_m – безразмерный аргумент опорной кривой; *E* - модуль Юнга, Па; *H* – высота слоя, *м*; *h* – высота гетерогенного слоя, *м*; *p* – давление, *Па*; p_{12} – интенсивность распределенной нагрузки, *Па*; *m, n* – аргументы гамма-функции; R_{max} – высота неровностей профиля; *T* – температура, *K*; $t_p(e_m)$ – уравнение опорной кривой; x^l, *x* – декартова координата, *м*; *z* – размерный аргумент опорной кривой, *м*; α - объемное содержание фазы; Γ – гамма-функция Эйлера; δ^{kl} – единичный тензор; ε^{kl} - тензор деформаций; Θ - разность между текущей температурой и некоторым ее начальным значением, *K*; Λ –коэффициент температурного расширения, K^{-1}; ν – коэффициент Пуассона; П - податливость, $Па^{-1}$; σ^{kl} - тензор напряжений, *Па*.

Нижние индексы относятся: 1, 2– к газообразной и твердой фазам, 21 и 22 – к компонентам твердой фазы, верхнего и нижнего элемента контактной пары соответственно; f – к эффективным (фиктивным) значениям; k – к поверхности контакта; s – к гомогенному материалу. *Верхние индексы*: ′(штрих) относится к параметрам, являющихся средними в пределах микрообъема $d'V << h^3$, f – эффективное (фиктивное) значение; s – гомогенный материал.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-08-00165).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. – М.: Энергия, 1971. с.

2. Демкин Н. Б. Моделирование фрикционного контакта и его свойства // Трение, износ, смазка. - 1999. - № 3.

3. Демкин Н. Б., Удалов С.В., Алексеев В. А., Измайлов В.В., Болотов А.Н. Контакт шероховатых волнистых поверхностей с учетом взаимного влияния неровностей // Трение и износ. 2008. № 3. С. 231-238.

4. Дорняк О.Р., Попов В.М., Анашкина Н.А. Математическое моделирование контактного термического сопротивления для упругодеформируемых твердых тел методами механики многофазных систем // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 5. С. 2155-2167.

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. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. Москва: Наука, 1978. – 336 с.

7. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 2, Москва: Наука, 1970. 568 с.

8. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов: Пер. с японск. – М.: Мир. 1982. – 232 с.

9. Измайлов В.В., Курова М.С. Применение бета-распределения для расчета характеристик контакта шероховатых тел // Трение и износ. 1983. Т. 4. №5. – С. 902-906.

УДК 621.165 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-131-134

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ СИСТЕМАХ С МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ
INCREASING ENERGY AND RESOURCE SAVING IN COMPLEX HEAT AND MASS EXCHANGE SYSTEMS WITH MULTI-COMPONENT HEATS

Жуков Владимир Павлович, Барочкин Алексей Евгеньевич, Боброва Мария Сергеевна
Vladimir P. Zhukov, Alexey E. Barochkin, Maria S. Bobrova

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

Аннотация: В рамках разработанной модели тепломассообмена в многоступенчатых теплообменных аппаратах с многокомпонентными теплоносителями сформулирована и решена задача оптимизации структуры и режима работы тепломассообменных систем для теплоносителей, состоящих из смеси компонентов с разной температурой кипения. Представлено решение данной задачи, позволяющее оценить эффективность технологической системы по выбранной целевой функции.

Abstract: The authors used the developed model of heat and mass transfer in multi-stage heat exchangers with multicomponent heat carriers in order to formulate and solve the problem of optimizing the structure and operating mode of heat and mass transfer systems for heat carriers consisting of a mixture of components with different boiling points . The solution of this problem is presented, which allows us to evaluate the efficiency of the technological system according to the selected objective function.

Ключевые слова: оптимизация, целевая функция, параметры оптимизации, математическая модель, многокомпонентные смеси, ректификация.

Keywords: optimization, objective function, optimization parameters, mathematical model, multicomponent mixtures, rectification.

В ряде технологий в нефтехимической и пищевой отраслях промышленности из исходного сырья требуется получить несколько готовых продуктов, каждый из которых обладает своими потребительскими свойствами. На нефтеперерабатывающих заводах в ректификационных установках происходит разделение нефтепродуктов на компоненты или фракции, которые имеют разные температуры кипения: бензин, керосин, лигроин, дизельное топливо, мазут и др. [1-3]. Производительность по готовым продуктам и экономическая эффективность таких систем могут существенно зависеть от структуры технологической схемы и режима ее функционирования. Разработка и реализация эффективных технологий получения готовых продуктов требуемого качества является актуальной задачей для пищевой, химической и энергетической отраслей промышленности.

Объектом предлагаемого исследования являются многопоточные многоступенчатые системы тепломассообмена [4]. В качестве предмета исследования рассматривается постановка и решение задач оптимизации многоступенчатых тепломассообменных систем, в которых в качестве одного из теплоносителей используется смесь компонентов с разными температурами кипения.

Целью исследования является повышение эффективности проектирования и функционирования многопоточных многоступенчатых систем, где один из теплоносителей является смесью компонентов с разными температурами кипения.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- постановка задачи оптимизации процессов тепломассообмена в системе многоступенчатых теплообменных аппаратов, один из теплоносителей в которой представлен многокомпонентной смесью;
- решение сформулированной оптимизационной задачи.

В общем виде задача выбора оптимальных технологических систем может быть сформулирована следующим образом [5,6]. Обозначим через $\boldsymbol{\alpha}$ –вектор известных параметров, $\mathbf{x}$ –искомый вектор решений как совокупность искомых параметров, **W**–целевую функцию или показатель эффективности решения, $\mathbf{u}$ –управление (регулирование) процессом. При заданном комплексе условий $\boldsymbol{\alpha}$ найти такое решение $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$, которое при управлении процессом $\mathbf{u}$ обеспечивает экстремальное значение показателя эффективности **W**

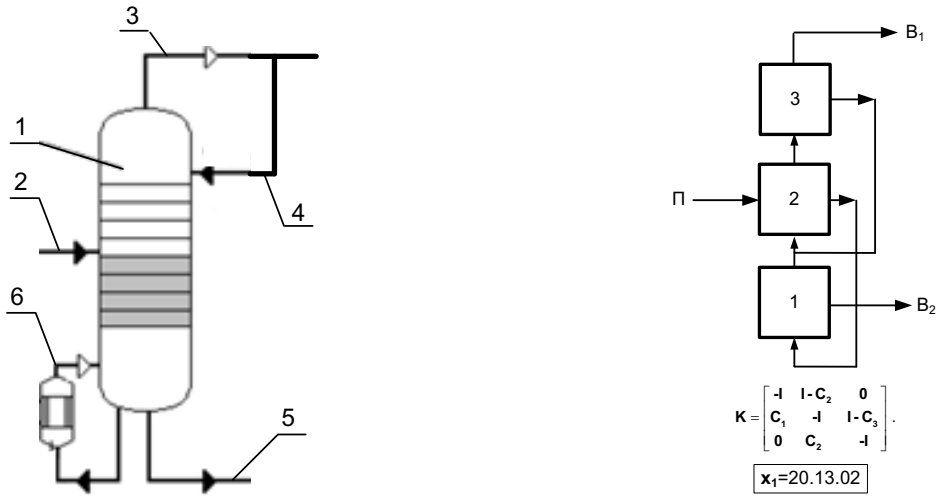
$$\mathbf{W} = \mathbf{W}(\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{x}, u) \Rightarrow \max_{\mathbf{x}}. \quad (1)$$

Для исследуемых тепломассообменных систем в качестве целевой функции предлагается использовать суммарную экономическую эффективность функционирования системы, которая определяется суммой произведений производительности системы по i-му готовому продукту B_i на его стоимостной показатель c_i:

$$\mathbf{W} = \sum_i c_i B_i(\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{x}, u) \Rightarrow \max_{\mathbf{x}}. \quad (2)$$

В качестве искомого вектора решений выбирается набор параметров, который однозначно определяет структуру системы и режим ее работы. Искомый вектор $\mathbf{x}$ представляется как совокупность двух векторов $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1 \ \ \mathbf{x}_2]$, первый из которых $\mathbf{x}_1$ определяет структуру системы, а второй $\mathbf{x}_2$ – режим ее работы.

Без ущерба для общности подхода к постановке оптимизационной задачи дальнейший анализ будем проводить на примере систем ректификации нефти [1-3]. Принцип действия и схема потоков в ректификационных колонках проиллюстрированы на рис. 1,а. Для описания набора искомых параметров, определяющих структуру системы, предлагается использовать код, который с помощью специально разработанной системы кодификации [7] позволяет однозначно определить структуру системы. Пример такого кода приведен на рис. 1,б для ректификационной колонки, представленной на рис. 1,а.



а) б)

Рисунок 1 – Ректификационная колонка (а), расчетная схема колонки, вид технологической матрицы **K** и код структуры схемы x_1 (б): 1–ректификационная колонка;2–исходная смесь (питание); 3–дистиллят; 4–флегма; 5–кубовый остаток; 6–испаритель кубового остатка. Обозначения: П–питание, B_i–выход i-го готового продукта

Для описания вектора искомых режимных параметров системы ($\mathbf{x_2}$) используются параметры модели, разработанной в рамках матричной формализации [8]. Многокомпонентные теплоносители в нефтехимии характеризуются массовым содержанием компонентов (фракций) с разными температурами кипения. Фракционный состав нефтепродуктов по истинным температурам кипения (ИТК) является одной из важных и широко используемых характеристик нефти. Состав нефти по ИТК выражается в виде массового распределения фракций по температурам кипения. Для расчета фракционных составов продуктов в любой точке системы из n ступеней при анализе m фракций нефтепродуктов используется матричная модель [8] в виде

$$\mathbf{K}\,\mathbf{F} = -\mathbf{F}_0, \tag{3}$$

где $\mathbf{K}$ – технологическая матрица размера n×n блоков или mn×mn элементов; $\mathbf{F}$ – блочная матрица-столбец размера n×1 блоков-столбцов или mn×1 элементов, описывающая фракционные составы продуктов на входе во все n элементов схемы; $\mathbf{F}_0$ – блочная матрица такого же размера, описывающая фракционные составы внешних продуктов, подаваемых в систему.

В качестве основной характеристики разделения фракции в ступени применяется кривая разделения ректификации $C(\Theta)$ [8], значение которой показывает вероятность перехода в дистиллят фракции с температурой кипения Θ. Для аппроксимации кривой $C(\Theta)$ выбирается зависимость, где в качестве параметра кривой используется граничное или медианное значение температуры Θ_0, при которой вероятность фракции перейти в дистиллят равна 0,5 [8]. Вектор $\mathbf{x_2}$ режимных параметров оптимизации задается в рамках рассматриваемой матричной модели распределением температуры Θ_0 по ступеням

$$\mathbf{x}_{2=} = \left[\Theta_{01} \quad \Theta_{02} \quad \cdots \quad \Theta_{0n}\right]. \tag{4}$$

Правила составления технологической матрицы $\mathbf{K}$ для системы с произвольными связями подробно описаны в работе [8]. Пример матрицы $\mathbf{K}$ для установки, представленной на рис. 1,а, приведен на рис. 1,б. При известных матрицах $\mathbf{K}$ и $\mathbf{F_0}$ решение матричного уравнения (3) позволяет рассчитать фракционные составы и производительности продуктов в произвольной точке системы, а при заданной стоимости готовых продуктов определить значение целевой функции оптимизации согласно (2). Уравнения (2) – (4) представляют математическую формулировку оптимизационной задачи систем многоступенчатых теплообменных аппаратов.

Результаты решения сформулированной задачи более подробно обсуждаются на примере системы, состоящей из двух ректификационных колонок. Число ступеней в расчетном примере равно шести (n=6), число контролируемых фракций семнадцати (m=17). В ходе решения задачи для выбранной структуры ($\mathbf{x_1}$=const) необходимо определить вектор режимных параметров ($\mathbf{x_2}=\mathbf{x_2}^*$), которому соответствует максимальное значение целевой функции (2). В качестве искомых режимных параметров рассматривается распределение температур (4) по шести ступеням.

Сформулированная оптимизационная задача (2) решается численно методом Монте-Карло (ММК) [6], для компьютерной реализации которого разработана программа в среде MATLAB. Найденное решение представлено в виде оптимального распределения температур по ступеням и фракционных составов трех целевых продуктов, которым соответствует максимальное значение целевой функции. Анализ показывает, что полученные результаты достоверно описывают процесс ректификации для многоступенчатой установки. Первый готовый продукт по фракционному составу соответствует бензиновой фракции, которая используется как компонент товарного автомобильного бензина. Второй продукт – керосиновая фракция, которая используется как топливо для реактивных и тракторных карбюраторных двигателей. Третий продукт близок по своим характеристикам к дизельной

фракции (лёгкий или атмосферный газойль, соляровый дистиллят), которая используется как топливо.

В качестве ограничений предложенного подхода следует отметить необходимость проведения дополнительных исследований, направленных на практическую реализацию оптимальных решений и на предварительное определение кривых разделения для отдельных тарелок или некоторой их совокупности.

Выводы

В рамках проведенных исследований сформулирована задача оптимизации процессов тепломассообмена в системе многоступенчатых теплообменных аппаратов, один из теплоносителей в которой представлен многокомпонентной смесью; получено ее решение для системы ректификационных колонок, проведен анализ полученных результатов. Представленный подход позволяет исследовать и оптимизировать многопоточные многоступенчатые установки, варьируя число ступеней и определяя распределение температуры по ступеням. Полученные результаты могут быть использованы в химической и пищевой отраслях промышленности для повышения эффективности ресурсо- и энерго сберегающих технологий и получения товарных продуктов с регламентируемым содержанием примесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майков В.П., Моругин К.К. Ректификация непрерывных смесей. Системно-информационный подход. М.: МИХМ, 1979. 88 с.

2. Кирсанов Ю. Г., Шишов М. Г., Коняева А. П. Анализ нефти и нефтепродуктов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 88 с.

3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 2006. 829 с.

4. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. Иваново: ИГЭУ, 2009. 176 с.

5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 488 с.

6. Таха Х. Введение в исследование операций. М.: Вильямс. 2005. 901 с.

7. Mizonov V.E., Zhukov V.P., Bernotat S. Simulation of Grinding: New Approaches. ISPU Press. Ivanovo, 1997. 108 p.

8. Матричный метод расчета сложных тепломассообменных систем с многокомпонентными теплоносителями / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков и др. // Вестник ИГЭУ. 2020. №. 1. С. 59 - 68.

УДК 66.021.4 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-135-137

ПУЛЬСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ ПРАНДТЛЯ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ ПО ДАННЫМ ПРЯМОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ TEMPERATURE PULSATION IN A FLAT CHANNEI AT LOW PRANDTL NUMBER ACCORDING TO DIRECT NUMERICAL SIMULATION

Чесноков Юрий Георгиевич
YuriiG. Chesnokov

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Россия, Санкт-Петербург
St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia, St. Petersburg
(e-mail: ygchesnokov@yandex.ru)

Аннотация: Анализ данных прямого численного моделирования процесса теплообмена в плоском канале при турбулентном режиме течения, полученных различными авторами, показывает, что статистические характеристики пульсаций температуры при малых числах Прандтля зависят не от чисел Рейнольдса и Прандтля по отдельности, а от числа Пекле. Число Пекле вычисляется по так называемой динамической скорости.

*Abstract:*Analysis of the data of direct numerical simulation of the heat transfer process in a flat channel in a turbulent flow regime, obtained by various authors, shows that the statistical characteristics of temperature fluctuations at low Prandtl numbers depend not on the Reynolds and Prandtl numbers separately, but on the Peclet number.The Peclet number is calculated from the so-called dynamic speed.

Ключевыеслова: турбулентныетечения, теплообмен, числоПрандтля, числоПекле.
*Keywords:*turbulent flows, heat transfer, Prandtl number, Peclet number.

В последние три десятилетия метод прямого численного моделирования нашел применение для изучения закономерностей процессов теплообмена в плоском канале при турбулентном режиме течения [1-5].В указанных работах на стенках канала задавался постоянный удельный поток теплоты q.При изучении распределения температуры и других статистических характеристик процесса теплообмена в окрестности стенки канала вводят в рассмотрение безразмерные переменные – так называемые переменные стенки. В качестве масштабов скорости, длины и температуры выбираются так называемые динамическая скорость u_τ,динамическая длинаl_τи динамическаятемператураt_τ, которые определяются по формулам:

$$u_\tau = \sqrt{\tau/\rho},\ l_\tau = \nu/u_\tau,\ t_\tau = q/\left(\rho c_p u_\tau\right).$$

Здесь τ – напряжение трения на стенке, ρ, ν и c_p– плотность, кинематическая вязкость и теплоемкость при постоянном давлении соответственно. Соответствующие безразмерные переменные называются переменными стенки и обозначаются при помощи надстрочного индекса «+». Такие характеристики процесса теплообмена, как число Нуссельта $Nu = 4\alpha h/\lambda$,зависят от двух безразмерных параметров – чисел Рейнольдса $Re = 4U_b h/\nu$ и Прандтля $Pr = c_p\mu/\lambda$. Здесь α – коэффициент теплоотдачи, h – полуширина канала, λ – коэффициент теплопроводности, U_b – средняя по сечению канала скорость,μ – коэффициент динамической вязкости. Отметим, что в качестве определяющего линейного размера для каналов с некруговым поперечным сечением принято использовать так называемый эквивалентный диаметр, который для плоского канала равен $4h$. Для жидких металлов число Прандтля является весьма малым (от 0.005 до 0.05). Как известно, в формулах для расчета числа Нуссельта в этом случае фигурируют не числа Рейнольдса и Прандтля по отдельности, а их произведение, т.е. число Пекле. Это относится и к процессам теплообмена в плоских

каналах. Так, авторы работы [6] предложили подобную формулу, построенную при помощи данных прямого численного моделирования процесса теплообмена в плоском канале.

Анализ данных, полученных в работах [1-5], показывает, что результаты расчетов лучше укладываются на единую кривую, если в качестве определяющего параметра использовать не число Пекле, вычисленное по средней скорости, а число Пекле, вычисленное по динамической скорости, $Pe_\tau = \rho c_p u_\tau h/\lambda = Re_\tau Pr$.Здесь Re_τ –число Рейнольдса, вычисленное по динамической скорости.Можно предложить, например, следующее соотношение:

$$Nu = 6.74 + 1.38Pe_\tau/lnPe_\tau + 0.0244Pe_\tau lnPe_\tau. \quad (1)$$

При построении этой формулы использовались данные, для которых $Pr = 0.007 - 0.05$, $Re = 11000 - 172000$. Обычно известной величиной является число Рейнольдса Re .Формула, позволяющая вычислить число Re_τ при известном числе Re в широком диапазоне изменения числа Re, имеется в работе [7].

Обозначим через ϑ^+ среднеквадратичное значение пульсации температуры в переменных стенки. В зависимости от расстояния до стенки эта величина ведет себя следующим образом [2,5]. Она равна нулю на стенке, монотонно увеличивается при увеличении расстояния до стенки и достигает некоторого максимального значения ϑ_m^+ на определенном расстоянии до стенки y_m^+, а затем монотонно убывает вплоть до оси канала.При малых значениях числа Прандтля величина ϑ_m^+ зависит не от величин Re_τ и Pr по отдельности, а от их произведения Pe_τ. Результаты, полученные при помощи метода прямого численного моделирования, неплохо описываются при помощи формулы:

$$ln\vartheta_m^+ = 2.78 - 5.85/(lnPe_\tau)^{0.584}. \quad (2)$$

Зависимости y_m^+ от Pe_τ при малых числах Прандтля на одну линию не укладываются.При малых числах Прандтля универсальный характер имеет зависимость y_m^+/Re_τотPe_τ. Расчет для указанного выше интервала значений параметров можно произвести по формуле:

$$ln(y_m^+/Re_\tau) = -0.86 - 0.0135Pe_\tau^{2.89}. \quad (3)$$

В непосредственной окрестности стенки канала величину ϑ^+ можно разложить в ряд Тэйлора по степеням y^+:

$$\vartheta^+ = a_1 y^+ + a_2 y^{+2} + \cdots.$$

Оказывается [8], что коэффициент a_1 этого разложения зависит как от числа Рейнольдса, так и от числа Прандтля, причем он, вообще говоря, не пропорционален числу Прандтля.Во всем изученном диапазоне изменения параметровпри малых числах Pe_τуниверсальнойявляется зависимость $a_1 Re_\tau$отPe_τ.Формула для расчета такова:

$$ln(a_1 Re_\tau) = -5.38 + 4.06(lnPe_\tau)^{0.537} \quad (4)$$

Выводы

Приведенные здесь результаты показывают, что при малых значениях числа Прандтля зависимости статистических характеристик пульсаций температуры от числа Пекле, вычисленного по динамической скорости, являются универсальными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kasagi N., Tomita Y., Kuroda A. Direct numerical simulation of passive scalar field in a turbulent channel flow // ASMEJ. HeatTransf., 1992, V.114, P.598-606..

2. Kawamura H., Oshaka K., Abe H., Yamamoto K.DNS of turbulent heat transfer in channel flow with low to medium-high Prandtl number fluid //Int. J. Heat and Fluid Flow. 1998. V.19. P.482-491.

3. Kawamura H., Abe H., Matsuo Y.DNS of turbulent heat transfer in channel flow with respect to Reynolds and Prandtl number effects // Int. J. Heat and Fluid Flow. 1999. V.20. P.196-207

4. Abe H., Kawamura H., Matsuo Y. Surface heat-flux fluctuations in a turbulent channel flow up to Reτ = 1020 with Pr= 0.025 and 0.71// Int. J. Heat and Fluid Flow. 2004. V.25. P.404-419.

5. Alcantara-Avila F., Hoyas S., Perez-Quiles M.J.DNS of thermal channel flow up to Reτ= 2000 for medium to low Prandtlnumbers // Int. J. Heat Mass Transf. 2018. V.127. P.349-361.

6. Abe H., Antonia R.A.Mean temperature calculations in a turbulent channel flow for air and mercury //Int. J. Heat Mass Transf. 2019. V.132. P.1152-1165.

7. Чесноков Ю.Г.Зависимость от критерия Рейнольдса интегральных характеристик течения в плоском канале // Изв. СПбГТИ (ТУ). 2016. №36. С.104-107.

8. Чесноков Ю. Г. О законе стенки для температуры // ТОХТ. 2017. Т. 51. №. 2. С. 230-234.

УДК 66.074.2 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-137-139

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ
IMPROVEMENT OF SECONDARY ENERGY RESOURCE UTILIZATION SYSTEMS

Карев Алексей Николаевич, Тюрин Михаил Павлович
Alexey N. Karev, Mikhail P. Turin

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: alexcarew777@yandex.ru)

Аннотация: Рассмотрены особенности утилизации тепла при помощи теплообменников контактного и поверхностного типа, их преимущества и недостатки, а также энергоэффективность данной технологии.

Abstract: The features of heat recovery using contact and surface type heat exchangers, their advantages and disadvantages, as well as the energy efficiency of this technology are considered.

Ключевые слова: контактный теплообменник, утилизация теплоты, энергоэффективность.

Keywords: contact heat exchanger, heat recovery, energy efficiency.

Создание и совершенствование систем утилизации вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) дает возможность наиболее полно удовлетворить потребности в энергии не путем ввода дополнительных мощностей, а за счет энергосбережения - одного из приоритетных направлений развития экономики России на современном этапе [1].

Большинство котлов в настоящее время работают на природном газе и имеют КПД 88-93% [3]. В тепловом балансе газовых котлов самые большие потери с отходящими газами (5-10%), поэтому единственная область энергосбережения - повышение КПД котлов за счет снижения данных потерь. Это можно сделать за счет уменьшения температура дымовых газов.

Ранее отмечалось, что минимальная температура дымовых газов для котлов составляет 120-130 °С. При этой температуре уходящих газов отсутствует конденсат в дымоходах и дымовых трубах, соответственно, увеличивается естественная тяга.

В большинстве котлов, по условиям длительной эксплуатации, фактическая температура дымовых газов составляет 180-200 °С. Следовательно, задача снижения температуры дымовых газов становится первостепенной [4].

Существуют различные технологии глубокого охлаждения продуктов сгорания. Температура выхлопа газов можно снизить до 50-65 °С за счет использования скрытой теплоты парообразования водяного пара. Следовательно, КПД (брутто) котельного агрегата увеличивается на 2-6%. Тепло дымовых газов может идти на нагрев сырой воды или химически очищенной воды, предварительный нагрев воздуха для горения, предварительный нагрев обратной сетевой вода в системе горячего водоснабжения, технологические нужды предприятий и другие [3].

В качестве теплообменника могут использоваться теплообменники контактного и поверхностного типов. Теплообменники контактного типа компактны и достаточно энергоэффективны. Дымовые газы охлаждаются до 40 °С, при этом 60-90% водяного пара конденсируется.

Главный недостаток - насыщение нагретой воды углекислым газом, эта вода может вызвать коррозию (pH = 3,5-5,0), что ограничивает его дальнейшее применение. Конденсат поглощает O_2 и CO_2 и приобретает более высокие коррозионные свойства. Это приводит к постепенному разрушение не только теплообменника, но и дымохода и дымовой трубы. Поэтому данное обстоятельство ограничивает охлаждение до температуры точки росы дымовых газов или требуется предварительный нагрев газов перед дымовой трубой, что экономически не целесообразно [3].

На рисунке 1 приведена принципиальная схема утилизации тепла уходящих газов, реализованная на котле Е-220-9,8-540, работающем на смеси природного и доменного газа (рисунок 1).

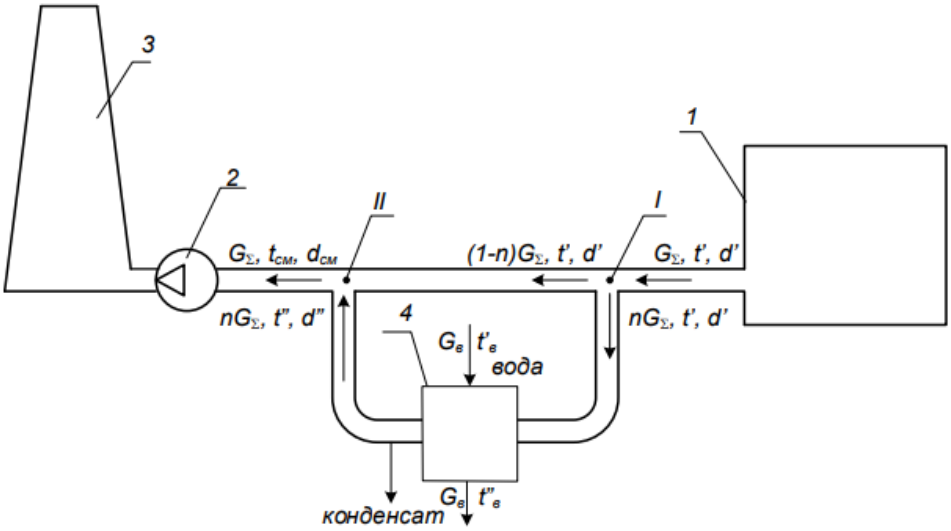


Рисунок 1 - Схема системы утилизации тепла дымовых газов:
1 - котел; 2 - вытяжной вентилятор; 3 – дымовая труба; 4 - контактный теплообменник.

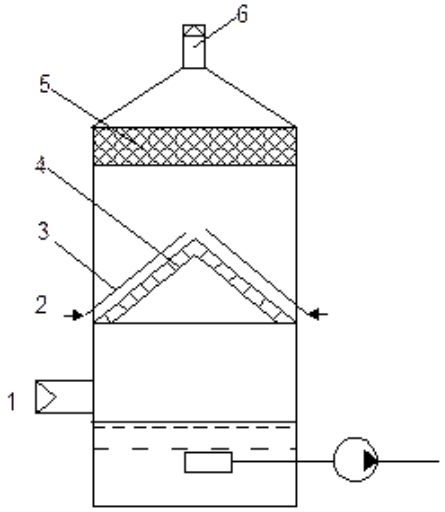


Рисунок 2 – Схема контактного теплообменника:
1 – выход дымовых газов; 2 – подача воды; 3 – оросительная труба; 4 – насадка;
5 – каплеуловитель; 6 – выход охлажденных продуктов сгорания.

Расчет производился при следующих исходных данных:

- топливо - смесь природного газа (2%) и доменного газа (98%) следующего состава:
- коэффициент избытка воздуха мимо котла 1,3;
- расход сухого газа мимо котла 99,34 кг/ с;
- температура дымовых газов за котлом 192 °С;
- температура дымовых газов на входе в дымовую трубу 162 °С;
- температура воды на входе в теплообменник 10 °С.

При заданных параметрах влажность дымовых газов мимо котла d= 0,05 кг/кг, а температура точки росы $t_р$ = 40,5 °С. Температура воды на выходе из теплообменника на 5 °С ниже температуры точки росы t_{max} = 50 °С.

Температура смеси двух потоков, прошедших через теплообменник и дымохода, в точке II была равна минимально возможной температуре $t_{см}$. Эта температура должна быть как можно меньше, что соответствует максимальной степени рекуперации тепла. С другой стороны, необходимо исключить возможность конденсации водяного пара из дымовых газов в дымоходе на и в дымовой трубе. Минимально возможная температура по расчетам получилась 76 °С.

В реальных условиях организация конденсации связана с ограничением доли использования дымовых газов, проходящих через теплообменник. Возможный диапазон доли расхода продуктов сгорания довольно узкий (не более 20%), что определяет предел тепловой мощности теплообменника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шадек Е., Маршак Б. Глубокая утилизация тепла отходящих газов теплогенераторов / Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. - 2014. Научно-технический журнал «СОК» № 2.

2. Шадек Е., Маршак Б., Крыкин И., Горшков В. Конденсационный теплообменник-утилизатор – модернизация котельных установок // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ, 2014. № 3 (24).

3. Кудинов А. А., Энергосбережение в теплогенерирующих установках. -М.: Машиностроение, 2012. -139 с.

4. Бянкин И.Г., Шацких Ю.В., Мельничук А.Е. 2010 Пятая Всероссийская конференция Теплообмен том 4 (Москва) с. 227

5. Бузников Е.Ф и др., Производственные и отопительные котельные / Е.Ф. Бузников, К.Ф. Роддатис. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 248 с.

6. Электронный ресурс. Журнал «АВОК». Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=1635

7. Термический КПД регенеративного цикла двигателя Стирлинга схемы гамма / Н. М. Шарпар, Л. И. Жмакин // Промышленные процессы и технологии. 2021. No 1. С. 89 – 98. DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-89-98

УДК 621.791.052:539.4 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-140-144

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ
A MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING THE HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES DURABILITY IN THE OIL REFINING INDUSTRY UNDER LOW-CYCLE LOADING

Ерофеев Валерий Владимирович *,, Игнатьев Андрей Геннадьевич ***, Трояновская Ирина Павловна **,***, Базанова Дарья Владимировна **, Шарафиев Роберт Гарафиевич *, Гильманшин Рустем Альбертович *,**
Valery V. Erofeev *, **, Andrey G. Ignatiev *, Irina P. Troyanovskaya **, ***, Daria V. Bazanova **, Robert G. Sharafiev *, Rustem A. Gilmanshin ***

**Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Уфа*
**Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa*
(e-mail: ervv52@mail.ru)
***Южно-Уральский государственный аграрный университет, Россия, Троицк*
*** South Ural State Agrarian University, Russia, Troitsk*
(e-mail: ervv52@mail.ru)
****Южно-Уральский государственный университет, Россия, Челябинск*
**** South Ural State University, Russia, Chelyabinsk*
(e-mail: ignat74@bk.ru)

Аннотация: Представлена математическая модель для оценки долговечности стальных вертикальных резервуаров в условиях малоциклового нагружения. Рассмотрен пульсирующий цикл нагружения объектов по схеме «слив – налив». Модель основана на использовании коэффициента эффективности концентрации напряжений. Она описывает кривую усталости материала при наличии эффекта концентрации напряжений.

Abstract: A mathematical model for assessing the vertical steel tanks durability under low-cycle loading is presented. A pulsating cycle for loading objects according to the «pouring – filling» scheme is considered. This model is based on the use the stress concentration efficiency factor. It describes the material fatigue curve with a stress concentration effect.

Ключевые слова: стальные вертикальные резервуары, долговечность, малоцикловое нагружение, математическая модель.

Keywords: steel vertical tanks, durability, low-cycle loading, mathematical model.

Одной из важнейших задач, стоящих перед топливно-энергетическим комплексом РФ, является повышение надежности и долговечности металлоконструкций резервуарного парка (в частности, стальных вертикальных резервуаров) в условиях малоциклового нагружения по схеме «слив – налив».

Анализ исследований, выполненных отечественными и зарубежными учеными [1–3 и др.], в области изучения поведения материалов при циклических напряжениях, вызывающих усталостное разрушение после небольшого числа циклов нагружения, показал, что в данной области нагружения наблюдается ряд существенных особенностей, которые необходимо учитывать при рассмотрении полной кривой усталости материалов. В частности, было установлено [3], что область ограниченной усталости (ломаная прямая ABCDE на рисунке 1, *а*) охватывает диапазон напряжений от $\sigma_в$ (предела прочности материала) до σ_r (предела выносливости материала при произвольном цикле нагружения *r*), делится на подобласти малоцикловой усталости (наклонные прямые I и II) и многоцикловой усталости (наклонная прямая III). Переход области малоцикловой усталости в многоцикловую осуществляется на уровне напряжений, отвечающих значению напряжения $\sigma_к$ (динамическому пределу текучести

материала при скоростях, соответствующих циклическому нагружению), которое при обычных условиях нагружения равно пределу текучести материала: $\sigma_к = \sigma_т$.

На рисунке 1 в качестве примера приведена полная кривая усталости материалов для случая пульсирующего нагружения по схеме «слив – налив» (при $r = 0$).

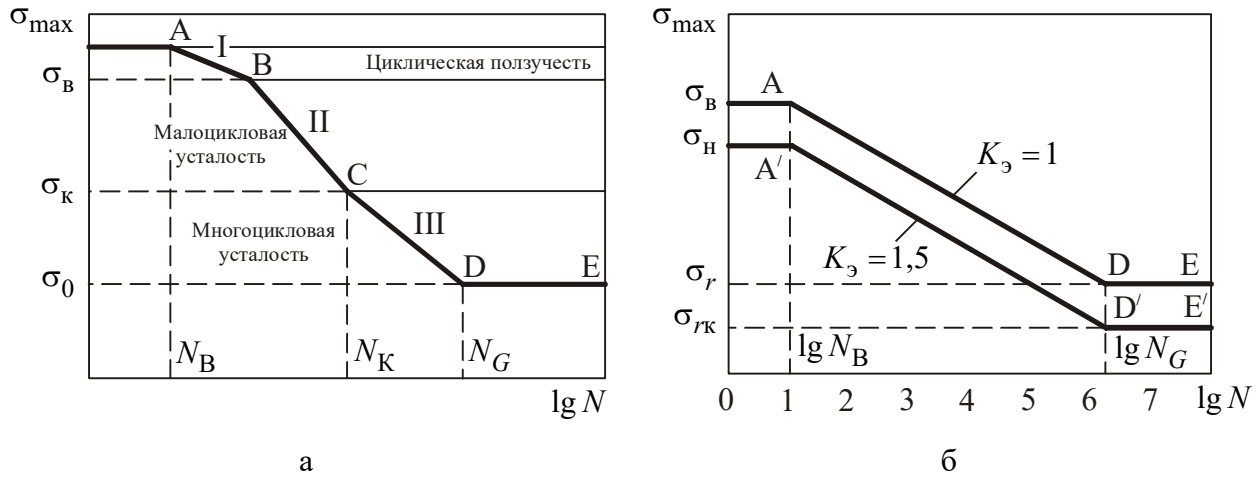


Рисунок 1 – Полная (*а*) и единая схематизированная (*б*) кривая усталости при $r = 0$.

В диапазоне циклов нагружения $N > N_G$, (N_G – минимальная граница диапазона) не наблюдается усталостное разрушение материалов, величина σ_{max} принимается в качестве предела выносливости материалов σ_0 (точка E на кривой усталости).

В области малоцикловой усталости можно выделить два характерных участка. На участке I, называемом участком циклической ползучести, разрушение пластических металлических материалов носит квазистатический характер с образованием шейки в месте излома. Для этого участка характерно непрерывное возрастающее с числом циклов нагружения накопление пластической деформации. При этом петля механического гистерезиса вплоть до разрушения образцов всегда остается открытой [3]. На участке II на поверхности разрушения отчетливо выделяется зона усталостного излома, и петля циклического деформирования (гистерезиса) становится замкнутой.

Как было показано в работе [4], для широкого класса конструкционных сталей в первом приближении можно принять $N_G = 2 \cdot 10^6$ и $N_В = 10$, а единую кривую усталости при пульсирующем цикле нагружения ($r = 0$) можно представить в виде ломанной прямой ADE, показанной на рисунке 1, *б*. Для построения данной схематизированной кривой усталости для конструкционных материалов необходима информация о пределе выносливости материала резервуара σ_0, угле наклона прямой AD, а также значениях границ диапазона циклов N_G и $N_В$.

Величина σ_0, как правило, определяется на основании длительных испытаний образцов, вырезанных из металлоконструкции (при нагружении порядка $10^6 \ldots 10^7$ циклов), либо пересчетом по известным значениям σ_{-1}, полученным экспериментально при испытаниях на усталость при симметричном характере нагружения ($r = -1$). Данный пересчет возможен при использовании аппроксимирующих соотношений, полученных на основании статистической обработки экспериментальных данных по σ_{-1}, приведенных в работах [5, 6 и др.] для различных марок конструкционных сталей. Наиболее приемлемой для расчетной оценки σ_{-1}, на наш взгляд, является зависимость, приведенная в работе [7]:

$$\sigma_{-1} = 0,285(1+\gamma)\sigma_в, \qquad (1)$$

где $\gamma = \sigma_т / \sigma_в$ – показатель деформационного упрочнения материала.

Для расчетного определения σ_0, характеризующего работу металлоконструкций по схеме «слив – налив», использовали взаимосвязь между известными значениями σ_0 и σ_{-1}, установленную на основе диаграммы А. Смита и подробно описанную в работе [8]. В

результате было получено окончательное выражение для определения предела выносливости материала при пульсирующем цикле нагружения σ_0:

$$\sigma_0 = \sigma_в \frac{0,57(1+\gamma)}{1+0,285(1+\gamma)}. \quad (2)$$

Таким образом, для построения единой схематизированной кривой усталости материала, представленной в виде ломанной прямой ADE, определены координаты реперных точек A ($\sigma_в$, N_B) и D (σ_0, N_G).

Важным этапом при определении предела выносливости стальных резервуаров $\sigma_{0к}$ является учет эффекта концентрации напряжений в их наиболее нагруженных участках, в качестве которых, как правило, выступают сварные соединения и геометрические несовершенства формы металлоконструкций (смещение кромок, угловатость и т.п.). Основными типами сварных соединений, применяемых для изготовления вертикальных стальных резервуаров, являются стыковые соединения, а также нахлесточные и тавровые соединения, выполненные угловыми швами. Данный эффект концентрации напряжений учитывается введением коэффициента концентрации напряжений K_σ, величина которого для различных видов сварных соединений и ряда геометрических несовершенств формы резервуаров может быть подсчитана по расчетным соотношениям, приведенным в работах [7–10].

Предел выносливости вертикальных стальных резервуаров σ_{0k} можно определить с учетом значений предела выносливости материала металлоконструкций или их сварных соединений σ_0 по известной информации о коэффициентах эффективности концентрации напряжений $K_э$, под которыми понимается отношение $K_э = \sigma_{0к} / \sigma_0$. Данный эффективный коэффициент концентрации напряжений может быть подсчитан по методике, изложенной в работах [4, 7, 8]:

$$K_э = 1 + q_\sigma (K_\sigma - 1), \quad (3)$$

где $0 \le q_\sigma \le 1$ – коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений [8], K_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

На основе обработки экспериментальных данных, приведенных в работе [11], была установлена зависимость $q_\sigma = q(K_\sigma, \sigma_в)$, с учетом которой выражение (3) можно представить следующим аппроксимированным соотношением:

$$K_э = 1 + \frac{K_\sigma - 1}{1 + \left(\tilde{\sigma}_{вн} / \sigma'_в\right)^2 (K_\sigma - 1)}, \quad (4)$$

где $\sigma_{вн}$ = 400 МПа – нормированная величина условного предела прочности.

Таким образом, по полученному значению параметра $K_э$ можно расчетным путем определить величину предела выносливости сварных вертикальных резервуаров с учетом фактора концентрации напряжений (координата точки D′ на рисунке 1, *б*):

$$\sigma_{0k} = \sigma_0 / K_э (\text{при } K_э > 1, N > N_G). \quad (5)$$

Для этого, исходя из анализа технического состояния металлоконструкции резервуара (наличия дефектов, угловатости, смещения кромок, основных геометрических параметров стыковых, нахлесточных и тавровых соединений), устанавливаются участки с повышенной концентрацией напряжений K_σ^{max}. Используя соотношение (4), по заданным свойствам материала или сварного соединения $\sigma_в$ и величине K_σ^{max} расчетным путем определяется максимальная величина $K_э^{max}$ и предел выносливости резервуара $\sigma_{0к} = \sigma_0 / K_э^{max}$ при $N > N_G$. (ордината точки D′).

Основные трудности построения единой диаграммы усталости с учетом фактора концентрации напряжений связаны с определением координаты точки A′. При малом числе циклов нагружения $N < N_B$, отвечающем циклической ползучести и квазистатическому

разрушению с образованием шейки на участке излома, наличие концентрации напряжений вносит специфичные особенности в характер деформирования металла в зонах, расположенных вблизи концентраторов. Так, например, вблизи концентраторов образуются пластические области, в которых происходит снижение уровня напряжений по сравнению с упругими распределениями, получаемыми из решения задач теории упругости. В соответствии с этим коэффициент концентрации напряжений в пластической области деформирования $\alpha_\sigma < K_\sigma$. При этом среднее номинальное напряжение в стенки резервуара $\sigma_{н,}$ при котором наблюдается предельно равновесное состояние вблизи концентратора напряжений, сопровождающееся процессом разрушения, имеющим квазистатический характер, с образованием шейки в месте излома, равно [12]:

$$\sigma_н = 0,5\sigma_в \frac{\alpha_\sigma + 1}{\alpha_\sigma}. \qquad (6)$$

Нетрудно заметить, что данное соотношение (6) при отсутствии концентрации напряжений (т.е. при $\alpha_\sigma = 1$) дает $\sigma_н = \sigma_в$ (ломанная кривая ADE на рисунке 1, *б*).

С другой стороны, использование соотношения (6) для корректировки единой диаграммы усталости (точки С), учитывающей фактор концентрации напряжений, требует определения коэффициента концентрации напряжений в упругопластической зоне α_σ. В работе [12] на основании подхода А. Нейбера была установлена связь между теоретическим коэффициентом концентрации напряжений K_σ и коэффициентом концентрации напряжений α_σ
в пластической зоне, которая была представлена следующими соотношениями:

при $1 < K_\sigma < 3$: $$\alpha_\sigma = 1 + \left[0,1 + 0,5(1-\gamma)\right]\left(K_\sigma - 1\right), \qquad (7)$$

при $K_\sigma > 3$: $$\alpha_\sigma = 1,2 + (1-\gamma) + 0,35(1-\gamma)\left(K_\sigma - 3\right). \qquad (8)$$

Таким образом, решена задача по установлению координат точки A′ , т.е. корректировки второго граничного условия, необходимого для определения наклона прямой на участке ограниченного предела выносливости материала с учетом фактора концентрации напряжений.

В качестве примера на рисунке 1,б приведена скорректированная единая кривая усталости сварных резервуаров с учетом эффекта концентрации напряжений (при $K_э = 1,5$).

С учетом скорректированных граничных условий было получено следующее выражение для определения параметра $m_к$, характеризующего угол наклона кривой в области ограниченной усталости:

$$\sigma_н = \sigma_в \frac{\alpha_\sigma + 1}{2\alpha_\sigma} = \frac{\sigma_0}{K_э}\left(\frac{N_G}{N_В}\right)^{1/m_к}, \qquad (9)$$

откуда $$m_к = \frac{5,3}{\lg\left[K_э \dfrac{\alpha_\sigma + 1}{\alpha_\sigma[0,57(1+\gamma) + 0,33]}\right]}. \qquad (10)$$

Таким образом, окончательное выражение для описания единой кривой усталости материалов при наличии эффекта концентрации напряжений имеет вид:

$$\sigma_{огр} = \frac{\sigma_0}{K_э}\left(\frac{N_G}{N_{огр}}\right)^{1/m_к}. \qquad (11)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Трощенко В.Т.*, *Сосновский Л.А.* Сопротивление усталости сталей и сплавов : справочник. Ч. 1, 2. Киев : Наукова думка, 1987. 324 с.

2. Циклические деформации и усталость металлов / Под ред. Трощенко В.Т. Киев : Наукова думка, 1985. 562 с.

3. *Терентьев В.Ф.*, *Оксогоев А.А.* Циклическая прочность металлических материалов. Новосибирск : НГТУ, 2001. 62 с.

4. *Когаев В.П.*, *Махутов Н.А.*, *Гусенков А.П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : справочник. М. : Машиностроение, 1985. 224 с.

5. *Труфяков В.И.* Усталость сварных соединений. Киев : Наукова думка, 1973. 216 с.

6. *Трощенко В.Т.* Усталость и неупругость металлов. Киев : Наукова думка, 1971 . 267 с.

7. Особенности разрушения материалов нефтегазопроводов / А.Г. Гареев [и др.]. Уфа : Гилем, 2006. 156 с.

8. *Николаев Г.А.*, *Винокуров В.А.* Сварные конструкции. Расчет и проектирование : учебник для вузов. М. : Высшая школа, 1990. 446 с.

9. *Турмов Г.П.* Определение коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях // Автоматическая сварка. 1976. № 10. С. 14-17.

10. К вопросу о расчетном определении коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях оболочковых конструкций, выполненных угловыми швами / В.В. Ерофеев, С.В. Ерофеев, Р.Г. Шарафиев, В.Б. Кульневич // Сб. научн. трудов ИПТЭР. Уфа, 2009. С. 13-16.

11. *Клыков Н.А.* Расчет характеристик сопротивления усталости сварных соединений. М. : Машиностроение, 1984. 160 с.

12. К расчетному определению коэффициента концентрации напряжений в упругопластической области нагружения / В.В. Ерофеев [и др.] // Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Информационные технологии. Проблемы и решения». Уфа : УГНТУ, 2020. Т.1 (5). С. 385-393.

УДК 004.942 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-145-148

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФФУЗИОННО-ОГРАНИЧЕННОЙ АГРЕГАЦИИ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ
MATHEMATICAL MODEL OF DIFFUSION-LIMITED AGGREGATION BASED ON A THREE-DIMENSIONAL STOCHASTIC LATTICE

Мусабекова Лейла
Musabekova Leila

Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова, Казахстан, Шымкент
M. AuezovSouthKazakhstanUniversity, Kazakhstan, Shymkent
(e-mail: mleyla@bk.ru)

Анотация: Данная работа посвящена разработке нового подхода моделирования процессов агрегации в полидисперсных системах без ограничения рассмотрения только бинарных столкновений. Представленный метод является расширением ранее разработанного авторами метода для случая трехмерной стохастической решетки. Такоерасширениеповышаетпрактическуюзначимостьидостоверностьрезультатовмоделирования.

*Abstract:*This paper is devoted to the problem of developing the newly efficient method for modeling the aggregation processes in polydisperse systems, without limitation of considering only binary collisions. The submitted method is an extension of the method previously developed by the authors for the case of a three-dimensional stochastic lattice. Such an extension increases the practical significance and reliability of the simulation results.

*Ключевые слова:*моделирования процессов агрегации, бинарные столкновения, стохастическая решетка, полидисперсные системы

*Keywords:*modeling of aggregation processes, binary collisions, stochastic lattice, polydisperse systems

Введение

В последнеевремя в различных фундаментальных и прикладных исследованиях особый интерес представляет изучение процессов агрегации дисперсных частиц в диффузионных моделях. Основу агрегации составляет соединение частиц дисперсной среды при их столкновении. Слияние частиц при столкновении могут происходить в результате броуновского движения частиц, сближением под воздействием сил гравитации, электромагнитных, гидродинамических и других сил.

В целом, можно выделить ряд областей современной науки о процессах и аппаратах химических технологий, в которых вопросы расчета кинетики и динамических характеристик реакторов с образованием полидисперсной твердой фазы в рабочем объеме чрезвычайно актуально [1]. Области применения моделей агрегации охватывают диапазон от производства тонких химикатов и фармацевтики до очистки окружающей среды и промышленных отходов [2]. Однако, несмотря на давний интерес исследователей и существование многих выдающихся работ [3], теоретический анализ многих проблем остается слабо развитым [4].

В работе показан новый подход, основанный на парадигме моделирования дискретных событий МДС (DES), который распространяется на случай трехмерных решеток. Новизна этого подхода заключается в том, что он позволяет исследовать распределение кластеров разных порядков по объему реактора в разные моменты времени.

Вклад полученных результатов в практику заключается в том, что они открывают возможность реального применения разработанной модели для описания процессов агрегирования в объеме промышленных устройств с учетом особенностей кинетики агрегации в объеме и у стен устройств. Рассмотрены случаи периодического и проточного трубчатого аппарата.

Согласно DES [5], область, в которой происходят процессы диффузии и агрегации, покрывается фиксированной пространственной решеткой [6]. Более того, в отличие от предыдущих работ, в этом случае рассматривается трехмерный массив для описания агрегации с диффузионным ограничением ДОА (DLA), а для описания агрегации в случае смешанной кинетики при конкуренции между характерными временами должны быть описаны процессы диффузии и агрегации [7]. Такой алгоритм позволяет учитывать разные временные масштабы диффузионных процессов и процессов агрегации. В этой статье описан только случай DLA. Таким образом, характерное время агрегации полностью определялось характерным временем диффузии частиц, которое предполагалось равным времени дрейфа частиц из одной ячейки решетки в другую. Далее термин «порядок кластеров» будет означать количество частиц-мономеров в данном кластере.

1. Алгоритм для периодического реактора

Алгоритм описан ниже в соответствии с ранее обсуждаемой работой [7]. А именно, в каждый момент времени был сделан случайный выбор дрейфовых составляющих частицы в горизонтальном и вертикальном направлениях. Выбор был сделан из заданного набора характерных смещений. Этот набор был сформирован с учетом порядка перемещения кластера, а именно: предполагалось, что подвижность кластера зависит от его порядка. Для кластеров более высокого порядка подвижность уменьшалась, что соответствует известной физике случайного дрейфа частиц в объеме [8]. Если из последовательности (-3; -2; -1; 0; 1; 2; 3) может быть сделан случайный выбор одного временного смещения вдоль заданного направления для кластеров порядка 1 или 2, то для кластеров, имеющих порядки выше чем два и меньше четырех, выбор должен быть сделан из последовательности (-3; -2; -2; -1; -1; 0; 0; 1; 1; 2; 2; 3).

Таким образом, моделируется увеличение вероятности перемещения кластеров более высоких порядков в более близкие ячейки в течение временного шага. Поведение кластеров вблизи стенок также может быть учтено в общем случае путем изменения последовательности случайного выбора перемещений. В численном эксперименте, применяемом к реактору периодического действия, предполагалось, что частицы, захваченные в граничных ячейках, обнуляют смещения в случае случайного отбора, который ведет за границы рассматриваемой решетки [7].

Кластер порядка 1 изначально был помещен в каждую ячейку. Затем процесс случайного перехода частиц от клетки к клетке повторяли на каждом временном шаге. Агрегация частиц происходит немедленно (случай DLA) в момент их столкновения, то есть без какой-либо задержки, после того как они попадают в общую ячейку. В отличие от двумерного случая [7], были сформированы два трехмерных массива. Первый массив моделировал всю решетку с частицами разных порядков, полученными в процессе смещений и агрегации на каждом временном шаге. Во втором массиве указано количество столкновений частиц в каждой ячейке в каждую единицу времени.

2.Алгоритм для проточного трубчатого реактора

Алгоритм кратко описан ниже в соответствии с ранее обсуждаемой работой [9]. Во время расчета формируются четыре трехмерных массива. Первый массив имитирует всю решетку с кластерами разных порядков, полученными в процессе смещений и агрегации в каждой единице времени. Второй массив имитирует аналогичную решетку с кластерами, которые попадают в реактор со свежим потоком, который поступает в реактор с заданной средней горизонтальной скоростью. Третий массив имитирует ситуацию в конце расчетной единицы времени и генерирует исходную ситуацию для следующей единицы. Он формируется как сумма двух предыдущих массивов. Четвертый массив указывает количество столкновений частиц в каждой ячейке в каждой единице времени.

3. Результаты моделирования

На рисунках1,2показаны некоторые численные результаты, где каждая точка усредняется по десяти сериям расчетов для нескольких безразмерных скоростей потока w = 0, 2, 4. В процессе моделированиядля единицы времени, используется шаг расчета.

Количество кластеров порядков выше 5 существенно меньше, чем кластеров с наименьшими порядками в объеме реакторов[10, 11]. Таким образом, данные кластеры не везде изображенына рисунках. На рисунке 2 пунктирные линии показывают некоторые гладкие кривые методом минимальных квадратов.

Результаты численных экспериментов показали, что изменение числа кластеров в объемном периодическом реакторе происходит на начальной стадии процесса агрегации с гораздо большей скоростью, чем это явление было описано численным экспериментом на плоской решетке. Завершение процесса с образованием единого кластера (так называемое гелеобразование) также наблюдается значительно быстрее. Такой результат не следует интерпретировать однозначно, поскольку зависимость подвижности кластеров от их порядков может быть разной для разных реальных физико-химических систем. В проточном реакторе распределение размеров кластеров также изменяется в начальной секции около входа в реактор, но длина переходной секции длиннее, чем показывает эксперимент на плоской сетке.

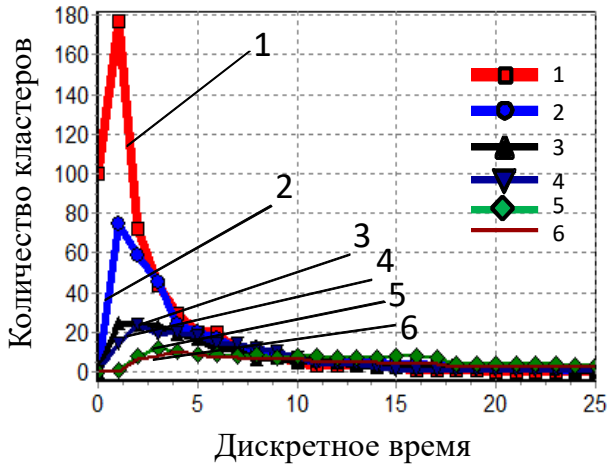


Рисунок 1 – Временная диаграмма количества кластеров разного порядка для w = 0 (реактор периодического действия). Эксперимент для случая DLA. Порядки кластеров: 1-й, 2-й, 3-й, 4-й, 4-й, 5-й, 6-й, шестой.



Рисунок 2 – Временная диаграмма количества столкновений разного порядка для w=0 (реакторпериодического действия). Эксперимент для случая DLA. Порядки кластеров: 2-й, 3-й, 4-й четвертый.

Заключение

По мере увеличения скорости потока стабилизация фракционного состава по длине реактора происходит на более коротком начальном участке. Это наблюдение согласуется с известными данными [12]. Подобно тому, как это наблюдалось в численных экспериментах на плоской решетке, моделирование агрегации на трехмерном массиве показывает, что общее число столкновений с кратностью, большей двух, нельзя игнорировать в начальной области перехода. Однако кратность столкновений быстро уменьшается с удалением от начальной части из-за уменьшения объемной концентрации кластеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gholizadeh R., Wang Y., 2018, Molecular dynamics simulation of the aggregation phenomenon in the late stages of silica materials preparation //Chemical Engineering Science, 184, c. 62–71.

2. Markus A.A., Parsons J.R., Roex E.W.M., De Voogt P., Laane R.W.P.M., 2015, Modeling aggregation and sedimentation of nanoparticles in the aquatic environment //Science of the Total Environment, 506, c. 323-329.

3. Zhou X.H., Huang B.C., Zhou T., Liu Y.C., Shi H.C., 2015, Aggregation behavior of engineered nanoparticles and their impact on activated sludge in wastewater treatment //Chemosphere, 119, c. 568-576.

4. 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.

5. Zeigler B.P., Sarjoughian H.S., 2012, Guide to Modelling and Simulation of Systems of Systems (Simulation Foundations, Methods and Applications), Springer-Verlag, London, UK.

6. Brener A. M. Model of many-particle aggregation in dense particle systems// Chemical Engineering Transactions (CET).2014. V.38.P.145-150.

7. Brener 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.

8. Tammet H., 1995, Size and mobility of nanometer particles, clusters and ions //Journal of Aerosol Science, 26(3), c. 459-475.

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. MusabekovaL., ZhumataevN., YunussovaA., DausheyevaN., ZhidebayevaA.Development of the Stochastic Lattice Model for Describing Aggregation Processes in the Polydisperse Systems (3D Case)// Chemical engineering transactions, vol.76. 2019. P.823-828.

11. Мусабекова Л. Разработка компьютерной стохастической модели агрегации в дисперсных системах//Сборник научных трудов Международного Косыгинского форума. Международного научно-технического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения: «Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование», приуроченные к 100-летию РГУ имени А.Н. Косыгина». Москва. Т.2. 2019. с.194-199.

12. Shadrack J.B., Klein R., Site L. D., 2018, Structural Locality and Early Stage of Aggregation of Micelles in Water: An Adaptive Resolution Molecular Dynamics Study //Advanced Theory and Simulations, 1, DOI: 10.1002/adts.201800025.

УДК 536.12.33 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-149-153

РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТАЛЬПИИ ТЕРНАРНЫХ СИСТЕМ ПРИ ВЛИЯНИИ НАНОПОРОШКА ГИДРАЗИНА
CALCULATION OF THE CHANGE IN THE ENTHALPY OF TERNARY SYSTEMS UNDER THE INFLUENCE OF A NANOPOWDER OF HYDRAZINE

Сафаров Шохин Рустамович, Ойматова Хожармо Холмуродовна, Сафаров Махмадали Махмадиевич, Собиров Джурабой Файзалиевич
Sh. R. Safarov, Kh. Kh. Oimatova, M.M. Safarov, J. F. Sobirov

Бохтарский государственный университет имени Носира Хусрава
Bokhtar State University named after Nosir Khusrav
Таджикский технический университет имени М. Осими
Tajik Technical University named after M. Osimi
(e-mail: Safarov88-88@mail.ru, mfmfd1@mail.ru, s.j.f60@mail.ru)

Аннотация: Проведено расчётное исследование методом сканирующего калориметра с изменением энтропии для определения изменения энтальпии трёхкомпонентных систем кремниевой кислоты, многослойной углеродной нанотрубки и нанопорошка гидразина в интервале температур от 290 до 625К. А также получена зависимость энтальпии от температуры.

Abstract: A computational study was carried out using a scanning calorimeter method with entropy change to determine the enthalpy change of three-component systems of silicic acid, multilayer carbon nanotube and hydrazine nanopowder in the temperature range from 290 to 625K. And also the dependence of enthalpy on temperature was obtained.

Ключевые слова: тернарная система, изменения энтальпия, гидразин, многослойная углеродная нанотрубка, кремниевая кислота, температура, нагревание.

Key words: ternary system, enthalpy changes, hydrazine, multilayer carbon nanotube, silicic acid, temperature, heating.

Раздел физики, к которому мы обратимся, - это «Учение о теплоте». Уже по названию можно сказать, что речь идет об описании явлений, связанных с теплыми или холодными предметами и телами.

Жизнь на Земле стала возможной только благодаря гигантскому потоку тепла, который приходит от Солнца. Климат и погода на Земле определяются главным образом тепловыми процессами (Под “тепловым” здесь понимается “относящееся к учению о теплоте”).

При постоянном давлении скрытая теплота превращения равна изменению энтальпии. Например, для фазового превращения твердых тел формула примет вид:

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T} \text{ отсюда } \Delta H = \Delta S \cdot T \quad (1)$$

где ΔH – изменение энтальпии, Дж; T – температура [1, с. 15].

Для расчета изменения энтальпии системы, в которой нет химической реакции, а только происходит изменение температуры, например, при постоянном давлении, воспользуемся определительным выражением изобарной теплоемкости:

$$\mathrm{C_p} = \frac{\partial H}{\partial T}, \qquad \text{отсюда } dH = \mathrm{C_p} dT \ [1, c. 17]. \quad (2)$$

Существует и другое определение энтальпии - это количество энергии системы или материального тела, которое доступно для преобразования в теплоту при определенной температуре и давлении.

История исследования гидразина тесно связана с историей изучения других соединений, содержащих связь азот - азот. До 1887 г. был известен и получен в свободном состоянии только один типовой азотоводород, а именно аммиак [3, с. 68, 12].

Скотт, Джонес и Льюис [2, с. 5, 95, 20, 78] опубликовали сообщение относительно взрывчатых свойств гидразина (и гидрата гидразина); в соответствии с их данными следует более подробно рассмотреть опасности, возникающие при производстве, хранении, транспортировке и использовании этих веществ.

Многостенные (многослойные) углеродные нанотрубки отличаются от однослойных более широким разнообразием форм и конфигураций. Струк-тура напоминает скатанный рулон или свиток. Для всех рассмотренных структур среднее расстояние между соседними слоями, как и в графите, равно 0,34 нм. По мере увеличения числа слоев все в большей степени проявляются отклонения от идеальной цилиндрической формы. В некоторых случаях внешняя оболочка приобретает форму многогранника [4, с 40].

Кремниевые кислоты – это силикаты. Обычно они нерастворимы в воде, исключения составляют силикаты натрия и калия, их называют «жидким стеклом». Силикаты широко распространены в природе. Свойства силикатов различны в зависимости от их состава и строения, очень часто они имеют красивую окраску, некоторые из них используются в ювелирном деле (гранат, топаз, изумруд). Они имеют различный состав и строение.

Целью нашей работы является исследование и выявление значения изменения энтальпии тернарных систем, кремниевой кислоты и многослойной углеродной нанотрубки при влиянии нанопорошка гидразина.

Наша система состоит из следующих компонентов и они разделены на три концентрации: первая концентрация состоит из 20г (76,9%) кремниевой кислоты, 5г (19,3%) гидразина и 1г (3,8%) многослойной углеродной нанотрубки; вторая концентрация состоит из 25г (69,1%) кремниевой кислоты, 10г (27,6%) гидразина и 1,2г (3,3%) многослойной углеродной нанотрубки; третья концентрация состоит из 30г (64,5%) кремниевой кислоты, 15г (32,3%) гидразина и 1,5г (3,2%) многослойной углеродной нанотрубки.

В данной работе для исследованния компонентов тернарных систем при влиянии нанопорошка гидразина был использован сканирующий колориметр.

Кроме того, изменение внутренней энергии для исследуемых тернарных смесей экспериментально было изучено сканирующим калориметром. Экспериментальная установка (сканирующий калориметр) в основном состоит из нагревателя, контейнера с компонентами тернарных смесей и термопарой, подставки для контейнера и самописца, подключаемого к персональному ЭВМ при помощи кабеля USB. Питание самописца осуществляется то+5 Вольт, подаваемых с контакта питания разъема USB. Нагреватель используется для нагревания контейнера с тернарной системjq, а подставка – для охлаждения. Общая относительная погрешность измерения удельной изобарной теплоемкости при доверительной вероятности α=0,95, равна 2,8% [5, с. 87].

Используя формулы 1 и 2, мы рассчитали изменение энтальпии при нагревании тернарных систем. Результат обработки для первого объекта приведены в таблице ниже.

Таблица 1 – Изменение энтальпии тернарных смесей, кремниевой кислоты, МСУНТ при влияние нанопорошка гидразина по первому образцу (76,90% H_2SiO_3+19,30%N_2H_4+3,80%МСУНТ)

При нагревании											
Опыт №1				**Опыт №2**				**Опыт №3**			
Т,К	ΔН, кДж	Т,К	ΔН, кДж	Т,К	ΔН, кДж	Т,К	ΔН, кДж	Т,К	ΔН, кДж	Т,К	ΔН, кДж
300		550	780,2	296		535	92,5	281		529	115,9
308	17,1	556	26,5	296	0,0	548	56,4	281	0,0	549	86,8
332	55,4	562	26,8	305	18,9	562	62,6	292	22,2	563	62,8
356	59,4	570	36,3	330	57,5	575	59,6	325	74,5	578	69,6
366	25,7	580	46,5	360	75,2	586	51,9	358	82,4	591	61,9
366	25,7	585	23,6	392	88,4	598	58,1	380	58,6	604	63,7
365	23,0	593	38,3	426	105,3	606	39,3	405	72,3	614	49,9
365	23,0	600	34,0	459	111,8	616	50,1	433	92,4	622	40,8
370	13,7	605	24,6	490	115,5	622	30,6	468	122,5	630	42,9
550	758,0	612	34,8	513	91,0			501	126,8		

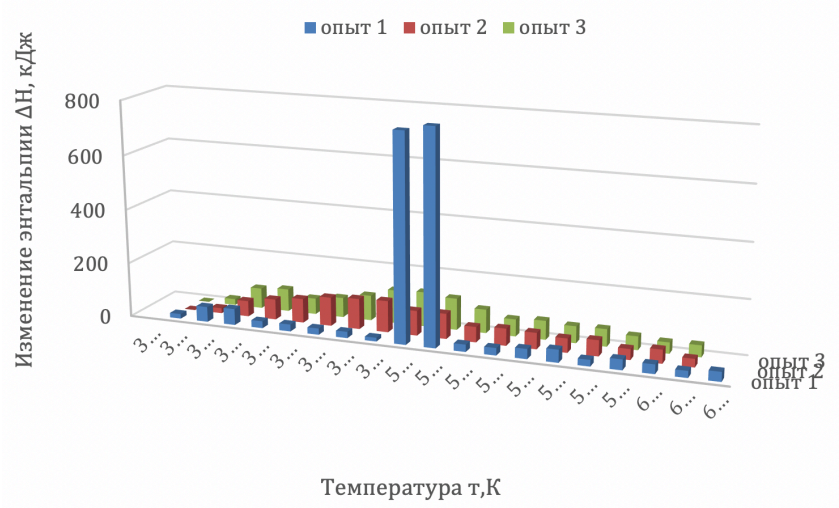


Рисунок 1 – Изменение энтальпии тернарных систем кремниевой кислоты и многослойной углеродной нанотрубки под влиянии нанопорошка гидразина при нагревании.

Из графика видно, что при влиянии нанопорошка гидразина на тернарную систему, кремниевую кислоту и многослойную углеродную нанотрубку, максимальное значение энтальпии появляется в трёх первых опытах во всех образцах. Причина в том, что в трёх первых опытах во всех образцах существует фазовые переходы. Именно максимальное значение появляется при фазовом переходе. В остальных опытах изменение энтальпии в начале стабильно увеличивается , а потом уменьшается.

Чтобы обобщить экспериментальные данные по энтальпии исследуемых веществ в зависимости от температуры нами была использована следующая функциональная зависимость:

$$\frac{\Delta H}{\Delta H_0} = f\left(\frac{T}{T_0}\right) \qquad (3)$$

где, ΔH – энтальпия исследуемого образца в зависимости от температуры; ΔH_0 –энтальпия исследуемого образца при T_0; T– температура, при которой проводилось испытание.

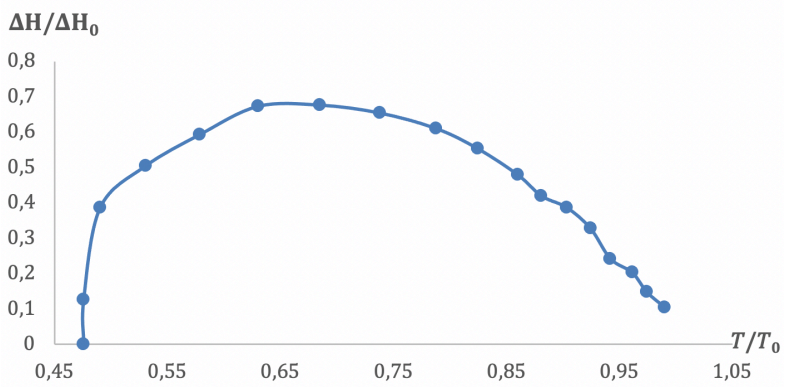


Рисунок 2 – График зависимости относительной энтальпии $\frac{\Delta H}{\Delta H_0}$ от относительного температуры $\frac{T}{T_0}$.

Соотношение (3) для исследуемых нами образцов выполняется достаточно хорошо, т.е. экспериментальные данные по энтальпии тернарных систем укладываются вдоль общей кривой (рисунок 2), которая описывается уравнением:

Кривая линия приведенный на рисунке 3 имеет формулу:

$$\Delta H = \left[-7{,}9667\left(\frac{T}{T_0}\right)^2 + 11{,}569\left(\frac{T}{T_0}\right) - 3{,}4948\right] \cdot \Delta H_0 \qquad (4)$$

Анализ значения ΔH_0 показало, что они являются функциями массы нанопорошка гидразина:

$$\Delta H_0 = f(m) \qquad (5)$$

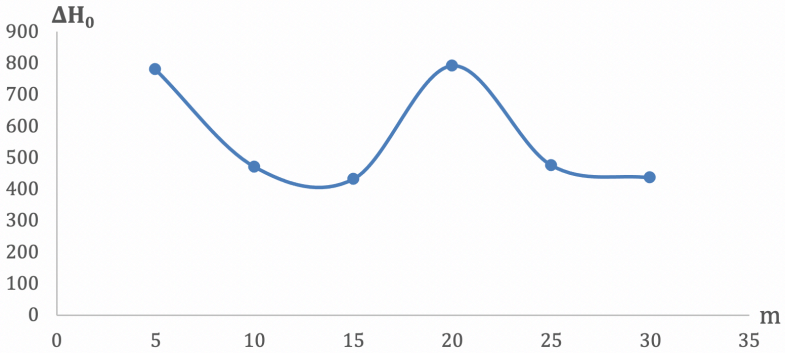


Рисунок 3 – Зависимость изменения энтальпии ΔH_0, тернарных систем от массы гидразина.

Изображенные на рисунке 3 описываются уравнениями:

$$\Delta H_0 = 0{,}0793(n)^2 - 13{,}611(m) + 208{,}5 \qquad (6)$$

С учетом выражений (4) и (6) соотношение для расчета энтальпии исследуемых тернарных систем в интервале температуры 290 – 625 К выглядит следующим образом

$$\Delta H = \left[-7{,}9667\left(\frac{T}{T_0}\right)^2 + 11{,}569\left(\frac{T}{T_0}\right) - 3{,}4948\right] \cdot (0{,}793(m)^2 - 13{,}611(m) + 208{,}5) \qquad (7)$$

Проверка уравнения (7) показала, что оно с погрешностью $\pm 4{,}2\%$ описывает энтальпия исследуемых объектов в интервале температур 290К - 625К (тернарных систем) при различных температурах и концентрациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е.И. Степановских. Расчет изменений энтропии в системах без химического превращения: учебное пособие/ Л.А.Брусницына. под. Ред. Ю. Н. Макурин. -УГТУ-УПИ.: Екатеринбург. 2008. -15-17с
2. MacLarren. Avtomotive end aviation industries., 5, 95, 20, 78 (August 15. 1946).
3. Leonard J. Am. Rocket soc.1946-68, 12c.
4. Джаманбалин К.К. Углеродные нанотрубки хризотил-асбеста: Учебно-методическое пособие/ Костонай. 2016-40с.
5. Ойматова Х.Х. Влияние порошка гидразина на изменение удельной теплоёмкости бинарных систем кремниевой кислоты и многослойной углеродной нанотрубки./ Ойматова Х.Х., Сафаров Ш.Р., Гуломов М.М., Нажмуддинов Ш.З., [3]Зарипова М.А., Махмадалии Курбонали, Рафиев С.С.// Вестник. Таджикского национального университета. Серия естественных наук. № 3. Душанбе. – 2019 .- 276.- С.

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-153-157

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ПРЯМО- И ПРОТИВОТОЧНОГО РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАССООБМЕННОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО АППАРАТА
COMPARISON CALCULATING OF APPARATUS WITH SPRAY OF LIQUID FOR INTERPHASE MASS EXCHANGE AT DIRECT AND REVERSE GAS FLOW

Симаков Николай Николаевич
Nikolai N. Simakov

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны
Россия, Ярославль
Yaroslavl Higher Military School of Air Defense
Russia, Yaroslavl
(e-mail: nik_simakov@mail.ru)

Аннотация: Представлены результаты сравнительного расчета прямо- и противоточных массообменных распылительных аппаратов с использованием зависимости $C_d = 2000/\mathrm{Re}^2$ в раннее предложенной модели гидродинамики и массообмена фаз в факеле распыла.

Abstract: The article presents the results of a comparative calculation of direct flow and counter flow mass transfer spray apparatuses using the dependence $C_d = 2000/\mathrm{Re}^2$ in the earlier proposed model of hydrodynamics and mass transfer of phases in a flow of spray.

Ключевые слова: форсунка, распыливание жидкости, двухфазный поток, ранний кризис сопротивления капель, расчет массообмена в аппарате.

Keywords: nozzle, liquid spraying, two-phase flow, early crisis of droplets drag, calculation of interphase mass exchange in the apparatus.

Распыливание жидкости в газе, например, с помощью форсунок широко используют в ряде отраслей экономики: химических технологиях, энергетике, транспорте… Это делают с целью интенсификации тепломассообмена фаз путем увеличения поверхности их раздела в процессах сушки и гранулирования полимеров, мокрой очистки воздуха от пыли и вредных газовых примесей, сжигания жидких топлив и т.п.

Актуальность данной работы автора также, как предыдущих [1, 2] по той же проблеме, обусловлена тем, что удовлетворительные методы расчета таких процессов до сих пор недостаточно разработаны. Одной из причин этого является то, что в моделях факела распыла при расчете межфазного взаимодействия в сильно турбулентном потоке не учитывали существенную особенность, а, именно, возникновение *раннего кризиса сопротивления* капель, обнаруженное в эксперименте [3, 4].

Описанная в работе [5] модель гидродинамики факела распыла с учетом раннего кризиса сопротивления капель, будучи дополненной уравнениями, описывающими их массообмен с газовым потоком [2, 1], позволяет рассчитать в согласии с опытными данными двухфазный поток с межфазным массообменом.

Для учета раннего кризиса сопротивления в этих моделях предложено два способа. Для свободного факела распыла вполне подходит полученная из экспериментальных данных зависимость коэффициента сопротивления капель $C_d(r, z)$ от координат точек в факеле распыла. В работах [5,2,1] при проведении расчетов факела распыла использовались формулы

$$C_d(r, z) = C_d(0, z) \cdot (0.45 \cdot \exp(-6 \cdot r / r_m(z)) + 0.55), \quad (1)$$

$$C_d(0, z) = 0.45 \cdot (z/0.1)^{-3/4}. \quad (2)$$

На оси факела распыла уменьшение C_d с увеличением расстояния z от форсунки вполне удовлетворительно аппроксимировалось формулой (2), как показано в работе [5].

Недостаток этого способа в том, что поле скоростей газа в распылительном аппарате из-за влияния стенок корпуса может сильно отличаться от поля скоростей в свободном факеле. Для устранения этого недостатка следовало бы перейти к обычной зависимости коэффициента сопротивления $C_d(\mathrm{Re})$ от числа Рейнольдса.

В работах [3,4] для капель, движущихся по оси свободного факела, в качестве хорошего приближения при 40 <Re <110 была предложена формула

$$C_d = 2000/\mathrm{Re}^2. \quad (3)$$

В дальнейшем было показано, что эта зависимость справедлива не только на оси свободного факела, но и в других частях занимаемого им пространства. Поэтому предложено использовать формулу (3) для расчета двухфазного потока в распылительных аппаратах. Кроме того, стоит учесть, что в автомодельной зоне факела распыла при z> 300 mm C_d мало:

$$C_d(r, z) \simeq 0.1, \quad (4)$$

- с приблизительным отклонением ± 0.05.

Новый, сравнительный, расчет гидродинамики и межфазного массообмена в распылительном аппарате, работающем в прямо- или противоточном режиме, с использованием формулы (3) явилось *целью* данной работы.

Результаты расчета характеристик прямо- и противоточного режимов распылительного аппарата представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 показаны зависимости расхода газа V от перепада его давления ΔP на аппарате. Очевидно, с ростом противодавления ΔP газа его расход V через аппарат уменьшается, при $\Delta P \simeq 18$ Pa расход газа изменяет знак, вместе с направлением интегрального течения, и затем растет по модулю вместе с ΔP. Заметим, что обратная зависимость $V(\Delta P)$ в случае прямоточного режима называется гидравлической характеристикой распылительного аппарата, определяющей максимальный расход V_m газа при $\Delta P \to 0$ и максимальный перепад давления ΔP при $V \to 0$.

На рис. 2. Показаны расчетные зависимости средней по (выходному для газа) сечению аппарата концентрации <c> газовой примеси и ее извлеченного количества |V|(1 − <c>) от расхода V газа в аппарате радиусом R_A = 140 mm, высотой H = 1100 mm в режимах прямотока (V> 0) и противотока (V <0).

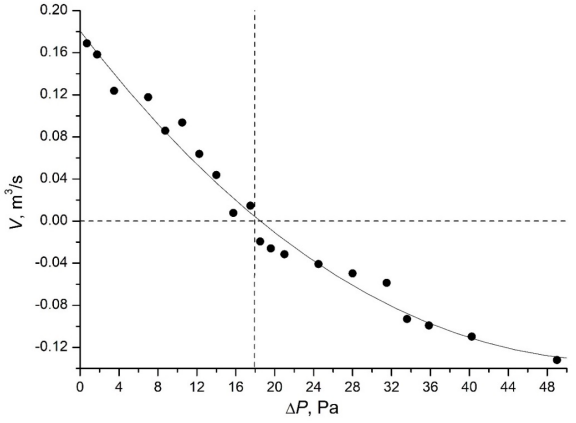


Рисунок 1 – Зависимость расхода V газа от перепада давления ΔP в аппарате.

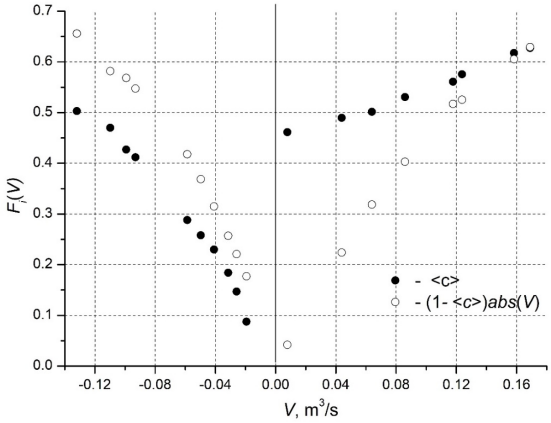


Рисунок 2 – Расчетные зависимости средней концентрации <c> газовой примеси и ее извлеченного количества $|V|(1 - \langle c \rangle)$ от расхода V газа в аппарате в режимах прямотока и противотока.

На рис. 2 очевидно, в прямотоке ($V > 0$) минимальная концентрация $\langle c \rangle \simeq 0{,}46$ примеси газа в нижнем сечении $j=1100$ на выходе обеих фаз из аппарата достигается при $V \simeq 0.008$ m^3/s. А в противотоке ($V < 0$) в верхнем, выходном для газа сечении $j=0$, минимальная концентрация $\langle c \rangle \simeq 0{,}088$ − в 5 раз меньше при вдвое большем по модулю расходе $|V| \simeq 0.019$ m^3/s газа. Таким образом, *при малом расходе газа* степень его очистки в противоточном режиме значительно выше, чем в прямоточном.

При одинаковом по модулю расходе газа $|V| \simeq 0.14$ m^3/s в прямо- и противоточном режимах концентрация $\langle c \rangle$ примеси на выходе газа из аппарата отличается незначительно - на 15%, т.е. при больших расходах очищаемого газа преимущество противотока по степени очистки теряется.

Из зависимости количества $|V|(1 - \langle c \rangle)$ извлеченной газовой примеси (убыли ее расхода). от расхода V газа очевиден тот же вывод: о преимуществе противотока в степени очистки газа при малых расходах и об утрате этого преимущества перед прямотоком при одинаково больших расходах газа, когда количества извлеченной примеси становятся тоже приблизительно равными.

Рассмотрим вопрос об оптимизации и эффективности массообменного процесса в системе из нескольких распылительных аппаратов.

У технологов, имеющих дело с тепломассообменом в распылительных аппаратах, распространено мнение о том, что противоточные аппараты эффективнее прямоточных. Умозрительно оно обосновывается тем, что в прямоточном аппарате относительная скорость фаз больше, чем в прямоточном, и вместе с ней больше коэффициенты межфазного тепломассообмена.

Справедливость этих представлений можно проверить, используя полученные результаты расчетов, проведенных с учетом кризисов сопротивления капель и массообмена фаз из-за сильной турбулентности факела распыла.

Рассмотрим для определенности в качестве массообменного процесса (без теплообмена) процесс мокрой очистки воздуха от вредных газовых примесей, например, от SO_2 с использованием распылительных аппаратов.

Для обеспечения требований по общему расходу V_N очищаемого воздуха и конечной степени его очистки c_n может быть недостаточно одного аппарата с конкретными характеристиками V и $c_1 = \langle c \rangle$, и тогда потребуется их несколько. Необходимое количество одинаковых аппаратов равно произведению их количества $N = V_N/V$ на каждой ступени очистки, обеспечивающего общий расход V_N, и числа n этих ступеней. Из равенства $c_n = (c_1)^n$

следует, что $n = \ln(c_n)/\ln(c_1)$. Пусть z_1 − стоимость эксплуатационных расходов (в основном − энергозатрат) на один аппарат, а Z – на все аппараты системы – всей очистной установки. Тогда получим

$$Z = N \cdot n \cdot z_1 = z_1 \cdot V_N \cdot \ln(c_n)/(V \cdot \ln(c_1)). \quad (6)$$

Из уравнения (6) очевидно, что затраты для обеспечения требуемых степени очистки и производительности очистной установки обратно пропорциональны величине $V \cdot \ln(c_1) = f(V)$ как функции, характеризующей отдельный аппарат и режим его работы.

На рис. 3 показана расчетная зависимость модуля этой функции от расхода V газа через аппарат. Очевидно, при малых значениях $|V| < 0.01$ достигается минимум функции $|f(V)|$ и максимум затрат Z. На порядок меньшие затраты достигаются при значении функции $|f(V)| \simeq 0.08$ и ее аргументах $V \simeq -0.08$ в противоточном режиме и $V \simeq 0.17$ в прямоточном.

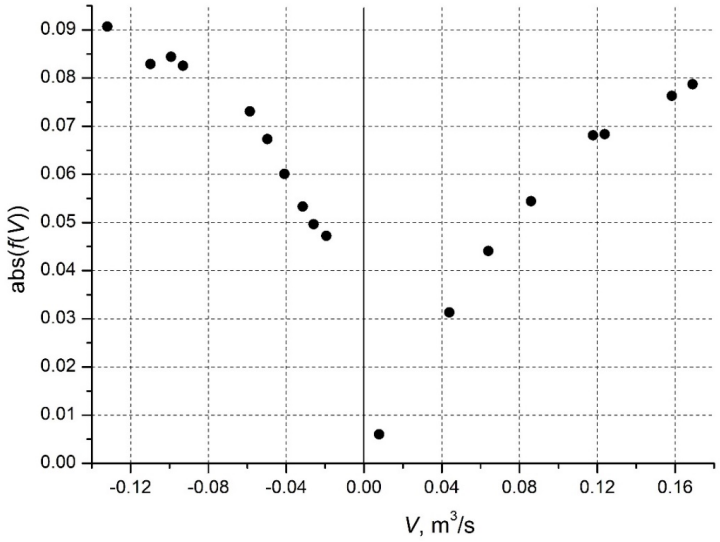


Рисунок 3 – Зависимость величины $|V \cdot \ln\langle c \rangle|$, обратно пропорциональной затратам на проведение массообменного процесса, от расхода V газа через аппарат.

Заметим, что согласно рис. 3 при $|f(V)| \simeq 0.08$ расход газа $|V|$ в прямоточном режиме вдвое больше, чем в противоточном. Число аппаратов N на каждой ступени очистки, соответственно, меньше. Правда, число ступеней n во столько же раз больше.

При одинаковом общем числе $N \cdot n$ аппаратов в газоочистной установке различие общих затрат Z обусловлено различием энергозатрат z_1 из-за необходимости обеспечения противотока газа в аппарате с помощью дополнительных устройств − вентиляторов.

Так, ежесекундные энергозатраты на распыливание жидкости можно оценить по энергии ее струи, которая равна произведению давления $P_f = 5 \cdot 10^5$ Pa в форсунке на расход жидкости $V_f = k_v \cdot \pi d^2/4 \cdot (2P_f/\rho_f)^{1/2} \simeq 74.5 \cdot 10^{-6}$ m^3/s, где $k_v \simeq 0.75$ − коэффициент расхода, $d = 2$ mm – диаметр сопла форсунки, $\rho_f = 1000$ kg/m^3 − плотность воды. Откуда получим $P_f \cdot V_f \simeq 37.3$ W.

Аналогичная оценка энергозатрат на создание противотока газа (с учетом данных рис. 1) дает $|V| \cdot \Delta P \simeq 0.08 \cdot 32 = 2.6$ W, что составляет 7% от энергозатрат на распыление жидкости. Кроме того, необходимо учесть дополнительные капитальные затраты на оборудование противоточного аппарата вентилятором.

Таким образом, противоточный режим не имеет конструктивных, эксплуатационных и, как следствие, экономических преимуществ перед прямоточным.

Заключение. Как было установлено ранее, из двух способов аппроксимации коэффициента сопротивления капли в виде функции $C_d(r, z)$ ее координат по формулам (1)-(2) или функции $C_d(\mathrm{Re})$ по формулам (3)-(4) при расчете двухфазного потока в аппарате предпочтительнее использовать более точную зависимость $C_d(\mathrm{Re})$.

Эта рекомендация была учтена при выполнении расчетов двухфазного потока в распылительном аппарате, в которых были получены профили скоростей фаз и концентраций газовой примеси, а также рассчитаны характеристики аппарата: $V(\Delta P)$, а также функции $\langle c \rangle$, $(1 - \langle c \rangle)\cdot|V|$ и $|V\cdot\ln\langle c \rangle|$ от V.

Сравнение этих характеристик для режимов прямо- и противотока фаз в распылительном аппарате позволило обоснованно сделать вывод о конструктивных, эксплуатационных и экономических преимуществах прямоточного режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Simakov N.N.* Liquid Spray from Nozzles. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 204 p.

2. *Симаков Н.Н.* Расчет межфазного массообмена в факеле распыла форсунки с учетом кризиса // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 4. С. 560.

3. *Симаков Н.Н.* Кризис сопротивления капель при переходных числах Рейнольдса в турбулентном двухфазном потоке факела распыла механической форсунки // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 2. С. 46.

4. *Simakov N.N., Simakov A.N.* // Anomaly of gas drag force on liquid droplets in a turbulent two-phase flow produced by a mechanical jet sprayer at intermediate Reynolds numbers // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97. P. 114901.

5. *Симаков Н.Н.* Численное моделирование двухфазного потока, созданного распыливанием жидкости форсункой // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 7. С. 990.

УДК 534-8 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-157-162

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АГЛОМЕРАЦИИ ЧАСТИЦ PM2,5 В ВОЗДУШНОМ ПРОМЕЖУТКЕ

NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF ACOUSTIC FLOWS ON THE EFFICIENCY OF ULTRASONIC AGGLOMERATION OF PM2.5 PARTICLES IN THE AIR GAP

Хмелёв Владимир Николаевич, Шалунов Андрей Викторович, Голых Роман Николаевич, Нестеров Виктор Александрович
Vladimir N. Khmelev, Andrey V. Shalunov, Roman N. Golykh, Viktor A. Nesterov

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Россия, Алтайский край, Бийск
Biysk Technological Institute (branch) of AltSTU named after I.I. Polzunov, Russia, Altai Region, Biysk
(e-mail: romangl90@gmail.com)

Аннотация: Проанализировано влияние акустических течений на эффективность ультразвуковой агломерации частиц PM2,5 методом численного моделирования. Выявлено, что в резонансном воздушном промежутки акустические течения способны дополнительно ускорить агломерацию до 4 раз за счёт локального повышения концентрации частиц.

Abstract: The influence of acoustic flows on the efficiency of ultrasonic agglomeration of PM2.5 is analyzed by the method of numerical simulation. It was revealed that acoustic flows in a resonant air gap can additionally accelerate agglomeration up to 4 times due to a local increase in the concentration of particles.

Ключевые слова: ультразвук, воздушный промежуток, агломерация, акустические течения, моделирование, вихрь, эффективность.

Keywords: ultrasound, air gap, agglomeration, acoustic flows, modeling, vortex, efficiency.

При решении проблем повышения эффективности процессов газоочистки [1–2] особое внимание уделяется поиску путей очистки воздуха от частиц размером менее 2,5 мкм. Это связано с огромной опасностью таких частиц, вызванной их высокой суммарной поверхностью (более 55% от суммарной поверхности частиц, выбрасываемых в атмосферу) и счетной концентрацией (более 95% от суммарной счётной концентрации даже при незначительной массовой доле, менее 1% от суммарной доли аэрозолей, содержащихся в атмосфере). При этом, благодаря малым размерам и массе такие аэрозоли могут длительное время удерживаться в воздухе и способны легко проникать в альвеолы легких человека, вызывая необратимые изменения организма.

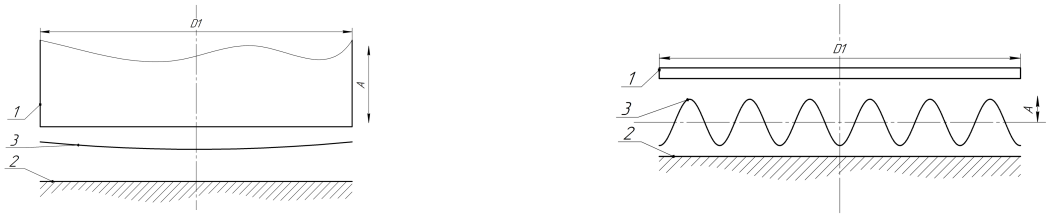
На сегодняшний день пути повышения эффективности технологий тонкой очистки от частиц менее 2,5 мкм (в основном, рассматривается технология инерционного отделения; поскольку технологии гравитационного осаждения и фильтрации имеют принципиальные физические ограничения по производительности) заключаются лишь в оптимизации геометрии области течения или изменения давления сплошной газовой фазы [3, 4].

Агломерация PM 2,5 даже с помощью ультразвуковых колебаний представляет собой трудноразрешимую задачу [5–7] и существующие методы воздействия не позволяют уменьшить долю фракции PM2,5 до значения, меньшего, чем 20…35%. Повышение уровня звукового давления для увеличения эффективности агломерации приведёт к вторичному диспергированию образуемых агломератов и сокращению срока службы излучателя. Поэтому необходимо исследовать возможность влияния вторичных нелинейных эффектов, дополняющих гармонические колебания газовой фазы на эффективность агломерации.

На основе известных исследований улавливания частиц с помощью инерционных пылеуловителей имеется предположение, что вихревые акустические течения, формируемые под действием ультразвукового поля, могут способствовать дополнительному повышению эффективности агломерации. Предполагаемый механизм повышения эффективности агломерации состоит в следующем. За счёт сил инерции в акустических течениях происходят локальные уплотнения частиц, следовательно, увеличивается частота их столкновения.

Однако данный механизм не исследовался ранее ни численно, ни экспериментально.

Численное исследование данного механизма выполнено на примере воздушного промежутка, содержащего агломерируемые частицы, на примере различных типов излучателей – поршневого и изгибно-колеблющегося (рисунок 1).



а) поршневой излучатель б) изгибно-колеблющийся излучатель

1 – излучатель; 2 – отражатель;
3 – форма (распределение) колебаний излучающей поверхности

Рисунок 1 – Излучатели для формирования ультразвуковых колебаний в газовых средах

Поршневой излучатель практически не способен формировать вихревые акустические течения (формируется одиночный слабый вихревой поток). В то время как изгибно-колеблющийся излучатель способен формировать множество вихревых течений малого радиуса кривизны (менее четверти длины ультразвуковой волны).

На основе проведённых авторами численных расчётов формирования вихревых акустических течений с использованием теории нелинейной акустики [8] были проведены численные исследования эффективности агломерации.

Для численного исследования эффективности агломерации использовалось полученное авторами кинетическое уравнение агломерации частиц с учётом вихревого движения.

$$\frac{\partial n_k}{\partial \psi}(\psi,t)\frac{\int\limits_{\psi=const}\frac{r(u_r a_z - u_z a_r)\tau_{rel,k}\,dS}{|\nabla\psi|}}{\int\limits_{\psi=const}\frac{dS}{|\nabla\psi|}} + n_k(\psi,t)\frac{\int\limits_{\psi=const}\frac{div(\mathbf{u}_{pk,n})dS}{|\nabla\psi|}}{\int\limits_{\psi=const}\frac{dS}{|\nabla\psi|}} = \tag{1}$$

$$= -\frac{\partial n_k}{\partial t}(\psi,t) + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{k-1} B_{i,k-i}(\psi) n_i(\psi,t) n_{k-i}(\psi,t) - \sum_{i=1}^{\infty} B_{i,k}(\psi) n_i(\psi,t) n_k(\psi,t)$$

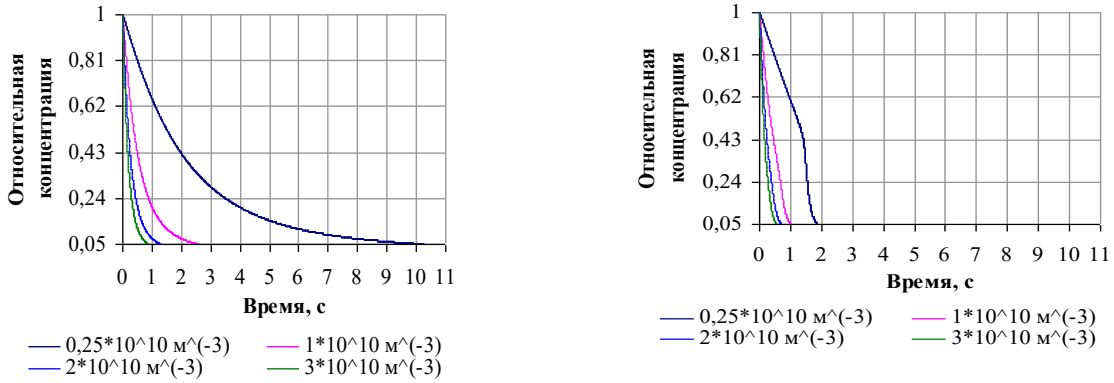
$$B_{i,k}(\psi) = \frac{\int\limits_{\psi=const}\frac{\beta_{i,k}(P(\mathbf{r}))dS}{|\nabla\psi|}}{\int\limits_{\psi=const}\frac{dS}{|\nabla\psi|}}; \tag{2}$$

где $\beta_{i,k}$ – вероятность столкновения частиц, зависящая от амплитуды звукового давления $P(\mathbf{r})$ и определяемая силами ортокинетического и гидродинамического взаимодействия частиц в ультразвуковом поле; n_k – счётная концентрация частиц k-го типоразмера из дискретного набора; u_r, u_z – компоненты скорости вихревого акустического течения, м/с; a_r, a_z – компоненты ускорения вихревого акустического течения, м/с^2; ψ – функция тока вихревого акустического течения, м^2/с; $\mathbf{u}_{pk,n}$ – скорость движения частицы k-го типоразмера по направлению к периферии вихря, м/с.

Данное уравнение решалось приближённым методом. Конечная цель решения уравнения заключалась в определении зависимости эффективности агломерации от времени как отношения текущей усреднённой счётной концентрации частиц в воздушном промежутке к начальной концентрации.

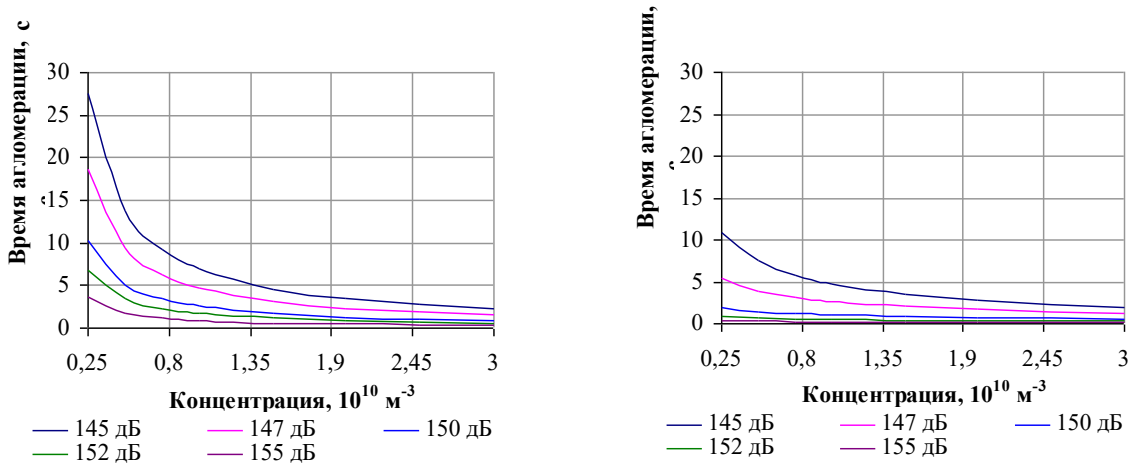
$$\xi = \frac{\sum\limits_k \int\limits_V n_k(\psi(\mathbf{r}),t)dV}{\sum\limits_k \int\limits_V n_k(\psi(\mathbf{r}),0)dV}.$$

Все дальнейшие расчёты проводились при выявленной резонансной толщине воздушного промежутка 7,77 мм. На рисунках 2, 3 приведены данные по эффективности при различных начальных концентрациях аэрозольных частиц.



а) б)

Рисунок 2 – Зависимости относительной концентрации частиц от времени агломерации времени при различных начальных концентрациях: (а) – поршневой излучатель; (б) – изгибно-колеблющийся излучатель



а) б)

Рисунок 3 – Зависимости времени агломерации от начальной концентрации при различных уровнях звукового давления вблизи излучателя при отсутствии отражателя: (а) – поршневой излучатель; (б) – изгибно-колеблющийся излучатель

Под временем агломерации понимается время, за которое усреднённая счётная концентрация частиц уменьшается ровно в 20 раз.

Представленные зависимости доказывают более высокую эффективность агломерации при формировании вихревых потоков изгибно- колеблющимся излучателем по сравнению с поршневым излучателем в широком диапазоне концентраций частиц. При этом увеличение начальной концентрации даёт практически пропорциональный прирост эффективности агломерации.

Кроме того, наибольший прирост эффективности достигается при малых счётных концентрациях частиц (например, при счётной концентрации $0{,}25 \cdot 10^{10}$ м$^{-3}$, уровне звукового давления без отражателя 150 дБ время агломерации сокращается с 10 до 2 с).

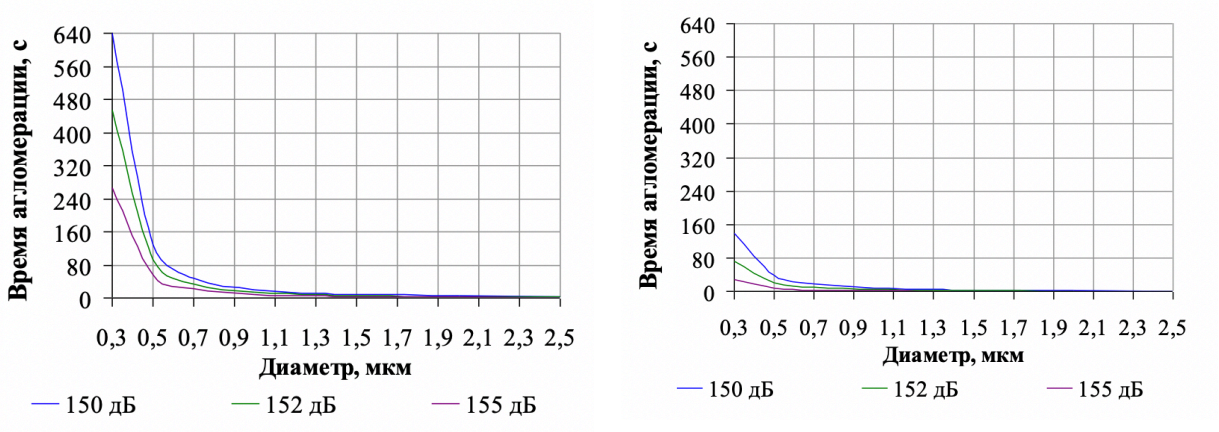
При более высоких концентрациях – от $0{,}25 \cdot 10^{10}$ до $1 \cdot 10^{10}$ м$^{-3}$ – время агломерации сокращается не менее чем в 1,5 раза (в диапазоне уровней звукового давления 150…155 дБ).

Это обусловлено тем, что при характерных расстояниях между взвешенными частицами, значительно превышающих их размер, силы гидродинамического взаимодействия частиц и амплитуда их колебательного движения (ортокинетический механизм взаимодействия) оказываются недостаточными для сближения частиц на расстояние, достаточное для их объединения. В свою очередь, при формировании акустических потоков создаются условия локального повышения концентрации дисперсных частиц в периферийной области вихря. За счет этого уменьшается расстояние между частицами и, следовательно, повышается вероятность их агломерации под действием ультразвуковых колебаний.

Далее проведены исследования влияния размера частиц на эффективность агломерации. Расчёт эффективности агломерации в зависимости от размера дисперсных частиц проводился при постоянной счётной концентрации $1 \cdot 10^{10}$ м$^{-3}$ (рисунок 4). Зависимости были получены при резонансной толщине слоя 7,77 мм и различных уровнях звукового давления, формируемых в центре излучателя при отсутствии отражателя.

Исследования проводились при уровнях звукового давления от 150 до 155 дБ, при которых прирост эффективности (за счёт вихревого течения является существенным).

Представленные зависимости свидетельствуют о более высокой эффективности агломерации при использовании изгибно-колеблющегося излучателя за счёт формирования вихревых акустических течений по сравнению с поршневым излучателем в широком диапазоне диаметров частиц.



а) поршневой излучатель б) изгибно-колеблющийся излучатель

Рисунок 4 – Зависимости эффективности агломерации от диаметра исходных частиц при воздействии излучателями различного типа при постоянной счётной концентрации

Следует отметить, что полученные зависимости свидетельствуют о высокой эффективности вихревых акустических течений для агломерации не только частиц размером PM1-2,5, но и субмикронных частиц. Установлено, что для частиц размером 0,3 мкм при уровне звукового давления 150 дБ время агломерации сокращается с 640 с (без вихревых течений) до 140 с (с вихревыми течениями), т.е. более чем в 4 раза, а при 155 дБ – с 266 с до 28 с (почти в 10 раз) соответственно.

Выводы

Проанализировано влияние акустических течений на эффективность ультразвуковой агломерации частиц PM2,5 методом численного моделирования. Выявлено, что в резонансном воздушном промежутки акустические течения способны дополнительно ускорить агломерацию до 4 раз за счёт локального повышения концентрации частиц.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00121).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oren, I. Invasive pulmonary aspergillosis in neutropenic patients during hospital construction: before and after chemoprophylaxis and institution of HEPA filters [Текст] / I. Oren, N. Haddad, R. Finkelstein, J.M. Rowe // American Journal of Hematology. – 2001. – 66(4). – 257-62.

2. Batog, P. Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient PM2.5 Monitoring [Текст] / P. Batog, A. Drzeniecka-Osiadacz, P. Modzel // Journal of Sensors. – 2018. – 16 p.

3. Method of collecting nanoparticles by using a cyclone and method of designing the cyclone [Текст]: пат. 6969420 США: МПК Chien Hung-min, Hsu Yu-du, Tsai Chuen Jinn (Тайвань) патентообладатель: Industrial Technology Research Institute (Тайвань) – 10/726602 заявл. 04.12.2003 опубл. 29.11.2005.

4. Lin, Ch.-W. Effect of Aerosol Loading on Separation Performance of PM2.5 Cyclone Separators [Текст] / Ch.-W. Lin, T.-J. Chen, Sh.-H. Huang, Y. Kuo, H.-Q. Gui, Ch.-Ch. Chen // Aerosol and Air Quality Research. – 2018. – 18. – P. 1366–1374.

5. Riera, E. Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications [Текст] / E. Riera, I. González-Gomez, G. Rodriguez, J.A. Gallego-Juarez // Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound. Chapter: 34. Publisher: Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials: Number 66. – 2015. – P. 1023–1058.

6. Feng, N.G.B. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in airconditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems [Текст] / N.G.B. Feng, J.W. Xiong, M.P. Wan // PLoS One. – 2017. – 12(6). – 26 p.

7. Houtao, Ch. Experimental Study on Acoustic Agglomeration of Fine Particles from Coal Combustion [Текст] / Ch. Houtao, L. Wulin, L. Jingbo, X. Xin, S. Xianglin // Proceedings - 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA. – 2011.

8. Руденко, О.В. Теоретические основы нелинейной акустики [Текст] / О.В. Руденко, С.И. Солуян. – М.: Наука, 1975. – 290 с.

УДК 66.047:536.24 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-162-166

ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОС В ПРОДУВАЕМОМ СЛОЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ МИКРОВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
HEAT AND MOISTURE TRANSFER IN THE BREEDING LAYER OF VEGETABLES MATERIALS FOR CYCLIC MICROWAVE DRYING

Акулич Пётр Васильевич, Слижук Дмитрий Станиславович
Piotr V. Akulich, Dmitriy S. Slizhuk

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Беларусь, г. Минск
A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus, Minsk
(e-mail: akul@hmti.ac.by)

Аннотация: Проанализированы некоторые результаты численного моделирования и экспериментального исследования тепловлагопереноса в продуваемом плотном слое растительных материалов при конвективном и циклическом конвективно-микроволновом энергоподводе. Выполнено сравнение расчетных и опытных кинетических зависимостей и на примере сушки частиц нарезанного сырого картофеля, корня сельдерея показана возможность сокращения продолжительности процесса обезвоживания.

Abstract: Some results of numerical simulation and experimental study of heat and moisture transfer in a blown through dense layer of plant materials with convective and cyclic convective-microwave energy supply are analyzed. Comparison of the calculated and experimental kinetic dependencies is carried out, and on the example of drying particles of sliced raw potatoes, celery root, the possibility of reducing the duration of the dehydration process is shown.

Ключевые слова: тепломассоперенос в плотном слое, конвективно-микроволновая сушка, сушка растительных материалов.

Keywords: dense layer heat and mass transfer, convective microwave drying, drying of plant materials.

Процессы тепловой сушки растительных материалов, как правило, требуют значительных энергетических затрат. Это обусловлено высокой начальной влажностью этих материалов, неизбежными затратами теплоты на фазовый переход влаги, термолабильными их свойствами, препятствующими использованию высоких температур теплоносителя, а также зачастую неэффективным энергоподводом, приводящим к потерям энергии. В связи с этим находят развитие нестационарные комбинированные методы энергоподвода, в частности циклическое и осциллирующее электромагнитно-конвективное энерговоздействие, вакуумирование в сочетании с микроволновым или инфракрасным облучением [1–7]. Интерес к ним обусловлен возможностью интенсификации тепломассообменных процессов, обеспечения сравнительно мягких режимов тепловой обработки за счет кратковременности высокотемпературного воздействия и сохранения качественных показателей обезвоживаемых материалов. Например, в работах [8, 9] показано, что при циклическом конвективно-микроволновом энергоподводе в неподвижном и псевдоожиженном слоях сокращается продолжительность процесса сушки растительных материалов и уменьшаются затраты энергии. В работе [10] приведены результаты исследования конвективно-микроволновой сушки бананов при переменной мощности излучения. Отмечены положительные стороны такого режима и качество сухого продукта.

Для описания и анализа данных процессов применяются различные методы, в частности модели тепломассопереноса в одиночных частицах с учетом их обтекания теплоносителем, метод механики сплошных сред для дисперсных слоев.

В данной работе анализируются результаты моделирования тепломассопереноса в неподвижном слое растительных материалов при циклическом микроволновом воздействии. Дисперсный слой продувается нагретым воздухом снизу вверх в режиме фильтрации, при этом возможно создание осциллирующего конвективного теплоподвода. Математическая модель базируется на уравнениях сохранения массы газовой фазы, ее фильтрации через дисперсный слой, переноса теплоты и влаги в фазах. Движение газа в слое описывается уравнением Дарси. При этом учитывается зависимость эффективных коэффициентов теплопроводности газовой фазы и диффузии пара от скорости фильтрации в направлении координатных осей.

Перенос влаги в частицах материала слоя учитывается двумя методами. В первом методе диффузионный перенос влаги учитывается в определении коэффициента массоотдачи. Последний определяется как коэффициент массопередачи, учитывающий сопротивление массоотдачи с поверхности частиц и внутридиффузионное сопротивление переносу влаги. Второй метод основывается на описании углубления зоны испарения с учетом фильтрационного сопротивления и сопротивления массоотдачи. При этом полагается, что на границе испарения парциальное давление пара соответствует давлению насыщения. Термическое сопротивление переносу теплоты внутри частиц учитывается в коэффициенте теплоотдачи, который рассчитывается как коэффициент теплопередачи.

Удельная теплота испарения влаги находится из уравнения Клапейрона – Клаузиуса, которое совместно с уравнением изотермы десорбции учитывает энергию связи влаги с материалом. Количество теплоты, выделяемое в частицах материала при воздействии электромагнитного излучения по высоте слоя, описывается уравнением Бугера. Для нахождения коэффициента влагопроводности частиц используется эмпирическая формула, учитывающая его зависимость от влагосодержания и температуры. Система уравнений решалась численно для двухмерного нестационарного случая.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке с конвективно-микроволновым энергоподводом, схема которой представлена на рисунке 1. Установка состоит из сушильной камеры 3, магнетрона 1, волновода 2, подводящего поток излучения к образцу материала 6. Камера 3 снабжена вращающимся столом 8 с каналами для подвода теплоносителя к образцу материала 6. Дисперсный материал размещается в съемной емкости 7 с перфорированным дном. Вращение стола с емкостью для материала осуществляется электроприводом 9. В качестве теплоносителя используется сжатый воздух, который подается по линии 12 в калорифер 11 и после нагрева до требуемой температуры поступает через отверстия во вращающемся столе и днище емкости и далее равномерно распределяется в слое материала. После фильтрации через дисперсный слой материала воздух насыщенный влагой удаляется из камеры через отверстия в съемной крышке 5 в окружающую среду. Температура воздуха контролируется до и после прохождения через слой материала с помощью термопар 4 и 10. Давление воздуха под вращающимся столом составляет 20–40 кПа, что позволяет обеспечивать среднюю скорость воздуха по сечению емкости с образцом дисперсного материала 0,1–0,3 м/с.

Процесс сушки дисперсных материалов осуществлялся в специальной цилиндрической емкости диаметром 110 мм с перфорированным дном, что обеспечивало равномерное распределение теплоносителя по сечению емкости (слоя). Для обеспечения равномерного микроволнового облучения емкость приводилась во вращение и кроме того по её оси размещалась цилиндрическая вставка из керамики диаметром 30 мм. Для определения кинетики процесса емкость с материалом периодически извлекалась из камеры и взвешивалась на лабораторных весах. Контроль температуры материала проводился по показаниям выходящего из слоя воздуха. Температура теплоносителя выбиралась в диапазоне 40–60°С и поддерживалась на заданном уровне в разные периоды сушки.

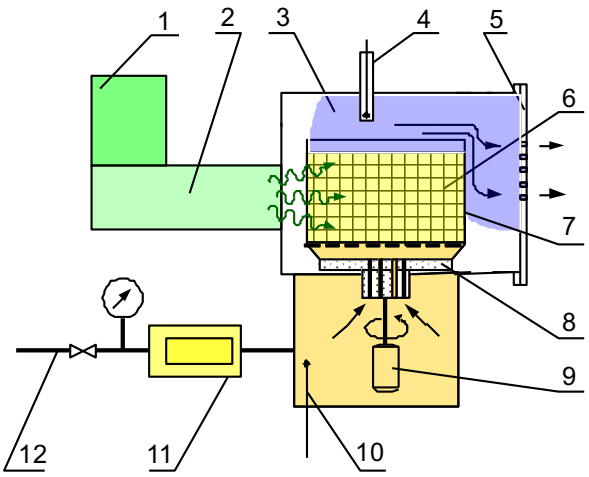


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки с конвективно-микроволновым энергоподводом: 1 – магнетрон; 2 – волновод; 3 – сушильная камера; 4, 10 – термопары; 5 – съемная крышка камеры; 6 – образец материала; 7 – съемная емкость с перфорированным дном для материала; 8 – вращающийся стол с воздушными каналами; 9 – привод; 11 – воздухоподогреватель; 12 – линия подачи сжатого воздуха.

На вышеописанной установке проводились экспериментальные исследования процесса сушки растительных материалов: нарезанного сырого картофеля, корня сельдерея. Дисперсный материал представлял собой преимущественно кубики размером 7×7×7 мм. Воздействие микроволновым излучением на влажный материал осуществлялось периодически в зависимости от его влажности. Длительность облучения $\tau_{изл}$ определялась экспериментально и варьировалась в диапазоне от 0.5 до 3 мин. Продолжительность пауз $\tau_п$ между облучениями составляла 1–2 мин и позволяла охлаждать частицы материала и тем самым предотвращать их перегрев и ухудшение качества.

На рисунке 2 приведены кинетические зависимости сушки корня сельдерея для двух режимов: конвективного в продуваемом слое (кривая *1*) и циклического конвективно-микроволнового (кривая *2*). Из их сравнения отчетливо видно, что циклический конвективно-микроволновой режим приводит к значительному сокращению продолжительности процесса. При этом скорость фильтрации газа через слой одинакова, а температура газа для второго режима ниже и изменялась ступенчато, в начале процесса составляла 60°С, а по истечении 40 мин – 40°С.

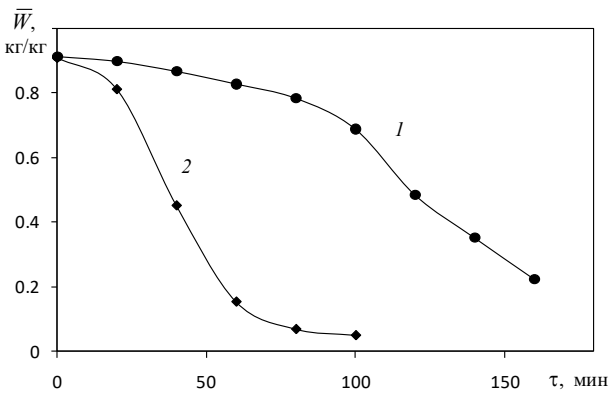


Рисунок 2 – Кинетические зависимости конвективной и циклической конвективно-микроволновой сушки частиц корня сельдерея в продуваемом плотном слое: *1* – конвективная сушка при $t_1 = 70$°С, $v_0 = 0.3$ м/с;
2 – время ~0–20 мин, продолжительность ($\tau_{изл}$ + $\tau_п$)×количество циклов: (3+2)×1, (2+2)×3, (1.5+2)×1, (1+2)×1, $t_1 = 60$°С; ~20-40 мин: (2+1)×1, (1.5+2)×1, (1+2)×5, $t_1 = 40$°С и далее постоянна; ~40–60 мин: (1+1.5)×2, (0.5+1)×11; ~60–80 мин и далее: (1+1)×1, (0.5+1)×12. $v_0 = 0.3$ м/с; размер частиц – кубики 7×7×7 мм, высота слоя 55 мм.

Подобное протекание процесса наблюдается также при сушке частиц картофеля, о чем свидетельствуют кинетические зависимости на рисунке 3. Так, циклический конвективно-микроволновой энергоподвод позволяет заметно сократить продолжительность процесса. Приведенное сравнение расчетной и экспериментальной кинетических кривых подтверждает адекватность модели опытным данным.

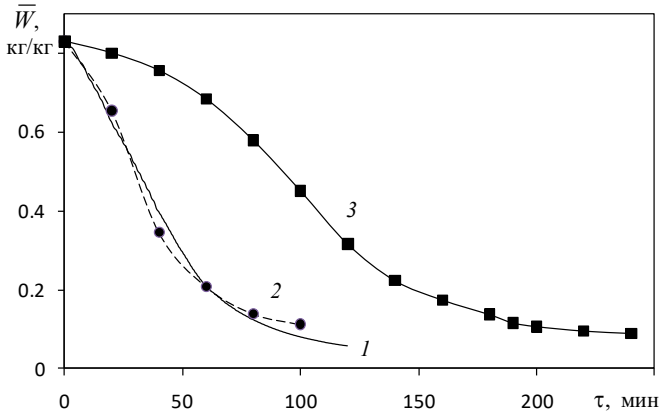


Рисунок 3 – Зависимости средней влажности (на общую массу) частиц от времени при конвективном и циклическом конвективно-микроволновом энерговоздействии:
1 – расчетная кривая при $0 \le \tau \le 12$, $\tau_{изл} = 3$ мин, $\tau_п = 1$ мин; $12 \le \tau \le 20$, $\tau_{изл} = 1$ мин, $\tau_п = 1$ мин; $20 \le \tau \le 40$, $\tau_{изл} = 1$ мин, $\tau_п = 1$ мин; $40 \le \tau \le 60$, $\tau_{изл} = 0.5$ мин, $\tau_п = 0.5$ мин; $\tau > 60$, $\tau_{изл} = 0.5$ мин, $\tau_п = 1$ мин. При $0 \le \tau \le 20$ $t_1 = 60$°C, при $\tau > 20$ $t_1 = 40$°C. $q_0 = 7\times10^4$ Вт/м^2; $\nu_0 = 0.3$ м/с; h = 0.05 м.
2 – экспериментальная кривая; *3* – экспериментальная кривая конвективной сушки при $t_1 = 60$°C; $\nu_0 = 0.3$ м/с. Материал – кубики картофеля размером 7×7×7 мм.

Важным параметром, определяющим качество высушенного продукта, является его температура в процессе сушки. Поэтому на основе математической модели рассчитывались температурные зависимости частиц в процессе сушки, экспериментально измерялись зависимости температуры частиц и теплоносителя выходящего из слоя материала. Типичные зависимости температуры теплоносителя на входе и выходе из слоя приведены на рисунке 4.

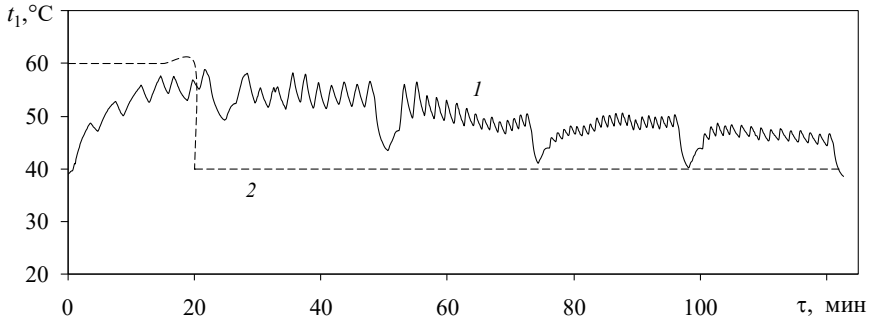


Рисунок 4 – Зависимости температуры теплоносителя при конвективно-микроволновом энергоподводе: *1* – показания термопары над слоем на высоте 20 мм;
2 – усредненная температура воздуха на входе в слой. $\nu_0 = 0.3$ м/с; материал – кубики картофеля 7×7×7 мм, высота слоя 50 мм. Продолжительность ($\tau_{изл} + \tau_п$)×количество циклов: ~0–20 мин: (3+1)×3, (2+1)×1, (1+1)×3, $t_1 = 60$°C; ~20–40 мин: (2+1)×1, (1+1)×1, (1.5+1)×2, (1+1)×6, $t_1 = 40$°C и далее постоянна; ~40–60 мин: (1+1)×2, (0.5+1)×7, (0.5+0.75)×6; ~60–80 мин: (0.5+0.5)×20; ~80–100 мин: (0.5+0.5)×5, (0.5+1)×10.

Для анализируемых режимов температура теплоносителя на выходе из слоя не превышала 60°С. Температура частиц и теплоносителя носят колебательный характер. При отключении микроволнового излучения температура частиц быстро снижается вплоть до температуры газа на входе в слой. Наибольший нагрев и колебания температуры претерпевает область слоя, на которую падает поток излучения. Поэтому при неподвижном слое частиц в процессе обезвоживания необходимо контролировать температуру частиц на его поверхности. Во избежание перегрева частиц в поверхностной области можно перемешивать слой, что также будет способствовать выравниванию влажности слоя и интенсификации процесса.

Численно получены зависимости удельной теплоты испарения влаги в процессе дегидратации. С уменьшением влажности частиц затраты теплоты на испарение заметно возрастают, что обусловлено ростом энергии связи влаги с материалом.

Выводы. В результате исследований показана адекватность математической модели опытным данным, возможность интенсификации и сокращения продолжительности процесса сушки растительных материалов в продуваемом слое за счет циклического микроволнового воздействия. Однако для предотвращения перегрева материала и обеспечения его качественных показателей целесообразно сокращение продолжительности периодов облучения или его мощности. В процессе дегидратации в плотном слое наблюдается некоторая неравномерность распределения влагосодержания частиц по высоте слоя. Уменьшение этой неравномерности возможно за счет перемешивания слоя, циклического облучения его с двух сторон или периодического изменения направления фильтрации газа через слой. Поскольку растительные материалы обычно имеют высокую начальную влажность и требуют больших затрат энергии на процесс дегидратации, то снизить расход электроэнергии и мощность СВЧ-генераторов можно в результате комбинированного подвода энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akulich A.V., Akulich P.V., Dinkov K.T., Akulich V.M. Modeling of the heat and mass transfer in vegetable materials during combined microwave convective heating // «Food Science, Engineering and Technology–2016»: Scientific Works of University of Food Technologies Proceedings of the 63rd Scientific Conference with Intern. Participation: V. 63, Issue 1. P. 274–282.

2. Wray D., Ramaswamy H.S. Novel concepts in microwave // Drying Technology. 2015. V. 33. Issue 7. P. 769–783.

3. Kumar C., Karim M.A. Microwave-convective drying of food materials: A critical review // Critical Review in Food Science and Nutrition. 2019. V. 59. Is. 3. P. 379–394.

4. Акулич П.В., Акулич А.В. Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета. Минск: Вышэйшая школа, 2019. 376 с.

5. Акулич П.В., Темрук А.В., Акулич А.В. Моделирование и экспериментальное исследование тепло- и влагопереноса при СВЧ-конвективной сушке растительных материалов // ИФЖ. 2012. Т. 85. № 5. С. 951–958.

6. Завалий А.А., Снежкин Ю.Ф. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолабильных материалов. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2016. 264 с.

7. Сажин Б. С., Кошелева М. К., Сажина М. Б. Процессы сушки и промывки текстильных материалов. М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ». 2013. 126 с.

8. Календерьян В.А., Бошкова И.Л. Тепломассоперенос в аппаратах с плотным слоем дисперсного материала. Киев: Издательский Дом «Слово», 2011. 184 с.

9. Рудобашта С.П., Харьков А.В., О'Дима Ж. СВЧ-интенсификация процесса сушки растительных материалов // Тепломассообмен ММФ-96. Т. VIII. Минск, 1996. С. 62–68.

10. Ahrne L.M., Pereira N.R., Staack N., Floberg P. Microwale convective drying of plant foods at constsnt and variable microwale power // Drying Technology. 2007. V. 25. N. 7–8. P. 1149-1153.

УДК 66.067

КРИТЕРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ПРОЦЕССА ВОДООЧИСТКИ
CRITERIA FOR ENGINEERING AN ENERGY EFFICIENT WATER TREATMENT PROCESS

Алексеева Надежда Вячеславовна, Джубари Мохаммед Кадер
Nadezda V. Alekseeva, Mohammed Q. Gubari

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov state technical University, Russia, Tambov
(e-mail: alexejewa.nadja@gmail.com)

Аннотация: Рассмотрены особенности проектирования процесса водоочистки. Основным условием выбора метода или технологии является высокая энергетическая эффективность. Для выбора конкретной технологической схемы предложено использовать обобщенный критерий эффективности. Описан способ расчета обобщенного критерия.

Abstract: The features of the design of the water treatment process are considered. The main condition for choosing a method or technology is high energy efficiency. To select a specific technological scheme, it is proposed to use a generalized efficiency criterion. A method for calculating the generalized criterion is described.

Ключевые слова: водоподготовка, энергетическая эффективность, критерий.
Keywords: water treatment, energy efficiency, criterion.

Процессы водоочистки с каждым годом становятся все более востребованными в различных отраслях промышленности: процессах водоподготовки, очистки сточных вод, производства питьевой воды. Существует различные технологии разделения и очистки водных растворов, включающие в себя как механические, химические, физико-химические, гидромеханические, биологические, тепловые и массообменные процессы [1-3]. Возможно использование как одностадийного, так и многостадийного (комплексного) процесса. Комбинация нескольких процессов разделения позволяет провести более глубокую очистку воды.

Выбор технологии и составляющих процессов зависит от многих параметров:

- Показателей качества исходной воды или водного раствора;
- Требуемых показателей качества получаемого водного раствора;
- Имеющиеся на предприятии источники энергии и ресурсов.

Основным результирующим фактором при выборе технологии и конкретных процессов разделения является энергетическая эффективность проводимого процесса.

Рассматривая отдельные группы процессов, следует отметить следующие их преимущества и недостатки:

Гидромеханические процессы (фильтрование, осаждение) чаще всего используются для первичной обработки водных растворов в качестве грубой очистки. К недостаткам следует отнести невозможность извлечения растворенных компонентов.

Тепловые процессы (выпаривание) являются наиболее энергоемкими процессами. К преимуществам относятся отсутствие жестких требований к исходному раствору и получение глубоко деминерализованной воды.

К химическим процессам относятся нейтрализация и окисление. Наиболее распространенный процесс обеззараживания воды – хлорирование и озонирование. К недостаткам относится ядовитость обеззараживающих компонентов.

Наиболее энергоэффективными процессами являются физико - химические (флотация, коагуляция). Не имеет широкого распространения из-за необходимости индивидуального

подбора коагулянтов. Требуется дополнительное оборудование для последующего отстаивания или фильтрования.

К наиболее распространенным процессам относятся массообменные (адсорбция, мембранные методы, ионообменные процессы). Эти процессы требуют оборудования и реагентов – ионообменные смолы, мембраны, адсорбенты с последующей регенерацией или утилизацией отработанных материалов.

Биологические процессы (биологическое окисление, биологическая очистка). Недостатком данных процессов является требовательность микроорганизмов к определенным температурным и гидродинамическим условиям в аппарате, необходимость подбора типа микроорганизмов для конкретных водных растворов.

Обобщая рассмотренные процессы разделения можно выделить следующие характеристики процессов:

- Энергоемкость процесса (количество затрачиваемой энергии на единицу очищенной воды);
- Эффективность очистки (отношение концентрации загрязняющего компонента на выходе их аппарата и входящего в аппарат);
- Достаточность процесса (необходимость дополнительных процессов доочистки или предварительной подготовки водного раствора);
- Изолированность процесса (потребность в дополнительных расходных материалах или реагентах, регенерации рабочих элементов либо утилизации образующихся отходов);
- Самостоятельность процесса (необходимость в дополнительном вспомогательном оборудовании, оценивается количество этого оборудования и его энергозатраты);
- Опасность (токсичность или ядовитость компонентов для человека);
- Масштабность (оцениваются габариты оборудования и время протекания процесса).

В зависимости от вида предприятия, на котором осуществляется очистка воды, значимость той или иной характеристик будет различной. На предприятии получения электроэнергии энергоемкость процесса будет значительно менее важна, чем на предприятии, покупаемом электроэнергию. Поэтому, при расчете обобщенного критерия процесса разделения необходимо учитывать значимость конкретной характеристики для производства.

Таким образом, проводя сравнительный анализ процессов водоочистки для выбора наиболее эффективного, можно воспользоваться обобщенным критерием эффективности процесса:

$$K = \alpha_1 \cdot K_1 + \alpha_2 \cdot K_2 + \cdots + \alpha_n \cdot K_n,$$
$$\alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_n = 1,$$

где K_1, K_2, …, K_n – критерии эффективности каждой характеристики рассматриваемого процесса; α_1, α_2, …, α_n – коэффициент, учитывающий значимость характеристики рассматриваемого процесса в конкретном производстве, измеряемый в долях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров Л.Л., Родионова Е.Н. Построение технологических схем водоочистки // Матер., Тез. докл. «Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова». Москва: ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, 2015. № 1. С. 350-354;

2. Попов Н.С., Козачек А.В., Святенко А.В., Тьин Ч.М. Методика проектирования технологий очистки загрязненных вод // Журнал экологии и промышленной безопасности. 2012. № 2 (54). С. 63-71;

3. Де Ванна Ф., Алексеева Н.В. Схема многоступенчатой очистки питьевой воды // Матер., тез. докл. «Природообустройство и строительство: наука, образование, практика»

УДК 66.067 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-169-173

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМАХ СО СПЛОШНОЙ ЖИДКОЙ ФАЗОЙ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

NUMERICAL ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF PROCESSES UNDER THE ACTION OF ULTRASONIC OSCILLATIONS IN SYSTEMS WITH A CONTINUOUS LIQUID PHASE FOR OPTIMUM CONTROL OF THE RADIATOR OPERATING

Голых Роман Николаевич*, Шалунов Андрей Викторович *, Хмелёв Владимир Николаевич *, Барсуков Роман Владиславович *, Маняхин Иван Александрович *, Ильченко Дмитрий Александрович *, Минаков Вячеслав Дмитриевич *, Шакура Владислав Анатольевич **

Roman N. Golykh*, Andrey V. Shalunov*, Vladimir N. Khmelev*, Roman V. Barsukov*, Ivan A. Manyakhin*, Dmitry A. Ilchenko*, Vyacheslav D. Minakov*, Vladislav A. Shakura**

**Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Россия, Алтайский край, Бийск*

**Biysk Technological Institute (branch) of AltSTU named after I.I. Polzunov, Russia, Altai Region, Biysk*

(e-mail: romangl90@gmail.com*)*

***ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», Россия, Алтайский край, Бийск*

***Center of ultrasonic technologies of AltSTU, Russia, Altai Region, Biysk*

Аннотация: Выполнен численный анализ энергетической эффективности процессов в системах со сплошной жидкой фазой под действием ультразвуковых колебаний, направленный на определение фактического отношения энергии, затраченной на изменение межатомных и межмолекулярных связей среды, к суммарной введённой энергии ультразвукового воздействия. Проведённый анализ на примере процессов механодеструкции макромолекул и диспергирования позволил установить зависимости фактических энергозатрат на изменение межатомных и межмолекулярных связей среды от интенсивности колебаний. Выявленные зависимости не противоречат экспериментальным данным. Предложенная модификация ранее созданного алгоритма управления интенсивностью позволяет, согласно расчётам, увеличить КПД ультразвукового воздействия в 1,25…1,7 раз.

Abstract: The numerical analysis of the energy efficiency of processes in systems with a continuous liquid phase under the action of ultrasonic vibrations was performed. The analysis is aimed at determining the real ratio between the energy of changing the interatomic and intermolecular bonds of the medium and the total input energy of ultrasonic action. The performed analysis on the examples of the processes of mechanical destruction of macromolecules and dispersion evaluated dependences of the real energy consumption for the change of the interatomic and intermolecular bonds of the medium on vibrations intensity. The revealed dependences do not contradict the experimental data. The proposed modification of the previously created intensity control algorithm allows to increase the efficiency of ultrasonic exposure by 1.25…1.7 times according to calculations.

Ключевые слова: ультразвук, управление, алгоритм, моделирование, энергетическая эффективность, диспергирование, механодеструкция, колебательная система.

Keywords: ultrasound, control, algorithm, modeling, energy efficiency, dispersion, mechanical destruction, oscillatory system.

До сегодняшнего дня повышение эффективности процессов под действием ультразвуковых колебаний в системах со сплошной жидкой фазой (речь идёт о процессах, в которых преобладает разрыв межатомных и межмолекулярных связей среды), в основном, было направлено на создание как можно более развитой кавитации. Указанное направление

повышения эффективности процессов получило настолько широкое распространение и стало общепринятым, что калориметрический метод, заключающийся в определении акустической мощности по нагреву среды за счёт кавитации, регламентирован государственным стандартом.

Однако экономическую эффективность производства с применением ультразвуковых технологий обработки систем со сплошной жидкой фазой определяет не выделившееся в результате ультразвукового кавитационного воздействия тепло, а реструктуризация межатомных и межмолекулярных связей среды, которая определяет характеристики конечного продукта и скорость изменения характеристик.

Определение характеристик конечного продукта до сегодняшнего дня, в основном, проводилось экспериментальным путём индивидуально на конкретных средах. Однако такой подход обладает рядом принципиальных недостатков:

– не обеспечивает максимум КПД ультразвукового воздействия с помощью подобранных режимов и условий, поскольку не определяется фактическое отношение затрат энергии на преобразование структуры и характеристик системы с жидкой фазой (энергии на разрыв межатомных и межмолекулярных связей жидкой фазы, разрушение или коагуляцию 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 вновь разрабатываемых процессов. Это обусловлено тем, что такой подход не даёт возможность установить единые закономерности формирования структуры и характеристик систем с жидкой фазой в зависимости от режимов и условий ультразвукового воздействия.

Одно из следствий указанных недостатков – в существующих промышленных образцах ультразвуковых технологических аппаратов, которые реализуют экспериментально подобранные режимы и условия, более 90% энергии теряется в виде нагрева озвучиваемой среды.

Для решения данной проблемы разработана комплексная взаимосвязанная модель преобразования энергии колебаний в целевое изменение структуры среды [1]. Модель рассматривает все стадии преобразования энергии ультразвуковых колебаний, начиная с их излучения в обрабатываемую среду, заканчивая целевым изменением структуры среды. Численный анализ предложенной модели позволяет:

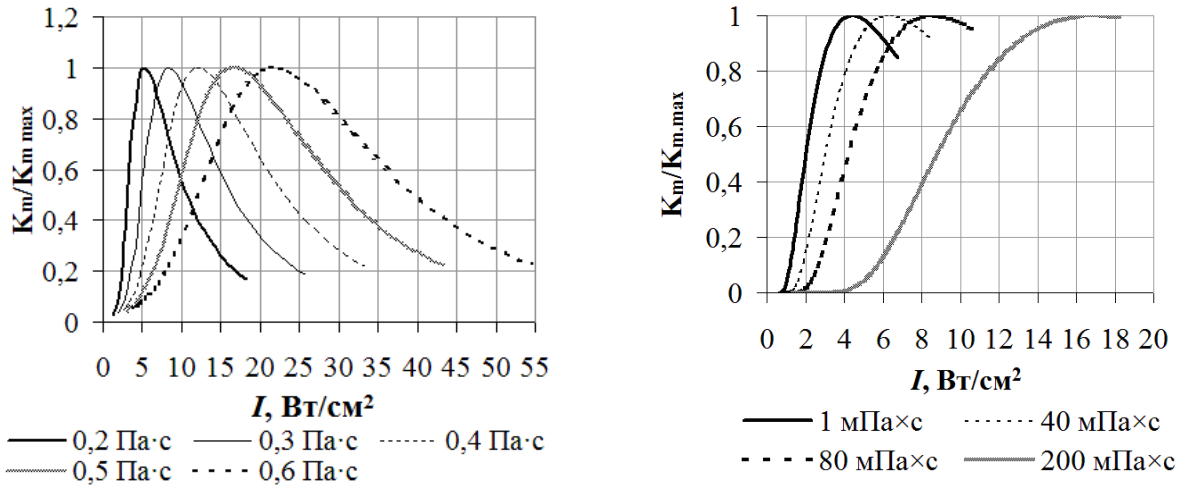
– определить характеристики кавитационной области (концентрация пузырьков и давление ударной волны, формируемой в результате схлопывания отдельного пузырька);

– на основе вероятностно-статистического подхода рассчитать, как будет протекать элементарный акт разрушения межатомной и межмолекулярной связи среды;

– определить зависимости макроскопических характеристик среды (фракционный состав макромолекул сплошной жидкой фазы по весам или фракционный состав частиц дисперсной фазы по условным диаметрам).

Конечным результатом анализа модели стали зависимости КПД ультразвукового воздействия K_m, определяемого как отношение затрат энергии на целевое изменение структуры среды к суммарной введённой энергии колебаний, от интенсивности колебаний [1].

Полученные зависимости КПД УЗ воздействия представлены на рисунке 1.

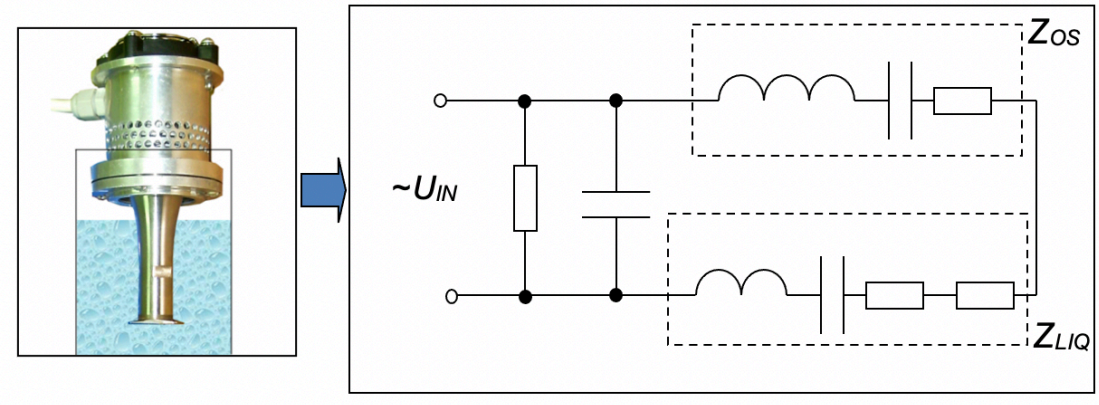


а) для процесса механодеструкции б) для процесса диспергирования

Рисунок 1 – Зависимости относительного КПД ультразвукового воздействия от интенсивности ($K_m/K_{m\,max}$, где $K_{m\,max}$ – максимально достигаемый КПД в исследованном диапазоне интенсивностей)

Согласно представленным зависимостям, при определённых интенсивностях, зависящих главным образом от вязкости сплошной жидкой фазы, КПД имеет экстремум. Выявленные зависимости не противоречат предварительным экспериментальным данным, полученным авторами. Очевидно, что для максимальной экономической эффективности процесса необходимо воздействовать с интенсивностью, обеспечивающей экстремум КПД, периодически изменяя её в зависимости от текущей вязкости сплошной жидкой фазы (текущая вязкость в процессе обработки тоже может изменяться).

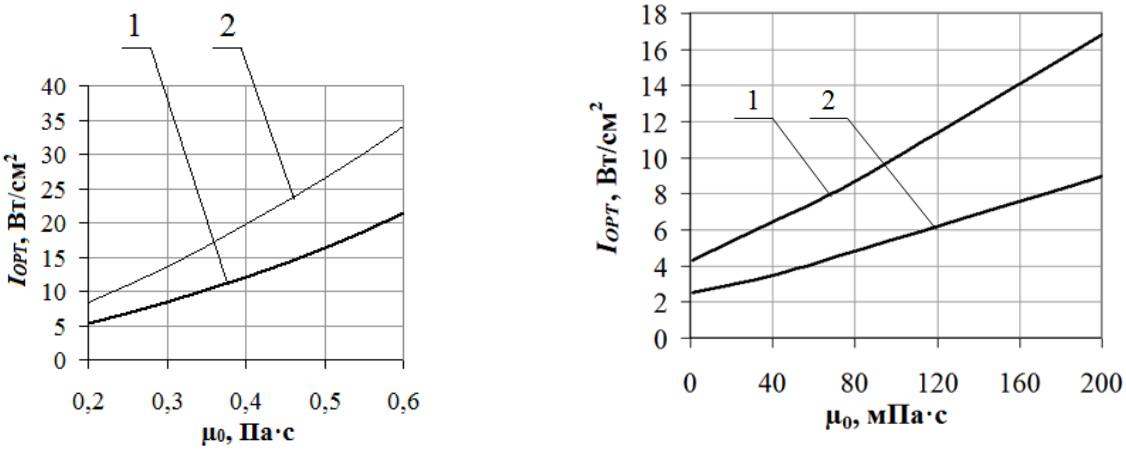
На сегодняшний день известен алгоритм автоматического управления интенсивностью ультразвукового воздействия в зависимости от текущего состояния среды [2]. Алгоритм автоматически устанавливает интенсивность, которая обеспечивает максимум развития кавитации. При этом текущее состояние среды (акустические свойства) определяются на основе измерения электрического импеданса ультразвуковой колебательной системы, которая представлялась в виде следующей эквивалентной электрической схемы (рисунок 2) [2].



U_{IN} – входное напряжение, подаваемое на ультразвуковую колебательную систему, В;
Z_{OS} – собственный импеданс ультразвуковой колебательной системы, Ом;
Z_{LIQ} – составляющая импеданса, вызванная акустической нагрузкой в виде озвучиваемой системы со сплошной жидкой фазой, Ом

Рисунок 2 – Ультразвуковая колебательная система (ультразвуковой излучатель, находится слева) и её эквивалентная электрическая схема (справа)

Поэтому целесообразно сравнить интенсивность, обеспечивающую максимальный КПД K_m, с интенсивностью, обеспечивающей максимум развития кавитации. Сравнительные зависимости представлены на рисунке 3 на примере процессов механодеструкции и диспергирования [1].



а) для процесса механодеструкции б) для процесса диспергирования

Рисунок 3 – Зависимости интенсивности, обеспечивающей максимум КПД K_m (1), и зависимости интенсивности, обеспечивающей максимум развития кавитации (2), от вязкости сплошной жидкой фазы

Из зависимостей, представленных на рисунке 3, следует, что отношение оптимальной интенсивности, при которой максимальная доля энергии колебаний переходит в реализацию процесса (изменение структуры среды) $I_{opt.}$, к оптимальной интенсивности, при которой максимальная доля энергии колебаний переходит в схлопывание пузырьков $I_{opt.cav.}$, вне зависимости от вязкости сплошной жидкой фазы составляет одну и ту же величину. Путём аппроксимации зависимостей установлено значение поправочного коэффициента $k = \frac{I_{opt.}}{I_{opt.cav.}} = 1{,}75$ для процесса диспергирования и $k = \frac{I_{opt.}}{I_{opt.cav.}} = 0{,}63$ для процесса механодеструкции. При этом, как следует из представленных зависимостей (рисунок 1), учёт данного поправочного коэффициента повышает КПД процесса в 1,3…1,8 раза (при интенсивности, равной $I_{opt.}$) по сравнению с интенсивностью $I_{opt.cav.}$.

На основании полученной закономерности предложена модификация ранее созданного способа автоматического поддержания оптимальной интенсивности в ультразвуковом аппарате в зависимости от свойств системы с жидкой фазой в текущий момент времени.

Известный способ [2] состоит из 3-х циклически повторяющихся шагов:

1) измерение акустической нагрузки Z_{LIQ} в виде озвучиваемой кавитирующей среды (при использовании самого УЗ излучателя, имеющего собственный электрический импеданс Z_{OS}, в качестве датчика, см. рисунок 2);

2) расчёт оптимальной интенсивности $I_{opt.cav.}$ на основе косвенных данных об акустической нагрузке, представляющих собой зависимости активной составляющей электрического импеданса Z_{LIQ}, вызванного акустической нагрузкой. Оптимальная интенсивность определяется по точке максимума достижения $\mathrm{Re}\, Z_{LIQ}$ – активного электрического сопротивления УЗ излучателя, вызванного потерями акустической энергии в среде;

3) установление интенсивности колебаний УЗ излучателя на уровне $I_{opt.cav.}$.

Модификация способа касается 3-го шага и заключается в установлении интенсивности на уровне $kI_{opt.cav.}$ вместо $I_{opt.cav}$.

Поскольку свойства среды меняются, а процесс установления интенсивности на уровне $kI_{opt.cav}$ занимает конечное время, предложен алгоритм периодического определения оптимальной интенсивности и её установления. Предложенный алгоритм заключается в том,

что каждые T секунд, в течение времени τ интенсивность плавно изменяется от 0 до I_{MAX} (максимально допустимая интенсивность, при которой не разрушаются конструктивные элементы излучателя) и при таком плавном изменении определяется I_{cav} согласно критерию $Re\ Z_{LIQ}(I_{cav}) \geq Re\ Z_{LIQ}(I)$ для любой $I\epsilon[0; I_{MAX}]$. Затем в течение следующего отрезка времени длительностью $T-\tau$ интенсивность устанавливается на уровне kI_{cav}.

Проведённые априорные оценки

$$\frac{\int_0^\tau K_m(\frac{I_{MAX}}{\tau}t)\frac{I_{MAX}}{\tau}tdt + K_m\left(kI_{opt\ cav}\right)kI_{opt\ cav}(T-\tau)}{\int_0^\tau \frac{I_{MAX}}{\tau}tdt + kI_{opt\ cav}(T-\tau)} \times \frac{I_{opt\ cav}}{K_m(I_{opt\ cav})I_{opt\ cav}}$$

$$\geq \frac{K_m\left(kI_{opt\ cav}\right)}{\frac{I_{MAX}\tau}{2kI_{opt\ cav}(T-\tau)}+1} \times \frac{1}{K_m\left(I_{opt\ cav}\right)} \geq \frac{1{,}3}{1+\frac{I_{MAX}\tau}{1{,}26I_{opt\ cav}(T-\tau)}} \geq 1{,}25$$

показали, что реализация предложенного алгоритма управления позволит повысить КПД ультразвукового воздействия по сравнению с известным алгоритмом не менее чем в 1,25 раза (возможно повышение до 1,7 раз) при выборе периода T, за который свойства среды изменяются незначительно.

Выводы

Выполнен численный анализ энергетической эффективности процессов в системах со сплошной жидкой фазой под действием ультразвуковых колебаний, направленный на определение фактического отношения энергии, затраченной на изменение межатомных и межмолекулярных связей среды, к суммарной введённой энергии ультразвукового воздействия. Проведённый анализ на примере процессов механодеструкции макромолекул и диспергирования позволил установить зависимости фактических энергозатрат на изменение межатомных и межмолекулярных связей среды от интенсивности колебаний. Предложенная модификация ранее созданного алгоритма управления интенсивностью позволяет, согласно расчётам, увеличить КПД ультразвукового воздействия в 1,25…1,7 раз.

Исследование влияние кавитационного воздействия на структуру материалов выполнено при поддержке Гранта Президента РФ № МК-5387.2021.1.1. Разработка алгоритма оптимального управления выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-21-00017 Росатом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Golykh, R.N. Phenomenological modeling of systems with continuous liquid phase for optimal control of ultrasonic cavitation influence [Текст] / R.N. Golykh // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 12 p.

2. Хмелев, В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве [Текст] / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-174-177

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАПСУЛИРОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОЛИАКРИЛАМИДНЫЕ ОБОЛОЧКИ
MODELING OF PARTICULATE MATERIALS COATING WITH POLYACRYLAMIDE SHELLS

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

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail: 157lipin@mail.ru, lipin.a@mail.ru)

Аннотация: Приведена математическая модель процесса нанесения тонкого полимерного покрытия на дисперсные материалы путем проведения реакции полимеризации на поверхности капсулируемых частиц. Математическое описание учитывает закономерности тепломассопереноса, кинетики полимеризации и изменение площади поверхности испарения в процессе капсулирования.

Abstract: Coating of particulate material with thin polymeric shell, which is obtained by polymerization on the particle surface, was considered. A mathematical model of this process is presented. The model simulates heat and mass transfer, polymerization kinetics and evaporation surface change in coating process.

Ключевые слова: моделирование, капсулирование, полимеризация, псевдоожиженный слой, полиакриламид.

Keywords: modeling, encapsulation, polymerization, fluidized bed, polyacrylamide.

Капсулирование в тонкие полимерные оболочки широко применяется для модифицирования свойств различных дисперсных материалов. Применение растворов полимеров для капсулирования имеет ряд недостатков: высокая вязкость растворов создает определенные трудности при их диспергировании; низкая концентрация полимера в растворе влечет за собой повышенные энергетические затраты на удаление растворителя. От этих недостатков свободен метод химического формирования оболочки путем проведения реакции полимеризации непосредственно на поверхности частиц. При этом, как правило, не возникает проблем с диспергированием капсулянта, так как растворы мономеров – низковязкие жидкости. Применение концентрированных растворов мономеров позволяет уменьшить затраты тепловой энергии на испарение растворителя. Введение сшивающих агентов, пластификаторов, регуляторов роста цепи делает возможным получение полимерной пленки с нужным комплексом свойств. Таким образом, скорость выделения активного вещества из капсулы регулируется не только ее толщиной, но и изменением физико-химических свойств.

Формирование полимерных оболочек в данной работе осуществляется путем проведения реакции полимеризации на поверхности капсулируемых частиц. Водный раствор мономера с инициатором полимеризации распыливается на поверхность псевдоожиженного слоя обрабатываемых частиц и формирует жидкостную пленку. Нагрев материала псевдоожижающим воздухом инициирует протекание реакции полимеризации и испарение растворителя, что приводит к отверждению пленки. При этом поверхность испарения, равная поверхности гранул, закрытых плёнкой, изменяется во времени. Таким образом, процессы тепло-массообмена оказываются зависимыми от процесса распределения плёнкообразующего вещества по поверхности обрабатываемых частиц.

С целью прогнозирования рациональных режимно-технологических параметров процесса капсулирования было разработано его математическое описание, включающее уравнения массоотдачи, материального, теплового балансов в дифференциальной форме,

уравнения кинетики полимеризации, уравнение характеризующее изменение средней степени покрытия частиц во времени и дополняющие соотношения.

Запишем уравнение материального баланса по влаге для всей массы покрытия:

$$dm_в/d\tau = G_р \cdot G_в^н \cdot \tau - j_{исп}, \quad (1)$$

где $m_в$ – масса влаги, содержащейся в покрытии; $G_р$ – массовый расход раствора плёнкообразующего вещества; $C_в^н$ - исходная массовая доля воды в растворе полимера; $j_{исп}$ – массовый поток испаряющейся влаги; τ – время.

Относительное влагосодержание покрытия определяется из выражения:

$$U_о = m_в/(G_р(1 - C_в^н) \cdot \tau + m_в). \quad (2)$$

Отметим, что уравнение (1) справедливо для $\tau > 0$, так как при $\tau = 0$ плёнки ещё не существует ($dm_в/d\tau = 0$). В начальный момент времени $U_о = U_о^н$.

Количество влаги, испаряющейся за единицу времени, находим по уравнению:

$$j_{исп} = \beta_p \cdot F_м \cdot x_п \cdot (P_п - P_c), \quad (3)$$

где β_p – коэффициент массоотдачи; $F_м$ –поверхность материала; $x_п$ – средняя степень покрытия частиц; $P_с, P_п$ – парциальные давления водяных паров в воздухе и над поверхностью раствора полимера.

Под степенью покрытия понимают долю поверхности частиц, закрытую плёнкообразующим веществом. Изменение средней степени покрытия $x_п$ частиц во времени при периодическом режиме работы аппарата характеризуется уравнением

$$x_п = k_4\left(z_2 - z_1 - z_2 \exp\left(z_1 \cdot \tau\right) + z_1 \exp\left(z_2 \cdot \tau\right)\right) / \left(z_1 \cdot z_2\left(z_2 - z_1\right)\right), \quad (4)$$

приведенным в работе [1]. Там же имеются формулы для расчета коэффициентов, входящих в данное выражение.

Давление насыщенных паров растворителя над поверхностью раствора плёнкообразующего вещества будет зависеть от содержания растворителя и от температуры обрабатываемого материала (температуры плёнки и частиц принимаем одинаковыми), которая определяется из уравнения теплового баланса в дифференциальной форме:

$$(m_м \cdot c_м + m_{пл} \cdot c_{пл} + m_в \cdot c_в) \cdot \frac{dt}{d\tau} = -j_{исп} \cdot r^* + \alpha \cdot F_м \cdot (t_с - t) + Q_р, \quad (5)$$

где $m_м$ – масса обрабатываемого материала, $m_{пл}$ – масса пленкообразующего вещества на гранулах; $c_м$, $c_{пл}$, $c_в$ – теплоёмкости материала, плёнкообразующего вещества и воды; t – температура материала; r^* – теплота парообразования; α – коэффициент теплоотдачи; $t_с$ – температура сушильного агента (воздуха); $Q_р$ – теплота химической реакции.

Суммарную поверхность частиц материала $F_м$ рассчитываем по формуле:

$$F_м = 6m_м/(d_ч \cdot \rho_ч). \quad (6)$$

Парциальное давление водяных паров в воздухе определяется соотношением:

$$P_С = P_а \cdot x_с/(0{,}622 + x_с), \quad (7)$$

где: $P_а$ – атмосферное давление; $x_с$ – влагосодержание воздуха.

Парциальное давление водяных паров над поверхностью водного раствора плёнкообразующего вещества рассчитывается по формуле:

$$P_п = 617 \cdot \psi(U_o) \exp\left(17{,}25 \cdot t/(238 + t)\right). \quad (8)$$

Выражение для расчета поправочного коэффициента ψ, учитывающего понижение давления насыщенного пара над раствором, было получено путем обработки результатов эксперимента по сушке пленки, образующейся из раствора полиакриламида:

$$\psi = 1/(-0{,}9153 - 5{,}4093 \cdot \ln(U_o)). \quad (9)$$

В случае использования в качестве капсулирующего агента водного раствора акриламида с пероксидным инициатором полимеризации уравнения кинетики полимеризации запишутся в следующем виде:

$$dB/d\tau = k_{эф} \cdot (1 - B) \cdot I^{0,5}, \quad (10)$$

$$dI/d\tau = -k_d \cdot I, \quad (11)$$

где B – степень превращения мономера, I – концентрация инициатора, $k_{эф}$ – эффективная константа скорости полимеризации, k_d – константа скорости распада инициатора.

$$k_{эф} = k_p(2 \cdot k_d/k_t)^{0,5}, \quad (12)$$

$$k_d = 7{,}53 \cdot 10^{16} \cdot \exp(-131800/(RT)), \quad (13)$$

Константа скорости роста цепи k_p рассчитывается по уравнению (14):

$$k_p = 0{,}8 \cdot 10^7 \cdot \exp(-11700/(RT)), \quad (14)$$

константа скорости обрыва цепи k_t:

$$k_t = 6{,}8 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-11700/(RT)). \quad (15)$$

Формулы для расчета констант скоростей приведены согласно работе [2].

Мощность внутреннего источника теплоты, обусловленного протеканием экзотермической реакции, находится по формуле:

$$Q_p = m_A(\tau)\Delta H \cdot \omega(\tau), \quad (16)$$

где $m_A(\tau)$ - масса мономера, поступившая в слой гранул к моменту времени τ, ΔH - тепловой эффект реакции, $\omega(\tau)$ - средняя скорость реакции на интервале времени от 0 до τ.

$$\omega(\tau) = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} \frac{dB}{d\tau} d\tau \quad (17)$$

Таким образом, система уравнений (1) - (17) представляет собой математическое описание процесса формирования защитной оболочки путем проведения реакции полимеризации непосредственно на поверхности псевдоожиженного слоя частиц.

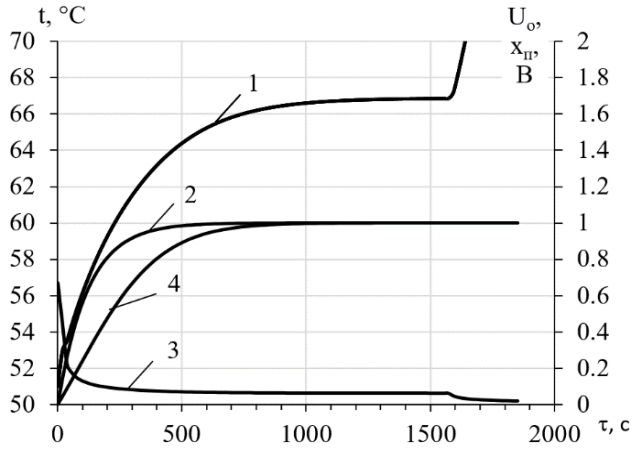


Рисунок 1 – Изменение параметров процесса капсулирования во времени:
1 – температура слоя частиц,
2 – степень покрытия,
3 – влагосодержание покрытия,
4 – степень превращения мономера

При синтезе полиакриламида вода является необходимым компонентом реакционной среды. Поэтому процесс сушки не должен опережать полимеризацию. В противном случае реакция заканчивается при низких степенях превращения. Предложенное математическое описание программно реализовано в пакете MathCAD и позволило путем вычислительного эксперимента подобрать рациональные режимные параметры, при которых процесс протекает с достаточной скоростью и соблюдается указанное выше условие (рис.1).

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (стипендия СП-1951.2021.1)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липин А. Г., Небукин В. О., Липин А. А. Оценка степени покрытия при капсулировании зернистых материалов в псевдоожиженном слое // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2019. Т. 62. Вып. 5. С. 84-90.

2. Липин А. А., Шибашов А. В., Липин А. Г. Кинетика полимеризации акриламида в концен-трированных водных растворах // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88. №1. с. 103-108.

.

УДК 621.40 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-177-181

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОГО СВЧ-СПОСОБА ОСУШКИ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОСЛЕ ГИДРОИСПЫТАНИЙ

SIMULATION OF ENERGY RESOURCE EFFICIENT MICROWAVE METHOD FOR DRYING PETROCHEMICAL EQUIPMENT AFTER HYDROTEST

Мешалкин Валерий Павлович[*,], Абдеев Эльдар Ринатович[*,**], Саитов Раиль Идиятович[*], Зарипов Ильдар Ринатович[*], Гулемова Лиана Ринатовна[*]**

Valery P. Meshalkin[*,], Ildar R. Abdeev[*,**], Rail I. Saitov[*], Ildar R. Zaripov[*], Liana R. Gulemova***

**Башкирский государственный университет, Россия, Уфа*

**Bashkir state University, Russia, Ufa*

(e-mail:saitovri@mail.ru)

***РХТУ им. Д.И.Менделеева, Россия,Москва*

***D. Mendeleev University, Russia, Moscow*

(air@bgutmo.ru)

Аннотация: Разработана математическая модель способа СВЧ-осушки нефтехимического оборудования оболочкового типа и приведены результаты вычислительных экспериментов с обоснованием энергоресурсоэффективности.

*Abstract:*A mathematical model of the method of microwave drying of shell-type petrochemical equipment has been developed and the results of computational experiments with justification of energy and resource efficiency are presented.

Ключевые слова: осушка, нефтехимические аппараты, сверхвысокочастотное излучение, энергоресурсоэффективные процессы, волокнистые и коррозионностойкие материалы.

Keywords: dehydration, petrochemical apparatus, microwave radiation, energy efficient processes, fibrous and corrosion resistant materials.

Одним из завершающих технологических операций при изготовлении и ремонте технологического оборудования опасных производственных объектов нефтегазохимических отраслей промышленности является гидроиспытание с последующей осушкой внутренней полости аппарата от влаги. В нормативных документах регламентируются только температурно-временные параметры тепловой осушки. Так, после удаления воды трубное пространство теплообменной секции аппарата воздушного охлаждения может быть просушено воздухом температурой на входе от 170°С до 200°С. Продолжительность сушки должна обеспечивать выход воздуха в течение 15 мин., температурой не ниже 115°С из коллекторов, после чего секция должна быть загерметизирована [1]. Методы тепловой обработки при осушке воды, оставшейся в полости аппаратуры оболочкового типа,весьма

трудоемки и малоэффективны из-за высокой энергоемкости. Также они не могут быть применимы при создании аппаратуры из коррозионностойких композиционных и неметаллических волокнистых материалов для комплексов по переработке техногенных промышленных и бытовых отходов из-за отрицательного влияния высокотемпературных термо деформационных процессов.

Другие существующие методы осушки аппаратуры оболочкового типа как естественная конвекция, инфракрасная, микроволновая, акустическая и т.д. также малоэффективны в условиях аппаратостроительного производства, либо мало изучены [2-4].Поэтому исследование методов и разработка энергоресурсоэффективных способов осушки аппаратуры , остается одной из актуальных задач нефтехимического аппаратостроения .

Анализ литературных источников и проведенных экспериментальных исследований показал, что осушка аппаратуры с применением СВЧ-метода обладает неоспоримыми преимуществами перед другими, благодаря низкотемпературному нагреву остаточной воды внутри аппарата без его теплоизоляции и высокой экологической безопасности при сравнительно высокой энергоэффективности [4, 5].

Целью работы является математическое моделирование СВЧ-способа осушки оболочечных конструкций, результаты которого могут быть использованы при аппаратурном оформлении энергоресурсоэффективных безопасных процессов и создании аппаратов из коррозионно стойких, композиционных и неметаллических волокнистых материалов для безопасной переработки техногенных промышленных и бытовых отходов.

В качестве объекта исследований была принята модель аппарата оболочкового типа комплекса низкотемпературной переработки нефтешламовых отходов с выделением из углеводородсодержащих сред полезных вторичных нефтепродуктов. Схема аппаратурного оформления и функциональная модель узла осушки комплекса приведены на рисунке 1 и 2.

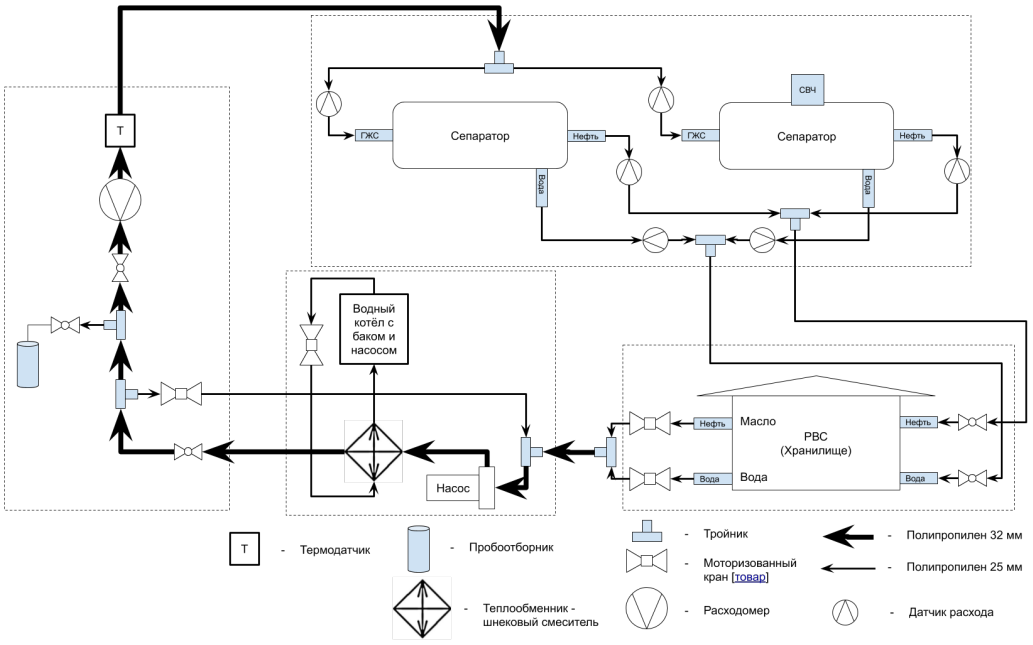


Рисунок 1 – Схема аппаратурного оформления комплекса низкотемпературной переработки нефтешламовых отходов

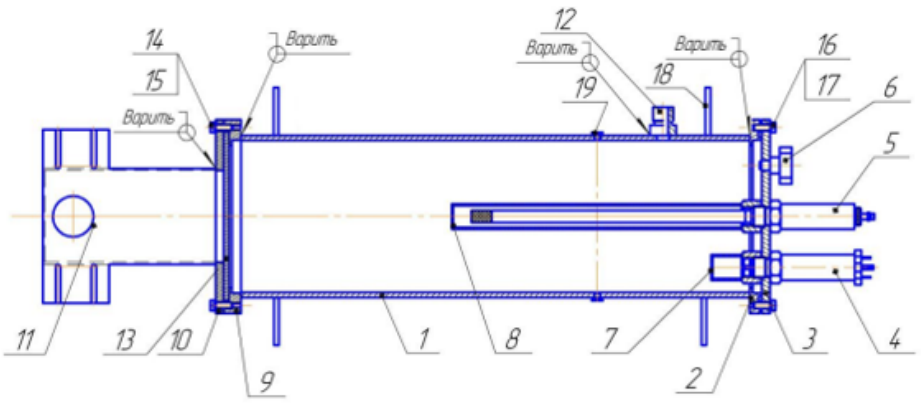


Рисунок 2 – Функциональная модель узла осушки

Критерием эффективности в математической модели примем время осушки. Управляемыми (задаваемыми) параметрами в модели примем мощность и частоту СВЧ-излучения, давление внутри осушаемого аппарата, определяющее температуру кипения воды, первоначальная масса воды и геометрия аппарата (условия распространения СВЧ-волны). Влияющими (неуправляемыми) параметрами являются агрегатное состояние воды, от которого зависят ее диэлектрические характеристики температура воды, определяющая также ее диэлектрические характеристики на различных частотах воздействия и потери энергии на металлических поверхностях осушаемого аппарата. В первом приближении эти влияния на время осушки в модели не учитываются, так как являются величинами второго порядка малости.

Время осушки определяется как суммарное время, необходимое для доведения температуры воды до кипения и время на парообразование до полной осушки аппарата:

$$T_{осушки} = t + T_n \qquad (1)$$

где t – время, необходимое для доведения температуры воды до кипения, определяется по (2), с; $T_п$ – время на парообразование до полной осушки аппарата, с.

На рисунке 3 приведена схема для расчета объема остаточной воды в модели коллектора АВО горизонтального цилиндрического исполнения.

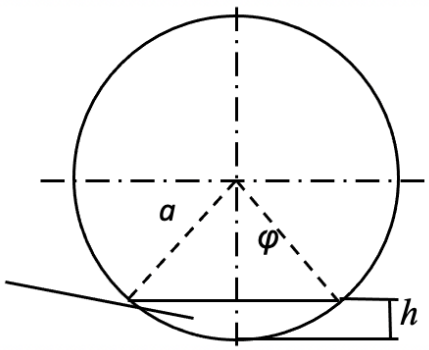


Рисунок 3 – Схема для расчета объема остаточной воды в аппарате.
a – радиус аппарата, *φ*– угол между вертикальной осью аппарата и точкой пересечения линии уровня воды в аппарате, *h* – высота уровня воды.

Время, необходимое для доведения температуры воды до кипения, определяется по формуле:

$$t = \frac{T\rho c}{4K}\left\{\int_0^l\int_{\frac{3\pi}{2}-\varphi}^{\frac{3\pi}{2}+\varphi}\int_{\frac{a-h}{\cos(\frac{3\pi}{2}-\xi)}}^{a} e^{-2\alpha^* a(1-\cos(\frac{3\pi}{2}-\xi))}\times \right.$$
$$\left.\times\left[\sum_{i=1}^{3}(Jn(i,(1-\cos(\xi)))^2+\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=0}^{1}(Jj(\eta_{ji}(1-\cos(\xi)))^2\right](\cos^2(\frac{3\pi}{2}-\xi))rdrd\xi dz\right\}^{-1} \qquad (2)$$

где $K=\omega\varepsilon_0\varepsilon'' E_0^2$, E_0 – амплитуда СВЧ-колебаний, В/м; Т – температура, °С; ω – круговая частота СВЧ-колебаний, рад/с; ε_0– электрическая постоянная, Ф/м; ε' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости воды; ε'' – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости воды; t– время нагрева за 1 цикл, с; c –теплоемкость воды, Дж/(кг·град); ρ – плотность воды, кг/м^3; Jj – функция Бесселя первого рода j-го порядка; $\eta_{j,i}$– корни Бесселевой функции; ξ – текущая координата по углу φ, рад.

$$\varphi = arccos((a-h)/a),$$

a, l – геометрические размеры емкости, м; h – высота уровня воды в емкости, м; λ – длина СВЧ-волны, м.

$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\ }$ – коэффициент затухания СВЧ-волны, дБ/м.

Расчеты по (2) показали, что время закипания воды при принятых размерах аппарата: радиус 1 м, длина 5 м, h – высота уровня воды – 0,06 м составляет 0,48 часа.

$T_п$ определяется по следующему алгоритму.

Определяем начальный объем оставшейся воды по формуле

$$V_0 = \int_0^l \int_{\frac{3\pi}{2}-\varphi}^{\frac{3\pi}{2}+\varphi} \int_{\frac{a-h}{\cos(\frac{3\pi}{2}-\xi)}}^{a} rdrd\xi dz \tag{3}$$

Находим площадь сегмента круга S_0:

$$S_0 = V_0/l \tag{4}$$

Площадь сегмента геометрически определяется по формуле:

$$S = (2\varphi - sin2\varphi)a^2/2 \tag{5}$$

Представим некоторую функцию $f(\varphi)$ в виде:

$$f(\varphi) = 2\varphi - sin2\varphi - 2S/a^2 \tag{6}$$

Из формулы (5) следует, что при $\varphi = 0$ также и S = 0, т.е. при отсутствии воды $f(\varphi) = 0$. Используя метод Ньютона, с заданной точностью рассчитаем время, необходимое для выпаривания воды. На каждой итерации рассчитаем углы φ_i по формуле:

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i - (2\varphi_i - sin2\varphi_i - 2S_i/a^2)/(1 - cos2\varphi_i) \tag{7}$$

С шагом Δt по времени СВЧ-нагрева, корректируем текущие параметры S_i,φ_iи h_i, изменившиеся за счет объема испарившейся воды. Для этого рассчитываем СВЧ-энергию,поглощенную водой за время текущего цикла (Δt) по формуле:

$$Q = 4K\Delta t \int_0^l \int_{\frac{3\pi}{2}-\varphi}^{\frac{3\pi}{2}+\varphi} \int_{\frac{a-h}{\cos(\frac{3\pi}{2}-\xi)}}^{a} e^{-2az}(a - a\cos(\frac{3\pi}{2} - \xi)) \times$$
$$\times \left[\sum_{i=1}^{3} (Jn(i,(1-\cos(\xi))))^2 + \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=0}^{1} (Jj(\eta_{ji}(1-\cos(\xi))))^2 \right] (\cos^2(\frac{3\pi}{2} - \xi))rdrd\xi dz \tag{8}$$

Далее определяем массу воды, выпариваемой за время Δt:

$$m = Q / L \tag{9}$$

где $L = 2{,}26 10^6$– удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Определяем объем оставшейся воды:

$$V_{n+1} = V_n - m/\rho \tag{10}$$

и соответствующую площадь водного сегмента:

$$S_{n+1} = V_{n+1}/l \tag{11}$$

Далее переходим на следующий шаг итерации, или итерационный процесс завершается**,** если для заданного $\varepsilon_\varphi > 0$ выполняется условие $\varphi_n - \varphi_{n+1} < \varepsilon_\varphi$.

По завершении итерационного процесса определяем время выпаривания воды как произведение количества итераций n на длительность СВЧ-нагрева за 1 шаг итерации:

$$T_п = n\Delta t \quad (12)$$

Затем по (1) определяем полное время осушки.

Результат вычислений по этой модели тем точнее, чем меньше время одной итерации Δt.

Результаты расчетов для времени цикла 100 секунд, частоты 2,4 ГГц и мощности генератора 1000 Вт приведены на рисунке 4.

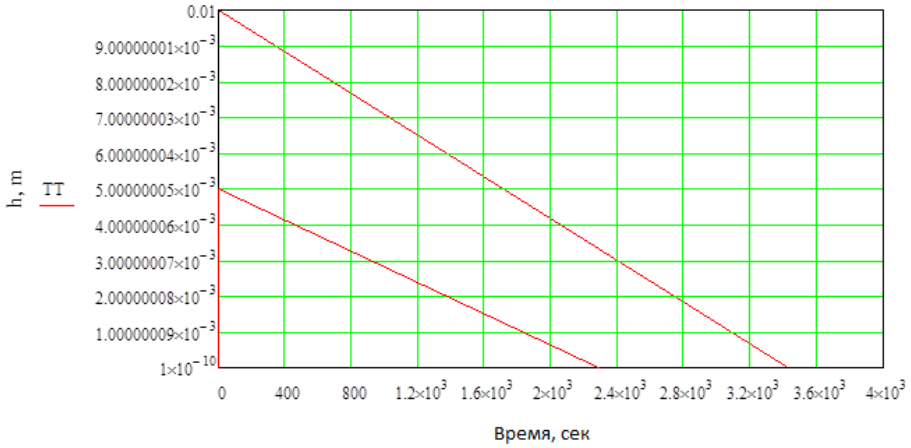


Рисунок 4 – Результаты расчетов

Время выпаривания при h=0.01м составляет 57 минут, при h=0.005м – 38 минут. Расчеты по формуле (2) показали, что время закипания воды при размерах аппарата: радиус 0,1 м, длина 3 м, h – высота уровня воды – 0,01 м составляет 6 минут. Полное время осушки по (1) составит 1 час 3 минуты.

Таким образом, результаты проведенных исследований обосновывают эффективность предлагаемого способа низкотемпературной осушки, нагревом остаточной воды внутри аппарата без его наружной теплоизоляции, что позволит проектировать аппаратуру из коррозионно стойких, композиционных и неметаллических волокнистых материалов для создания энергоресурсоэффективных процессов безопасной переработки техногенных промышленных и бытовых отходов. Получаемые на разработанной модели количественные характеристики являются исходными данными для инженерных расчетов при проектировании аппаратуры для реализации предлагаемого способа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ No 18-29-24178

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51364-99.Аппараты воздушного охлаждения.Общие технические условия.

2 .Богатков Л.Г. Консервация химического оборудования. – М.: Химия, 1981. – 168 с.

3.Хайретдинова А.Ф., Саитов Р.И., Абдеев Р.Г., Талипов Н.С. Исследование гигротермического метода контроля влажности зерна в процессе сушки/ Измерительная техника. 2012. № 1. С. 70-72.

4. Зарипов И.Р., Абдеев Р.Г., Абдеев Э.Р. Экспериментальное исследование процесса осушки аппаратуры оболочкового типа/ Нефтегазовое дело. 2011. Т. 9. № 3. С. 77-84.

5. Абдеев Р.Г., Зарипов И.Р., Швецов М.В., Талыпов Ш.М. Эффективный способ осушки и консервации нефтегазохимической аппаратуры/ В сборнике: Современные технологии в нефтегазовом деле - 2017. сборник трудов международной научно-технической конференции в 2-х томах. 2017. С. 88-91.

УДК 628.475.3 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-182-186

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ
EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE THERMAL DESTRUCTION PROCESS OF MUNICIPAL SOLID WASTE

Сокольский Анатолий Иванович, Колибаба Ольга Борисовна, Габитов Рамиль Наилевич, Долинин Денис Александрович
Anatoly I.Sokolsky, Olga B.Kolibaba, Ramil N. Gabitov, Denis A. Dolinin

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина– ИГЭУ, Россия, Иваново
Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin – ISPU, Russia, Ivanovo
(e-mail: tevp@tvp.ispu.ru)

Аннотация: Проведен термический анализ процесса деструкциисмеси твердых коммунальных отходов среднего морфологического состава при различных скоростях нагрева, по результатам которого оценено влияние величины скорости нагрева на тепловой эффект процесса и определен качественный состав газообразных продуктов.

*Abstract:*Thermal analysis of the destruction process of a mixture of municipal solid waste of average morphological composition at different heating rates was carried out, according to the results of which the influence of the heating rate on the thermal effect of the process was estimated and the qualitative composition of gaseous products was determined.

Ключевыеслова: пиролиз, твердыекоммунальныеотходы, термическийанализ, тепловойэффект.

*Keywords:*pyrolysis, municipal solid waste, thermal analysis, thermal effect.

В нашей стране накоплено более 350 млрд тонн отходов, экологически опасных для человека и окружающей среды. Твёрдыми коммунальными отходами (ТКО) заняты 1093 полигона (зарегистрированных), общая площадь которых составляет 197 тыс. га, а площадь нарушенных ими земель – более 2 млн га. Объем ежегодно появляющихся несанкционированных свалок превышает 40 млн тонн твердых коммунальных отходов. Выбрасываемые в атмосферу диоксины и фураны от дымящих и горящих свалок превышают предельно допустимые концентрации (ПДК) в 100÷2000 раз.

Проблема утилизации ТКО вызывает необходимость решения многофакторной задачи эколого-экономического обоснования выбора конкретной технологии утилизации отходов в сочетании с применением капиталоемкого оборудования. До настоящего времени не существует единого мнения относительно того, какая из технологий их переработки и утилизации является наиболее рациональной.

Широко известными технологиями утилизации отходов являются термические методы, к которым относятся сжигание (термическое обезвреживание), пиролиз (термическая деструкция) и газификация. Пиролиз представляет собой один из эффективных процессов термохимической переработки органических соединений, протекающий без участия кислорода при температурах до 800÷850℃, а в большинстве случаев температура процесса ограничивается 600℃. В результате пиролиза образуется горючий газ, жидкие продукты и твердый углеродистый остаток. Состав и количество промежуточных и конечных продуктов пиролиза зависят от температуры и скорости нагрева, продолжительности процесса, вида и состава органического сырья.

В технологиях переработки ТКО используют различные схемы пиролизных установок, в которых процесс пиролиза может сопровождаться небольшими подсосами воздуха (окислительный пиролиз) [1]. Метод окислительного пиролиза с последующим сжиганием пиролизных газов универсален и не зависит от фракционного состава и фазового состояния отходов.

Зачастую в пиролизных установках реализуются далеко не оптимальные режимы нагрева и переработки сырья [2]. В связи с этим, актуальной задачей является экспериментальное исследование процессов, протекающих при пиролизе отходов, изучение влияния различных факторов, таких как состав ТКО, степень предварительной подготовки, скорость нагрева и др. на эффективность переработки.

Подобные исследования проводились рядом ученых. Так, разработке способов повышения эффективности энергетического использования древесных отходов с использованием методов термического анализа посвящены публикации [3,4]. В работах [5, 6] изучено влияние параметров процесса пиролиза ТКО (времени и температуры) на соотношение твердых, жидких и газообразных продуктов. Авторами [7] рассмотрено влияние влажности ТКО и доли кислорода в атмосфере на выход и состав пиролизных газов в различных режимах окислительного пиролиза.

Целью данного исследования является проведение термического анализа процесса окислительного пиролиза смеси ТКО среднего морфологического состава при различных скоростях нагревадля оценки влияния величины скорости нагрева на тепловой эффект пиролиза иопределения качественного состава газообразных продуктов.

Экспериментальное исследование процесса окислительного пиролиза ТКО проводили с использованием метода синхронного термического анализа, объединяющего в одном измерении:

термогравиметрию (ТГ – анализ) [8], в ходе которой непрерывно фиксировалось изменение массы исследуемого образца при изменении его температуры;

дифференциально-сканирующую калориметрию (ДСК), в ходе которой непрерывно фиксировались термические эффекты, которыми сопровождались фазовые и химические превращения образца при его нагреве;

ИК-Фурье спектроскопия [9, 10], в ходе которой были получены инфракрасные спектры поглощения пиролизного газа при различной температуре.

Метод синхронного термического анализа основан на одновременной непрерывной регистрации изменений характеристик образца, обусловленных фазовыми переходами или химическими реакциями, в зависимости от времени или температуры при нагревании в соответствии с выбранной температурной программой в заданной газовой атмосфере. Метод позволяет получать информацию о составе, термической и окислительной стабильности материалов, фазовых переходах, температурах протекания химических реакций.

Результаты термического анализа представлены в виде термогравиметрических (ТГ) кривых – графиков зависимости изменения массы навески от температуры или во времени. Значение производной от ТГ-кривой (дифференциально-термогравиметрический анализ – ДТГ) позволяет установить температуру (интервал времени), при которых происходит максимальное изменение массы образца.Методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) было установлено количество теплоты, которое выделялось или поглощалось в результате химических реакций в процессе пиролиза образца ТКО.

Экспериментальные исследования процесса пиролиза были проведены для образцов смеси ТКО среднего морфологического состава: пищевые отходы – 48,6 %; бумага – 41,7 %; текстиль – 6,9 %; дерево – 1,4 %; резина – 1,4 % [11] в атмосфере с содержанием кислорода 1% [7].

Лабораторное оборудование для выполнения исследований представлено комплексом синхронного термического анализа фирмы NETZSCH. Измерительный комплекс состоит из блока термического анализа STA 449 F3 Jupiter, спектрометра ИК-Фурье с приставкой диффузионного отражения Tensor 27 BrukerOptics и блока импульсного термического анализа PulseTA. Оборудование даёт возможность одновременно фиксировать изменение теплового потока и массы образца в зависимости от его температуры или во времени.

Экспериментальные исследования пиролиза ТКО проводили в следующей последовательности. Образец ТКО среднего морфологического состава массой 5÷15 мг нагревали со скоростями 5, 10 и 15 градусов в минуту в интервале температур (30÷900) °С в среде инертного газа (аргона), обогащенного кислородом (1% об.).В ходе эксперимента

непрерывно регистрировалось изменение массы образца ТКО в процессе его нагрева (ТГ-кривая), температура образца и ДСК сигнал.

Качественный состав выделяющихся газообразных продуктов пиролиза был определен с помощью ИК-Фурье спектрометра с приставкой диффузионного отражения Tensor 27 BrukerOptics. Расшифровку полос поглощения различных веществ проводили с помощью сравнения их с известными полосами на ИК спектрах соединений, имеющих в своем строении подобные функциональные группы [12].

Результаты исследований продуктов термического анализа образцов ТКО в инертной среде представляют собой ТГ, ДСК и ДТГ кривые, строящиеся в автоматическом режиме и обрабатываемые с помощью программного пакета Proteus. Пример термограммы, полученной при нагреве образца ТКО со скоростью 10 °С/мин представлен на рис. 1.

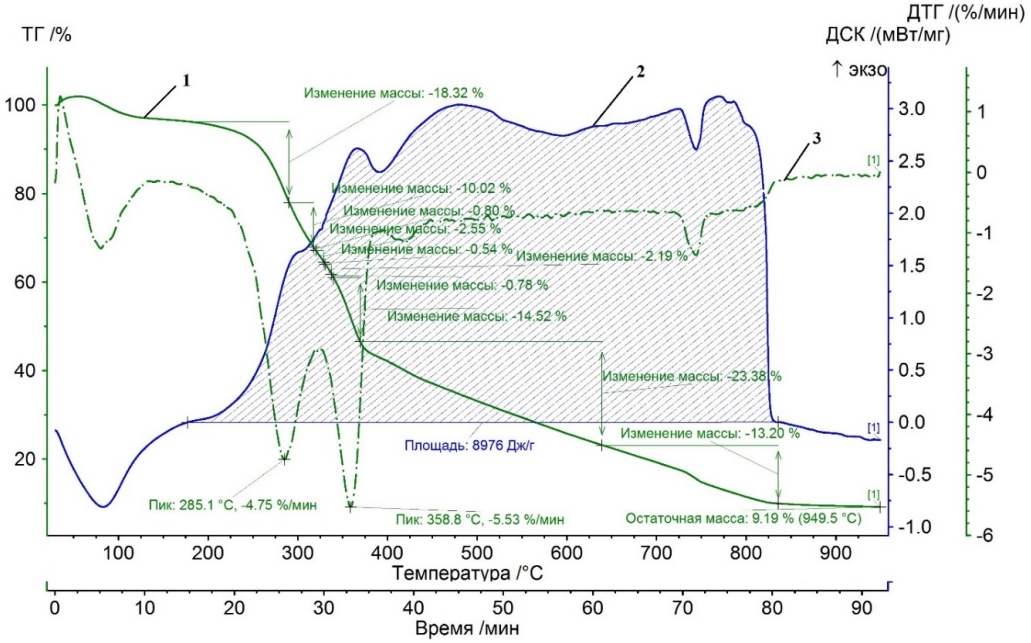


Рисунок 1 – Результаты термического анализа: 1- ТГ, 2 - ДСК и 3 - ДТГ для смеси ТКО при скорости нагрева 10 °С/мин.

Аналогичные данные получены при нагреве образца ТКО со скоростями 5 и 15 °С/мин. Результаты термического анализа процесса пиролиза ТКО среднего морфологического состава при скоростях нагрева 5, 10 и 15 °С/мин представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты термического анализа пиролиза ТКО.

Скорость нагрева, °С/мин	Температура начала пиролиза, °С	Температура окончания пиролиза, °С	Температура пика выделения энергии, °С	Остаточная масса, %	Максимальная скорость убыли массы, %/мин	Тепловой эффект пиролиза, Дж/г
5	220	680	349,1 (2,48 мВт/мг)	13,22	4,24 (343,4 °С)	7969
10	240	830	366,1 (2,82 мВт/мг)	9,19	5,76 (358,9 °С)	8976
15	240	950	377,7 (3,43 мВт/мг)	11,5	8,85 (370,9 °С)	1769

Анализ результатов эксперимента показывает увеличение температур начала и окончания пиролиза при возрастании скорости нагрева. Максимальный тепловой эффект пиролиза наблюдается при скорости нагрева 10 °С/мин. При этом дальнейший рост скорости сопровождается значительным уменьшением теплового эффекта пиролиза.

На рис. 2 приведены термогравиметрические кривые пиролиза образцов ТКО при различных скоростях нагрева. При скорости 5 °С/мин для завершения процесса требуется от 2,5 до 3 часов. Повышение скорости нагрева до 10 °С/мин приводит к сокращению

временипротекания процесса до 1,5 часов. Дальнейшее увеличение скорости до 15°С/мин не приводит к значительному ускорению процесса пиролиза, однако сопровождается смещением температуры окончания пиролиза до значений свыше 950 °С.

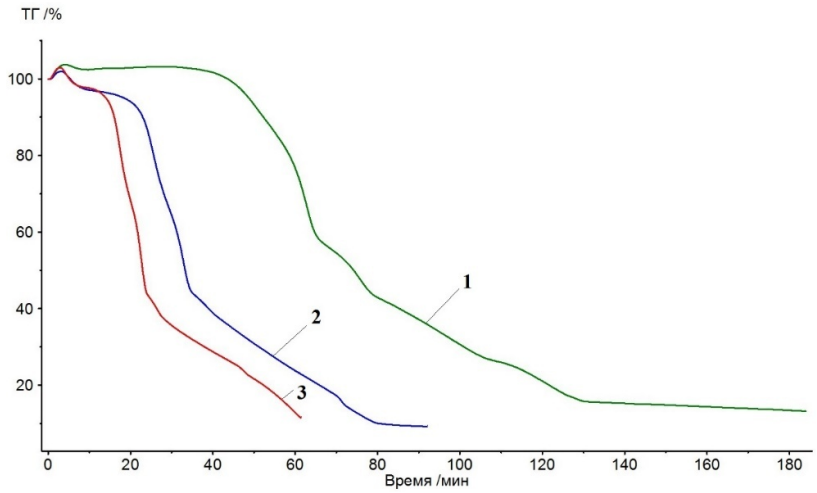


Рисунок 2 – Термогравиметрические кривые при скоростях нагрева: 1 – 5 °С/мин; 2 – 10 °С/мин; 3 – 15 °С/мин.

Данные ИК-спектроскопии, характеризующие выход газообразных продуктов термического разложения ТКО, представлены на рис. 3.

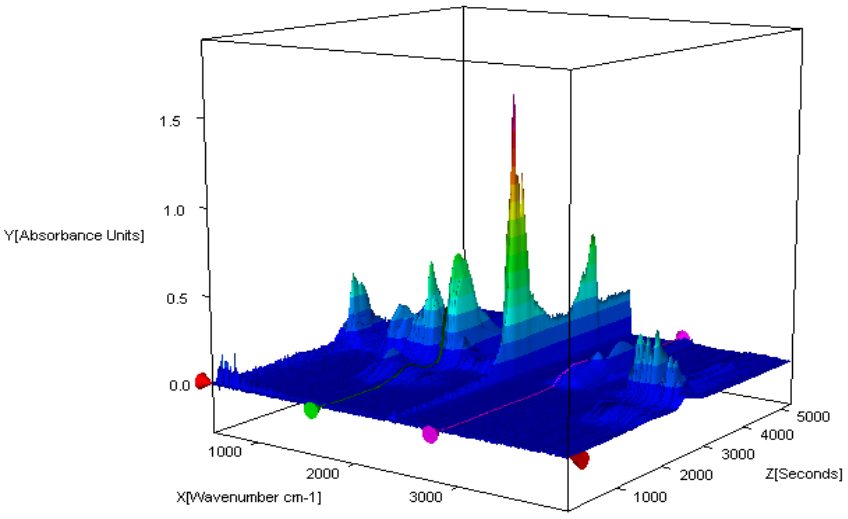


Рисунок 3 – ИК-спектры образца смеси ТКО при нагревании от 25 до 950 °С со скоростью 10 °С/мин.

Качественный состав пиролизного газа определен в результате обработки полученных ИК-спектрограмм и сравнения их с ИК-спектрами веществ в базах данных NIST. Анализ показал, что основными компонентами пиролизного газа являются CO, CH_4, H_2,CO_2, H_2O.

Выводы

Проведен термический анализ процесса деструкции смеси ТКО среднего морфологического состава при скоростях нагрева5, 10 и 15 °С/мин в интервале температур (30÷900)°С в средеаргона, обогащенного кислородом (1% об.)., в результате которого получены данные о выходе летучих соединений, максимальной скорости убыли массы и температуре пиков тепловыделения. Максимальный тепловой эффект пиролиза наблюдается при скорости нагрева 10 °С/мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ №2433344 Установка для термического разложения несортированных твердых бытовых отходов / Долинин Д.А., Габитов Р.Н., Семин Е.С., Самышина О.В., Колибаба О.Б., Горинов О.И., Горбунов В.А. Опубл.: 10.11.2011, Бюл. №31.

2. Термическая утилизация твердых бытовых отходов (ТБО) варианты технологии. – Текст: электронный // Научно-исследовательский институт строительных материалов и композитов: [сайт]. – 2014. – URL: https://www.stromkomposit.ru/8.html (дата обращения: 18.02.2021).

3. Федюхин А.В., Султангузин И.А., Яворовский Ю.В. Разработка установки производства тепловой и электрической энергии в ПГУ на основе пиролиза или газификации биомассы // Энергосбережение – теория и практика: труды Шестой Международной школы – семинара молодых ученых и специалистов. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2012. – С. 359 – 364.

4. Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Шкаева Н.В., Любов В.К. Экспериментальное исследование процесса термической подготовки и воспламенения биотоплива / Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 11 (часть 1) – С. 71–76.

5. Ивахнюк Г.К., Аверьянова Н.А., Талдыкин Ю.А. Пиролиз – способ решения термической переработки твердых бытовых отходов /Журнал прикладной химии. – 2006 – № 7 – С. 1229.

6. Кузнецов Г.В., Полсонгкрам М. Зависимость состава продуктов пиролиза древесной биомассы от режима теплового воздействия // Научно - технический вестник Поволжья. – 2011. – № 1. – С. 125–129.

7. Колибаба, О.Б. Экспериментальное исследование окислительного пиролиза твердых бытовых отходов / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, К.В. Аксенчик, В.А. Артемьева // Вестник ИГЭУ. – 2017. – №. 3. – С. 14-19. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.014.

8. Уэндландт, У. Термические методы анализа / У. Уэндландт. – М.: Мир, 1978. – 527 с.

9. Тарасевич, Б.Н. Основы ИК спектроскопии с преобразованием Фурье. Подготовка проб в ИК спектроскопии / – М.: МГУ, 2012. – 22 с.

10. Ефимова, А.И. Инфракрасная Фурье-спектрометрия: Учебное пособие / А.И. Ефимова, В.Б. Зайцев, Н.Ю. Болдырев, П.К. Кашкаров // М.: Физический факультет МГУ, 2008. – 133 с.

11. Методические рекомендации по формированию тарифов на услуги по уничтожению, утилизации и захоронению твердых бытовых отходов: [сайт]. – 2014. – URL: http://base.garant.ru/70236896/ (дата обращения: 04.12.2020).

12.Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия / Смит А. – пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 328 с.

УДК 519.812.3: 665.622.43 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-187-189

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИХ ПРОЦЕССЫ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И ДЕЭМУЛЬСАЦИИ В СЛАБОПРОВОДЯЩИХ СПЛОШНЫХ СРЕДАХ
ANALYSIS OF FACTORS INTENSIFYING PROCESSES DISPERSION AND DEMULSATION IN WEAK CONDUCTIVE CONTINUOUS MEDIA

Таранцев Константин Валентинович*, Таранцева Клара Рустемовна**
Konstantin V. Tarantsev*, Klara R. Tarantseva**

**Пензенский государственный университет, Россия, Пенза*
** Penza State University, Russia, Penza*
(e-mail: kvtar@bk.ru)
***Пензенский государственный технологический университет, Россия, Пенза*
*** Penza State Technological University, Russia, Penza*
(e-mail: krtar@bk.ru)

Аннотация: Проанализированы физико-химические явления, происходящие под действием сил электрического поля вблизи границ раздела фаз слабопроводящих сплошных сред. Показано, что создание в данных средах электрических полей высокой напряженности непосредственно на границах раздела фаз, там, где сосредоточены основные сопротивления процессам массообмена, позволяет интенсифицировать процессы диспергирования и деэмульсвации силами электрического поля при малых энергозатратах.

Abstract: Physicochemical phenomena occurring under the action of electric field forces near the phase boundaries of weakly conductive continuous media are analyzed. It is shown that the creation of high-intensity electric fields in these media directly at the phase boundaries, where the main resistances to mass transfer processes are concentrated, makes it possible to intensify the processes of dispersion and demulsification by electric field forces at low energy consumption.

Ключевые слова: интенсификация, факторы, процессы, диспергирование, деэмульсация, слабопроводящие среды, электрическое поле.

Keywords: intensification, factors, processes, dispersion, demulsification, weakly conductive media, electric field

Технологические процессы в многофазных дисперсных средах, в основе которых лежит перенос вещества или энергии через развитую поверхность контакта фаз, широко используются в различных отраслях промышленности. Применительно к гетерогенным средам интенсификация процессов переноса определяется возможностью изначального увеличения удельной межфазной поверхности за счет диспергирования одной из фаз. Наряду с этим, определенный вклад в ускорение межфазного тепло- или массообмена вносит увеличение коэффициентов переноса, например, за счет повышения конвективной составляющей переноса или вследствие периодического возмущения межфазной поверхности. И, наконец, интенсификация процессов в дисперсных средах связана с возможностью поддержания достаточно высокой разности потенциалов переноса с обеих сторон межфазной поверхности [1].

Интенсивность переноса, которая характеризует количество вещества или энергии, переносимых через межфазную поверхность в единицу времени в единице объема аппарата, является функцией всех трех указанных факторов и определяется по формуле

$$I = SK\Delta U \qquad (11)$$

где I – интенсивность тепло- или массопереноса; S – удельная поверхность контакта фаз, м$^{-1}$; K – коэффициент тепло- или массопереноса; ΔU – потенциал переноса.

Обязательным условием, обеспечивающим принципиальную возможность воздействовать на скорость протекания процессов в дисперсных средах, является наличие относительной скорости движения фаз. Она способствует, во-первых, конвективному переносу, во-вторых, приводит к увеличению межфазной поверхности (в системах с легкодеформируемой дисперсной фазой). Таким образом, увеличение абсолютной величины скорости относительного движения дисперсной фазы способствует возрастанию каждого из параметров в правой части уравнения (1), и является причиной возникновения силового поля вблизи границ раздела фаз. Величина сил обусловливается противодействием динамического, инерционного давления и вязкостного сопротивления.

Слабопроводящие сплошные среды, обычно имеют очень малую электропроводность. Это позволяет создать в них электрические поля высокой напряженности непосредственно на границах раздела фаз, там, где сосредоточены основные сопротивления процессам массообмена. В результате эффект интенсификации процессов силами электрического поля достигается при малых энергозатратах и процессы создания и разрушения эмульсий в электрическом поле успешно конкурируют и дополняют гидродинамические, тепловые и химические процессы. Применение электрического поля позволяет существенно изменить количественные и качественные параметры процессов диспергирования и деэмульсации слабопроводящих сплошных сред за счет использовании физико-химических явлений, происходящих вблизи границ раздела фаз под действием электрических сил. Наблюдаемый эффект возможен за счет [2]:

- самоорганизации сложной системы в точке бифуркации за счет нелинейных физико-химических эффектов и многофакторных воздействий, т.е. воздействия сил электрического поля, приводящего к образованию вторичных структур за счет нелинейных эффектов;
- концентрационной избирательности, т.е. интенсификации химико-технологического процесса за счет концентрации энергетического воздействия на объект в нужном месте и в нужное время. В частности, для интенсификации процессов диспергирования или деэмульсации необходимо приложение действующей силы в непосредственной близости от границ раздела;
- дискретности, позволяющей существенно уменьшить энергетические затраты на процесс за счет дискретного подвода или отвода определенной порции энергии турбулентного вихря к поверхности фазового раздела.

Подробное рассмотрение частных явлений и деталей механизма позволило установить лимитирующее звено механизма – границы раздела капель эмульсии, и выбрать соответствующее этому звену интенсифицирующее воздействие – силы электрического поля, позволяющие получить эффект при малых энергетических затратах. Степень интенсификации химико-технологического процесса зависит от количественных параметров энергетического воздействия силами электрического поля и от эффективности воздействия управляющего, интенсифицирующего фактора на процессы диспергирования и коалесценции капель.

В результате наших исследований выявлено [3-6], что на процессы создания и разрушения эмульсий со слабопроводящей сплошной средой оказывают влияние как электрофизические (электропроводность, диэлектрическая проницаемость), так и гидродинамические (плотность, вязкость, поверхностное натяжение) параметры. Выявлены факторы, интенсифицирующие процессы диспергирования и деэмульсации (рисунок1).

Показано, что электрогидродинамические эффекты приводят к изменению количественных и качественных параметров процессов диспергирования и деэмульсации слабопроводящих сплошных сред. Выявлено, также, что величина энергозатрат при проведении процессов электродиспергирования и электродеэмульсации слабопроводящих сплошных сред на порядок ниже, чем при использовании для интенсификации процессов акустических, электродинамических, вибрационных и механических воздействий [7].

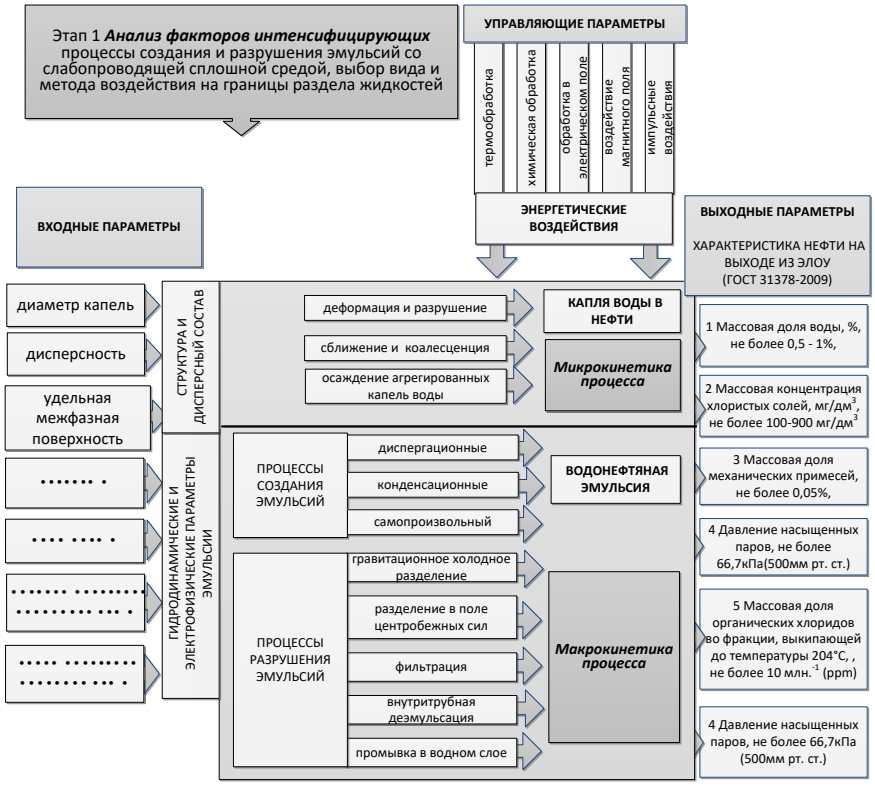


Рисунок 1 –Факторы и параметры, влияющие на выбор вида энергетического воздействия и метода интенсификации процессов диспергирования и деэмульсации.

Поэтому в качестве метода энергетического воздействия на границы раздела жидкостей в аппаратах создания и разделения эмульсий со слабопроводящей сплошной средой, из всего многообразия энергетических воздействий рекомендуется использовать электрическое поле, позволяющее при малых энергозатратах существенно интенсифицировать данные процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимонин А.С. и др. Инженерно-экологический справочник. Изд. 2-е, Т. 2. – Калуга: Ноосфера, 2015. – 960 с.

2. Жаворонков Н.М., Кафаров В.В., Перов В.Л. и др. Новые принципы анализа и синтеза химико-технологических систем //Теоретические основы химической технологии. 1970. 4. С. 152–167.

3. Tarantsev K.V., Tarantseva K.R. Influence of Electric Field Frequency on the Process of De-struction of Water-Oil Emulsions in Electric Dehydrators // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. 53. P. 515–518.

4. Tarantsev K. V., Tarantseva K. R. Influence of Turbulence on the Processes of Creation and Destruction of Water-Oil Emulsions During Crude Oil Desalting // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. 53. P. 699–702.

5. Tarantsev K. V., Tarantseva K. R. Influence of Electric Field Strength on the Processes of Destruction and Creation of Water-Oil Emulsions During Crude Oil Desalting // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. 53. P. 703–706.

6. Tarantsev K. V., Tarantseva K. R. Effect of Electric Field Nonuniformity on the Processes of Creation and Destruction of Water-Oil Emulsions During Crude Oil Desalting// Chemical and Petroleum Engineering. 2017. 53. P. 707–710

7. Белынский В.В., Васильцов Э.А., Ушаков В.Г. Оценка технического уровня аппаратов с перемешивающими устройствами // Химическое и нефтяное машиностроение. 1976. № 7. С. 27–29.

УДК 534-8 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-190-194

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ВОЗДУШНОМ ПРОМЕЖУТКЕ КАК ФАКТОРА БЕСКОНТАКТНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
SIMULATION OF VORTEX ACOUSTIC FLOWS IN AIR GAP AS A FACTOR OF CONTACTLESS ULTRASONIC INTENSIFICATION OF CHEMICAL-TECHNOLOGICAL PROCESSES

Хмелёв Владимир Николаевич, Шалунов Андрей Викторович, Голых Роман Николаевич, Нестеров Виктор Александрович, Боченков Александр Сергеевич
Vladimir N. Khmelev, Andrey V. Shalunov, Roman N. Golykh, Viktor A. Nesterov, Alexander S. Bochenkov

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Россия, Алтайский край, Бийск
Biysk Technological Institute (branch) of AltSTU named after I.I. Polzunov, Russia, Altai Region, Biysk
(e-mail: romangl90@gmail.com)

Аннотация: Предложена численная модель формирования акустических течений в воздушном промежутке. Построены картины визуализации рассчитанных течений, формируемых различными типами излучателей. Выявлена зависимость скорости течения от толщины воздушного промежутка, включающая резонансную толщину.

Abstract: A numerical model of the formation of acoustic flows in the air gap is proposed. Visualization patterns of the calculated flows generated by various types of emitters are constructed. The dependence of the flow rate on the thickness of the air gap including the resonance thickness is revealed.

Ключевые слова: ультразвук, воздушный промежуток, акустические течения, моделирование, вихрь

Keywords: ultrasound, air gap, acoustic flows, modeling, vortex.

Бесконтактная реализация процессов под действием ультразвуковых колебаний через газовый промежуток, несмотря на то, что имеет ряд преимуществ (возможность интенсификации процессов с дисперсной поверхностью раздела; простота внедрения ультразвукового излучателя; излучатель меньше подвергается химическому воздействию, если речь идёт о процессах в агрессивном веществе) сопряжена с затруднительным подведением высокой энергии к активному веществу (сплошному жидкому, сплошному твёрдому или пористому). Несмотря на многочисленные попытки совершенствования конструкций ультразвуковых излучателей, предназначенных для воздействия на газовые среды (чтобы обеспечить наибольшую равномерность распределения колебаний; исключить взаимную компенсацию ультразвуковых волн в противоположных фазах; обеспечить стабильность частоты колебаний, требуемой для интенсификации заданного процесса; обеспечить увеличенную амплитуду колебаний, которая пропорционально определяет уровень звукового давления в газе) [1, 2], и озвучиваемых объёмов (чтобы обеспечить резонансный режим), подведению высокой энергии к активному веществу препятствует принципиальное физическое ограничение – малость волнового сопротивления газовой фазы по сравнению с материалом излучателя и активным веществом. В свою очередь известно, что высокоинтенсивные ультразвуковые колебания способны инициировать вторичные нелинейные эффекты (акустические течения), для образования которых затрачивается значительная часть введённой энергии колебаний.

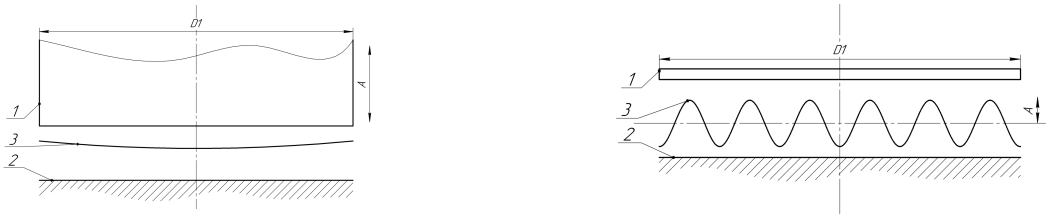
Поэтому необходимо проводить исследования в новом направлении, связанном не с увеличением вводимой энергии колебаний («обходом» ограничения, связанного с малостью волнового сопротивления газа), а с тем, как наиболее полно использовать уже введённую энергию. Речь идёт о том, чтобы для интенсификации процессов использовать не только ту часть энергии, которая переходит в колебательное движение газовой фазы, но и энергию вторичных нелинейных эффектов. Например, формируемые акустические течения потенциально можно использовать для:

– локального повышения концентрации частиц в процессе ультразвуковой коагуляции за счёт сил инерции (по аналогии с циклоном для инерционного улавливания частиц) в акустических течениях, которые имеют форму вихрей. Повышенная концентрация пропорционально увеличит частоту столкновения частиц;

– обдува поверхности материала в ходе ультразвуковой сушки, что дополнительно увеличит скорость испарения влаги.

Измерение параметров акустических течений сопряжено с затруднениями даже с использованием наиболее совершенных методов, например PIV (Particle Image Velocimetry), поскольку акустические течения имеют малый масштаб (не превышают половину длины ультразвуковой волны в газе). Поэтому на первом этапе целесообразно исследовать акустические течения методом математического моделирования.

Моделирование формирования акустических течений проводилось на примере воздушного промежутка при использовании различных типов излучателей. На сегодняшний день для формирования ультразвуковых колебаний в газовых средах наибольшее распространение получили 2 типа излучателей – совершающие плоские колебания (поршневой излучатель) и изгибные колебания (изгибно-колеблющаяся мембрана) [1, 2]. Для этих типов излучателей формирование акустических течений будет рассчитываться. Схематично формирование колебаний с помощью каждого излучателя изображено на рисунке 1.



а) поршневой излучатель б) изгибно-колеблющийся излучатель

1 – излучатель; 2 – отражатель;
3 – форма (распределение) колебаний излучающей поверхности

Рисунок 1 – Излучатели для формирования ультразвуковых колебаний в газовых средах

Для формирования вихревых акустических течений, в первую очередь, необходимо рассчитать распределение амплитуд и фаз звукового давления в воздушном промежутке в виде комплексной амплитуды P(**r**). Расчет звукового давления проводится аналитическим методом на основе решения уравнения Гельмгольца. Учитывается поглощение колебаний в газовой фазе (поглощение колебаний – определяющий механизм формирования акустических течений), упругость и поглощение колебаний в отражателе.

Произведены расчёты УЗ поля, создаваемого каждым из представленных типов излучателей.

Для поршневого излучателя, градиент амплитуды звукового давления имеет ненулевую компоненту только вдоль одной оси *z*. Это означает, что эквивалентная сила, которая способна инициировать «звуковой ветер», направлена также вдоль оси *z*. Однако поскольку отражатель, расположенный напротив излучателя, служит препятствием для «звукового ветра», то акустических течений в воздушном промежутке при поршневом излучателе фактически не образуется, а эквивалентная сила приводит к образованию градиента статического давления в

газе, противодействующего силе (возможно возникновение одиночного вихревого течения из-за неоднородности поля вблизи боковых стенок). Т.е. поршневой излучатель практически не способен создать вихревые акустические течения (имеется слабый одиночный вихревой поток, вызванный наличием неоднородностей колебаний на краях излучателя).

Поэтому далее проведены расчёты распределения уровня звукового давления при изгибно-колеблющемся излучателе, способного создать звуковое поле с градиентом по разным направлениям (в отличие от поршневого излучателя, способного обеспечить градиент поля лишь в направлении, перпендикулярном поверхности излучателя), что должно привести к возникновению новых нелинейных эффектов, способствующих повышению эффективности процессов через газовые промежутки (рисунок 2).

Расчёты проводились для параметров среды в воздушном промежутке и колебаний излучателя, приведённых в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры среды в воздушном промежутке и колебаний излучателя

Наименование параметра	**Значение**
Уровень звукового давления вблизи центра излучателя (при отсутствии отражателя), дБ	150
Амплитуда колебаний центра излучателя, мкм	16
Частота колебаний излучателя, кГц	22
Плотность среды, кг/м^3	1,22
Скорость звука в среде, м/с	343
Коэффициент поглощения акустических колебаний в среде, м$^{-1}$	0,1

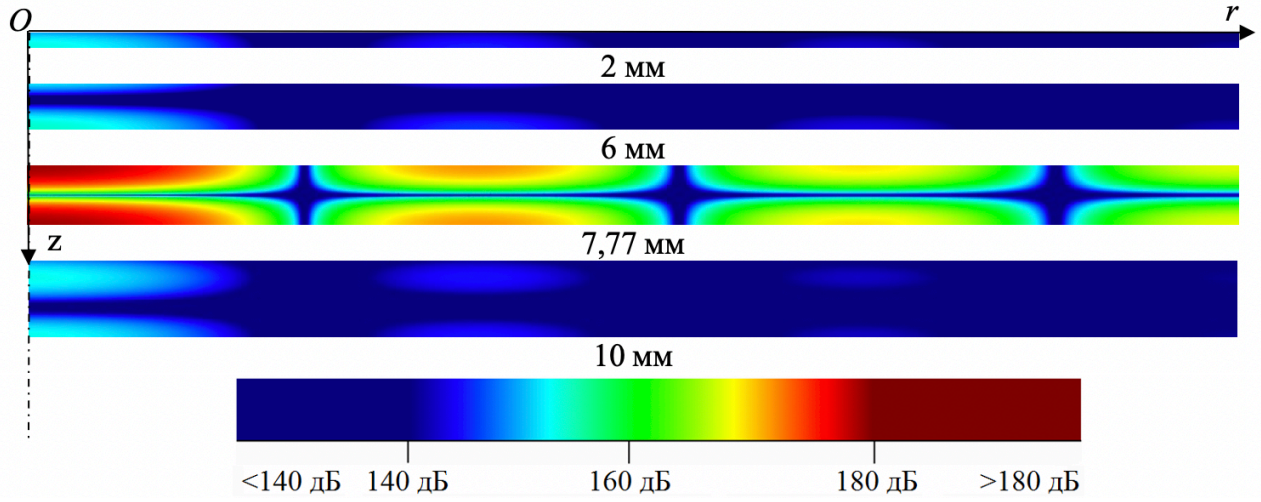


Рисунок 2 – Распределения колебаний для изгибно-колеблющегося излучателя при различных толщинах воздушного промежутка (максимальный уровень звукового давления вблизи центра излучателя при отсутствии отражателя – 150 дБ, соответствует размаху колебаний центра – 31 мкм, диаметр воздушного промежутка – 320 мм, радиус – 160 мм)

Согласно полученным распределениям, градиент амплитуды звукового давления (а так как есть поглощение колебаний то будет и градиент фазы) имеет ненулевые компоненты по всем координатным осям. При этом, в зависимости от положения наблюдаемой точки в пространстве, градиент амплитуды может быть направлен под различным углом (от 0 до 2π) к поверхности излучателя. Это означает, что и эквивалентная объёмная сила, способная инициировать «звуковой ветер», имеет аналогичные направления, создавая вихревое движение.

Для определения функции тока использовалось уравнение сохранения импульса газа в вихревом потоке под действием эквивалентной силы, определяемой на основании распределений звукового давления, полученных в предыдущем подразделе. Нелинейное

уравнение (1) решалось итерационным методом, состоящим из решения последовательности линейных краевых задач.

$$(\mathbf{u}, \nabla)\mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho_0} + \nu\Delta\mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\mathbf{F} \sim \left(\nabla(\mathrm{Re}P) \times \nabla(\mathrm{Im}\,P)\right) \quad (2)$$

При этом на границе воздушного промежутка функция тока тождественно равна нулю. Решение представленной системы уравнений позволяет рассчитать функцию тока формируемых вихрей.

На следующем рисунке 3 представлены линии тока при различных расстояниях между изгибно-колеблющимся излучателем и отражателем:

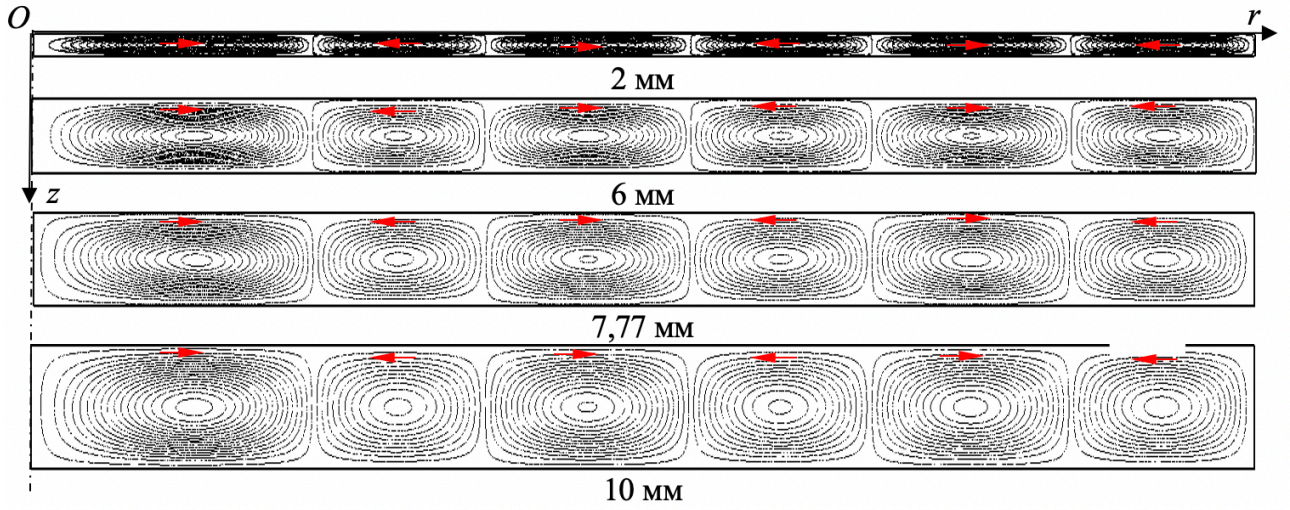


Рисунок 3 – Линии тока вихревых акустических течений в газовой фазе при различных толщинах слоя (изгибно-колеблющийся излучатель, максимальный уровень звукового давления вблизи центра излучателя при отсутствии отражателя – 150 дБ, соответствует размаху колебаний центра – 31 мкм, диаметр воздушного промежутка – 320 мм)

На рисунке 4 приведена зависимость максимальной скорости вихревого акустического течения от толщины воздушного промежутка для изгибно-колеблющегося излучателя. Видно, что скорость вихря достигает своего максимального значения при резонансной толщине воздушного промежутка.

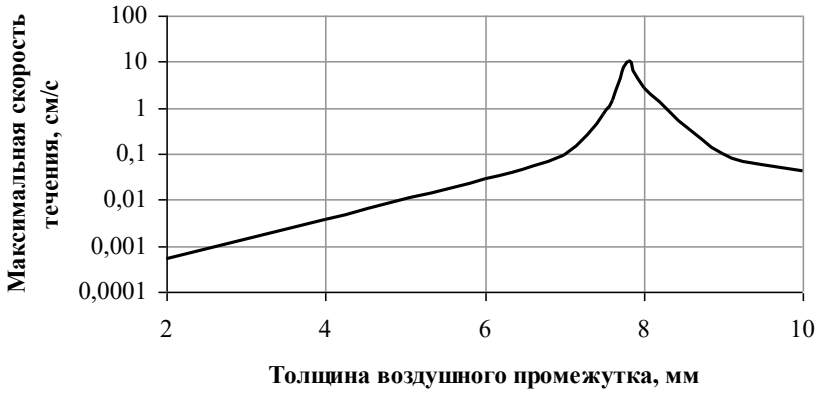


Рисунок 4 – Зависимость скорости акустических течений от толщины воздушного промежутка

Как следует из представленного рисунка, скорость формируемых акустических течений в резонансном режиме может достигать 10 см/с (0,1 м/с). Сила инерции, формируемая такими течениями, учитывая малый радиус их кривизны, оказывается сопоставимой с силой, формируемой в промышленных циклонах. Это может способствовать дополнительному увеличению эффективности процесса в газодисперсной среде. Кроме того, скорость формируемых акустических течений оказывается достаточной для дополнительного увеличения скорости испарения влаги за счёт обдува поверхности высушиваемого материала.

Выводы

Предложена численная модель формирования акустических течений в воздушном промежутке. Построены картины визуализации рассчитанных течений, формируемых различными типами излучателей. Выявлена зависимость скорости течения от толщины воздушного промежутка, включающая резонансную толщину.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Алтайского края Российской Федерации в рамках научного проекта № 18-48-220006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khmelev, V.N. Summation of high-frequency Langevin transducers vibrations for increasing of ultrasonic radiator power [Текст] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov // Ultrasonics. – 2021. – Volume 114. – 106413.

2. Andrés García, R. Airborne power ultrasound for drying process intensification at low temperatures: Use of a stepped-grooved plate transducer [Текст] / R. Andrés García, E. Riera, J. Gallego-Juarez, A. Mulet, J.V. Garcia-Perez, J. Cárcel // Drying Technology. – 2019. – 39 (2). – P. 1-14.

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-194-198

УЧЕТ РАННЕГО КРИЗИСА СОПРОТИВЛЕНИЯ КАПЕЛЬ В ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЯХ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА РАСПЫЛЕННОЙ В ГАЗЕ ЖИДКОСТИ
ACCOUNT OF EARLY DRAG CRISIS OF DROPS IN NUMERICAL MODELS OF TWO-PHASE FLOW OF LIQUID SPRAYED IN A GAS

Симаков Николай Николаевич
Nikolai N. Simakov

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны
Россия, Ярославль
Yaroslavl Higher Military School of Air Defense
Russia, Yaroslavl
(e-mail: nik_simakov@mail.ru)

Аннотация: Изложены представления и рекомендации по учету раннего кризиса сопротивления капель в численных моделях для расчета двухфазных потоков, образующихся при распыливании жидкости в газе с помощью форсунок.

Abstract: There are presented ideas and recommendations for taking into account the early crisis of droplets drag in numerical models for calculating two-phase flows formed when a liquid is sprayed in a gas using nozzles.

Ключевые слова: форсунка, распыливание жидкости, двухфазный поток, ранний кризис сопротивления капель, коэффициент сопротивления, расчет.

Keywords: nozzle, liquid spraying, two-phase flow, early crisis of droplets drag, drag coefficient, calculation.

В ряде отраслей экономики: энергетике, транспорте, химических технологиях, - используют распыливание жидкости в газе, например, с помощью форсунок. Это делается для

интенсификации тепломассообмена фаз путем увеличения межфазной поверхности в таких процессах, как сжигание жидких топлив, сушка и гранулирование полимеров, мокрая очистка воздуха от пыли и вредных газовых примесей.

Удовлетворительные методы расчета таких процессов до недавнего времени не были разработаны, *чем* обусловлена *актуальность* данной работы также, как работ [1] и [2]. Предполагаемой причиной этого обстоятельства явилось то, что в моделях факела распыла при расчете межфазного взаимодействия в сильнотурбулентном потоке не учитывалась важная особенность, а, именно, обнаруженное в эксперименте *возникновение раннего кризиса сопротивления* капель [3, 4].

Предложенные в работах [5, 2, 1] модели гидродинамики и межфазного массообмена в двухфазном потоке с учетом раннего кризиса сопротивления капель, сопровождаемого кризисом их тепломассообмена с газовым потоком, позволяют выполнить расчеты факела распыла форсунки, результаты которых согласуются с опытными данными.

Способ учета раннего кризиса сопротивления в этих моделях имеет некоторый недостаток: коэффициент сопротивления C_d, определенный из экспериментальных данных, задается как функция $C_d\,(r,\, z)$ координат точек факела распыла. Устранение этого недостатка явилось *целью* данной работы.

В моделях двухфазного газокапельного потока гидродинамическую силу сопротивления отдельной капли при ее обтекании газом обычно вычисляют по формуле

$$F = C_d S \rho V^2/2, \tag{1}$$

где $V = |\boldsymbol{u} - \boldsymbol{w}|$ – скорость капли относительно газа, C_d – коэффициент ее гидродинамического сопротивления, $S = \pi d^2/4$ – площадь миделева сечения сферической капли диаметром d, ρ и μ – плотность и динамический коэффициент вязкости газа, соответственно.

Для случаев обтекания шара ламинарным потоком при малых числах Рейнольдса $\mathrm{Re} = Vd\rho/\mu \ll 1$ известна формула Стокса

$$C_d = 24/\mathrm{Re}, \tag{2}$$

а при обтекании шара в переходном диапазоне $2 < \mathrm{Re} < 700$ − формула Клячко

$$C_d = 24/\mathrm{Re} + 4/\mathrm{Re}^{1/3}, \tag{3}$$

которая в указанном диапазоне хорошо аппроксимирует экспериментальные данные, обобщенные кривой Рэлея [6,7].

На основе экспериментальных данных в работах [3,4] показано, что в сильнотурбулентном потоке при $\mathrm{Re} \approx 100$ величина C_d для капель может уменьшаться в 4−7 раз по сравнению с общеизвестными значениями, соответствующими формуле (3). Такой же *ранний кризис сопротивления* наблюдался на одиночном твердом шарике, обтекаемом газовой струей в конфузоре [8].

Экспериментальные данные для C_d капель в факеле распыла аппроксимировались двумя способами в виде функций: 1) $C_d(\mathrm{Re})$ - от числа Рейнольдса и 2) $C_d(r, z)$ - от координат точек в факеле распыла.

В частности, для капель, движущихся по оси факела, в качестве хорошего приближения при $40 < \mathrm{Re} < 110$ в работах [3,4] была предложена формула

$$C_d = 2000/\mathrm{Re}^2. \tag{4}$$

В работах [5,2,1] при проведении расчетов факела распыла использовались формулы

$$C_d\,(r,\, z) = C_d\,(0,\, z) \cdot (0.45 \cdot \exp(-6 \cdot r \,/\, r_m(z)) + 0.55), \tag{5}$$

$$C_d\,(0,\, z) = 0.45 \cdot (\mathrm{z}/0.1)^{-3/4}. \tag{6}$$

Формула (6) вполне удовлетворительно аппроксимировала C_d на оси факела распыла [5]. Второй множитель в правой части (5) учитывает, что на границе факела $r_m(z) = z \cdot \mathrm{tg}\alpha_m$ в виде поверхности конуса с углом $\alpha_m = 32.5^{\circ}$ при $\mathrm{z} > 0.1$ m скорость газа пренебрежимо мала по сравнению со скоростью капель ($w \ll u = u_z/\cos\alpha_m \simeq V$), а значения $C_d(r_m(z))$, примерно, вдвое (в 1.8 раза) меньше, чем $C_d(0,\, z)$ на оси факела.

Недостаток определения раннего кризиса капель сопротивления функцией $C_d(r, z)$ при расчете факела распыла в том, что при этом не учитывается влияние корпуса аппарата на поле скоростей газа и величину C_d. Заметим также, обычно при проведении расчетов изменение коэффициента сопротивления учитывается в виде функции C_d (Re) числа Рейнольдса.

Для устранения указанного недостатка необходимо было учесть следующие обстоятельства и соображения.

В эксперименте, описанном в работах [3,4], наиболее подробные данные для скоростей фаз были получены в точках на оси факела и в нескольких его радиальных сечениях. У капель измерялась только осевая компонента скорости u_z, у газа - модуль вектора $\boldsymbol{w}$ полной скорости и его угол $\alpha(r, z)$ с осью факела. Оказалось, что в точке измерения (r, z) направление вектора $\boldsymbol{w}$ приблизительно совпадало с направлением луча, идущего через нее из центра выходного отверстия форсунки, а, значит, и с направлением движения капель, увлекающих газ.

С учетом рис. 1 экспериментальные данные для точек на оси факела оказалось возможным аппроксимировать формулами

$$u = u_z = u_0 - \nu \cdot z, \tag{7}$$

$$w = w_m = b \cdot P/(z+Z_0). \tag{8}$$

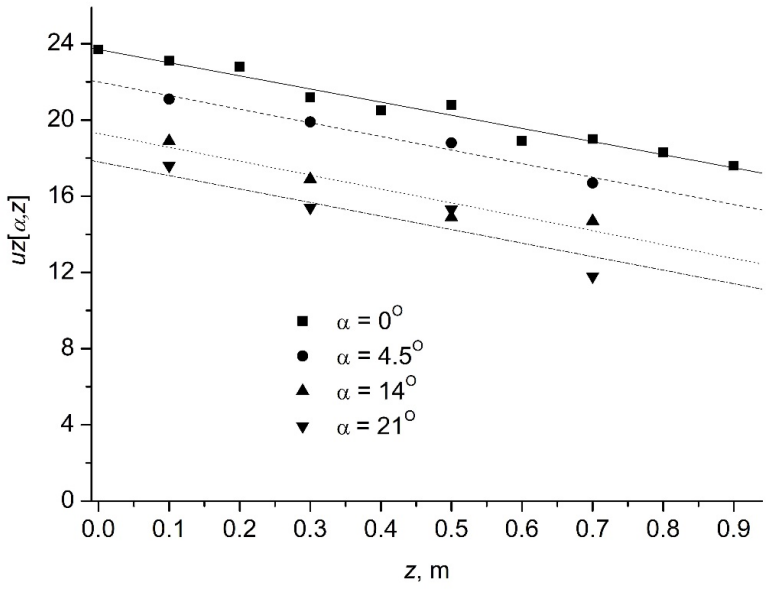


Рисунок 1 – Иллюстрация линейных зависимостей (7) и (7.1) по экспериментальным данным [3,4].

При давлении на форсунке $P = 5$ atm постоянные в формулах (7) и (8) имели значения: $u_0 = 24$ m/s, $\nu = 6.7$ s^{-1}, $b = 1.57$ m^2/(s·atm), $Z_0 = 0.39$ m [9].

Линейная зависимость (7), позволяет вычислить ускорение a капель по формуле

$$-a = a_z = du_z/dt = du_z/dz \cdot dz/dt = du_z/dz \cdot u_z = -\nu \cdot u_z \tag{9}$$

А затем, зная средний заутеровский диаметр $d = 0.14$ mm и массу m капли, ее скорость $V=u–w$ относительно газа, по второму закону Ньютона $F = ma$ и формуле (1) можно найти коэффициент сопротивления капли

$$C_d = 4\rho_d \rho d^3 a/(3\mu^2 \mathrm{Re}^2) = 13.5 \cdot a/\mathrm{Re}^2 \tag{10}$$

как функцию C_d (0, z) расстояния z от форсунки (ρ_d – плотность капли). В тех же точках на оси факела можно найти значение числа Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = Vd\rho/\mu = 9.3 \cdot (u–w). \tag{11}$$

Так была получена зависимость C_d (Re) и ее аппроксимация (4).

Заметим, что при недостаточно частом расположении экспериментальных точек в области измерений вычисление ускорения капель $a_z = du_z/dz \cdot u_z$ по формуле (9) с использованием приближения производной $du_z/dz \simeq \Delta u_z/\Delta z$ вносит большие ошибки в последующий расчет коэффициента сопротивления C_d. Применение аппроксимации (9) в виде $a_z = du_z/dz \cdot u_z = -\nu \cdot u_z$ позволяет избежать этого.

Чтобы перейти от аппроксимации величины C_d функцией (5) к ее представлению более универсальной зависимостью C_d(Re), были использованы те же идеи, особенности полей скоростей фаз и формулы, аналогичные (7) и (9), что и для точек на оси факела распыла. При этом учитывалось, что в поперечных сечениях факела (z_j = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 m) точки измерения были расположены приблизительно вдоль лучей, исходящих из центра выходного отверстия форсунки и составляющих с осью факела углы α_i = 0, 4.5, 9, 14, 17, 21, 25, 28, 32 deg, i = 0−8.

Формулы, аналогичные (7) и (9), с учетом рис. 1 и соотношений $u(\alpha_i, z) = u_z(\alpha_i, z)/\cos\alpha_i$, $dl = dz/\cos\alpha_i$ принимают вид

$$u_z(\alpha_i, z) = u_0(\alpha_i) - \nu(\alpha_i) \cdot z, \tag{7.1}$$

$$a = -u \cdot du/dl = -u \cdot du_z/dz = \nu(\alpha_i) \cdot u. \tag{9.1}$$

В дополнение к ним использовались формулы (10) и (11).

Так были получены зависимости Re(α_i, z_j), $C_d(\alpha_i, z_j)$ и обобщающая их на рис. 2 зависимость C_d(Re). Очевидно, полученные в разных частях факела экспериментальные точки легли вблизи одной общей кривой, определяемой формулой (4). Значит, ранний кризис сопротивления капель возникает во всем объеме факела при z> 0.1 m. По сравнению с зависимостью Клячко (3) при Re> 100 величина C_d уменьшается в 5-10 раз.

Таким образом, показано, что аппроксимация (4) коэффициента C_d сопротивления капель, справедлива не только для осевых точек факела распыла, но и для других его частей.

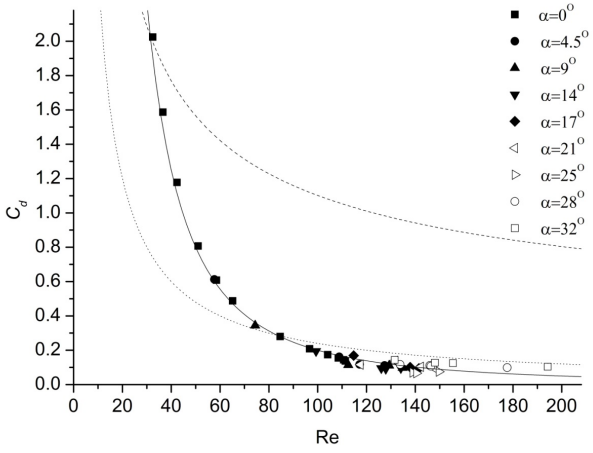


Рисунок 2 – Зависимости C_d(Re): символы – обобщение экспериментальных данных для капель воды в факеле распыла форсунки, сплошная кривая – аппроксимация этих данных по формуле (4), штриховая линия – по формуле (3) Клячко, пунктирная – по формуле (2) Стокса.

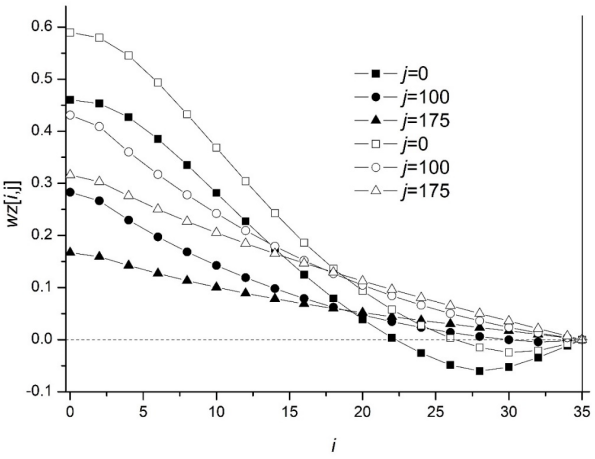


Рисунок 3 – Радиальные профили аксиальной скорости газа в аппарате на расстояниях z = (100+4·j) mm от форсунки, светлые символы – расчет C_d по формулам (5)-(6), темные символы – по формуле (4). Радиус аппарата R_a = 140 mm, высота H = 800 mm, перепад давлений ΔP = 14 Pa.

Расчет факела распыла в аппарате дал для двух аппроксимаций отличающиеся результаты (рис. 3), что объясняется влиянием на течение газа стенки корпуса аппарата. В этом случае предпочтительнее использовать аппроксимацию C_d(Re), т.к. значения $C_d(r, z)$ получены по экспериментальным данным для полей скоростей газа и капель в свободном факеле распыла, а значения C_d(Re) вычисляются при расчете двухфазного потока с учетом поля

скоростей газа, измененного влиянием корпуса аппарата, в частности, ограничением пространства движения газа и его трением о внутреннюю поверхность стенки корпуса.

Расчет свободного факела распыла с использованием предложенной аппроксимации C_d(Re) показал, что его результаты для скоростей обеих фаз согласуются и с экспериментом, и с результатами, полученными при аппроксимации $C_d(r, z)$.

Заключение. В целом представленные результаты позволяют рекомендовать аппроксимацию (4) для расчетов как свободного факела распыла, так и двухфазного потока в распылительном аппарате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Simakov N.N.* Liquid Spray from Nozzles. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 204 p.

2. *Симаков Н.Н.* Расчет межфазного массообмена в факеле распыла форсунки с учетом кризиса // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 4. С. 560.

3. *Симаков Н.Н.* Кризис сопротивления капель при переходных числах Рейнольдса в турбулентном двухфазном потоке факела распыла механической форсунки // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 2. С. 46.

4. *Simakov N.N., Simakov A.N.* Anomaly of gas drag force on liquid droplets in a turbulent two-phase flow produced by a mechanical jet sprayer at intermediate Reynolds numbers // J. Appl. Phys. 2005. Vol. **97**. P. 114901.

5. *Симаков Н.Н.* Численное моделирование двухфазного потока, созданного распыливанием жидкости форсункой // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 7. С. 990.

6. Torobin L.B., Gauvin W.H. Fundamental aspects of solid-gas flow, Part 1 // Can. J. Chem. Eng. 1959. V. 37. N 4. P. 129.

7. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. Пер. с немецкого. М.: Наука, 1974. 712 с.

8. *Симаков Н.Н.* Экспериментальное подтверждение раннего кризиса сопротивления на одиночном шаре // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 7. С. 1-7.

9. *Симаков Н.Н.* Гидродинамика двухфазного потока как основа моделирования и расчета межфазного тепло- и массообмена в процессах с распыливанием жидкости. Дис. … докт. физ.-мат. наук. Ярославль.: ЯГТУ, 2003. 354 с.

УДК 66.01.011 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-199-203

НЕОБРАТИМЫЕ ПОТЕРИ В ПРОЦЕССАХ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ ПОТОКОВ
IRREVERSIBLE LOSSES IN THE PROCESSES OF HEAT EXCHANGE AT DIFFERENT FLOW HYDRODYNAMICS

Цирлин Анатолий Михайлович*, Балунов Александр Иванович**
Anatoly M. Tsirlin*, Alexander I. Balunov**

**Институт программных систем РАН имени А.К. Айламазяна,*
Россия, Переславль-Залесский
**Program Systems Institute of RAS, Russia, Pereslavl-Zalesskiy*
(e-mail: tsirlin@sarc.botik.ru)
***Ярославский государственный технический университет, Россия, Ярославль*
***Yaroslavl State Technical University, Russia, Yaroslavl*
(e-mail: balunovai@ystu.ru)

Аннотация: На основе уравнений термодинамического баланса рассмотрено влияние гидродинамики потоков на производство энтропии и коэффициент теплопередачи в процессах необратимого теплопереноса в двухпоточных теплообменниках. Проведено сравнение с теплообменником, имеющим минимально-возможную необратимость при заданной тепловой нагрузке и коэффициенте теплопередачи.

Abstract: The influence of flow hydrodynamics on the production of entropy in the processes of irreversible heat transfer in two-flow heat exchangers is considered. A comparison is made with a heat exchanger having the lowest possible irreversibility at a given heat load and heat transfer coefficient.

Ключевые слова: теплообмен, тепловая нагрузка, производство энтропии, смешение, вытеснение, прямоток, противоток.

Keywords: heat transfer, heat load, entropy production, mixing, displacement, co-current, counter-current, phase change.

Задачи проектирования теплообменных систем предполагают распределение поверхностей контакта и выбор последовательности контактов потоков при ограничении на общую поверхность теплообмена и при заданной суммарной тепловой нагрузке (см. [1–3]).

Процесс теплообмена при ограниченных коэффициентах теплопередачи (размерах аппарата) и заданной тепловой нагрузке необратим. В работах [4–8] показано, что степень необратимости, характеризующаяся потерями эксергии или, что эквивалентно, диссипацией энергии (производством энтропии), служит естественным критерием совершенства такого процесса.

Производство энтропии в системе теплообмена увеличивается с ростом тепловой нагрузки (потока теплоты между горячим и холодным потоками) и уменьшается с ростом коэффициента теплопереноса. Минимизация производства энтропии в теплообменной системе при фиксированном значении ее суммарного коэффициента теплопередачи соответствует такой структуре системы и такому распределению поверхностей теплообмена, при котором тепловая нагрузка достигает максимума, а при заданной тепловой нагрузке система с минимальным производством энтропии обладает минимальным для этой нагрузки коэффициентом теплопередачи.

Любая многопоточная система составлена из двухпоточных теплообменных ячеек и производство энтропии в ней представляет собой сумму слагаемых, каждое из которых характеризует отдельную ячейку.

Ниже получена зависимость диссипации энергии от параметров потоков для двухпоточных теплообменников с различной гидродинамикой потоков. Полученные

соотношения позволяют оценить степень термодинамического совершенства теплообменников разного типа как отношение фактического производства энтропии к минимально-возможному.

Назовем поток, температура которого снижается, горячим, а поток, температура которого повышается – холодным, присвоив первому из них индекс „+“, а второму – „-“, температуру потока на входе в систему будем обозначать как T^{in}, а температуру на выходе как T^{out}, и та и другая измеряются в Кельвинах, теплоемкости потоков (произведения их расходов на удельные теплоемкости) обозначим через W_i ($i=+,-$). Конкретизируем рассмотрение для случая, когда интенсивность теплообмена задана линейным относительно температур (ньютоновским) законом теплопереноса.

Общее количество переданной теплоты задано, так что в режиме вытеснения

$$\int_0^L k\left[T_+(l)-T_-(l)\right]dl = W\left(T^{in}-T^{out}\right)=\bar{q}\,. \tag{1}$$

Коэффициент теплопередачи для теплообменника в целом обозначим через *K*, а коэффициент, отнесенный к единице длины трубы в режиме вытеснения, как *k*.

В [9] на базе общих соотношений, полученных в [10], показано, что минимальная необратимость достигается в двухпоточной теплообменной ячейке при приведенных выше условиях.

Не всегда гидродинамика ячейки близка к идеальному вытеснению с противотоком. В некоторых случаях технология процесса диктует необходимость перемешивания. Например, в процессах биосинтеза наличие мешалки гарантирует равномерность поля температур, концентраций питательных веществ и кислорода по объему аппарата. Кроме того, теплообменники со смешением на одной или обеих сторонах контакта могут оказаться дешевле, наконец, при изменении фазового состояния потока (конденсации или испарении) поле температур равномерно, как и при идеальном смешении. Поэтому ниже рассмотрено, как зависит производство энтропии от гидродинамики и характеристик потоков для двухпоточных теплообменных ячеек разного типа.

Рассмотрим следующие четыре типа гидродинамики потоков: смешение–смешение, смешение–вытеснение, вытеснение–вытеснение (прямоток) и вытеснение–вытеснение (противоток).

1. Идеальный двухпоточный теплообменник

Для двухпоточного теплообмена при заданных: тепловой нагрузке $\bar{q}$, законе теплообмена $q=k\left(T_+-T_-\right)$ и суммарном коэффициенте теплопередачи *K*, справедливы следующие утверждения [8].

Утверждение 1: Производство энтропии в системе с температурой греющего потока на входе в систему T_+^{in} и его теплоемкостью W_+ не может быть меньше, чем

$$\sigma^* = K\frac{(1-m)^2}{m} \tag{2}$$

Здесь

$$m = 1-\frac{W_+}{K}\ln\frac{T_+^{in}W_+}{T_+^{in}W_+-\bar{q}} \tag{3}$$

Учитывая, что $m=T_-^{in}/T_+^{out}$, можно выразить K для идеального теплообменника через входные температуры и теплоемкости потоков:

$$K^* = \frac{W_+T_+^{in}-\bar{q}}{T_-^{in}}\ln\frac{T_-^{in}W_-+\bar{q}}{T_-^{in}W_-}. \tag{4}$$

Утверждение2: Оценки (2)–(4) достижимы в противоточном трубчатом теплообменнике, если отношение абсолютных температур потоков на входе обратно отношению их теплоемкостей (условия термодинамической согласованности). При этом отношение температур в любом сечении теплообменника постоянно.

В идеальном теплообменнике условия термодинамической согласованности определяют температуру и теплоемкость нагреваемого потока, если температура и теплоемкость греющего потока и тепловая нагрузка известны, и наоборот.

2. Термодинамические балансы двухпоточного теплообменника

Запишем уравнения термодинамических балансов двухпоточной ячейки.

Энергетические балансы для каждого потока:

$$T_+^{out}(W_+) = T_+^{in} - \bar{q}/W_+ , \;\; T_-^{out}(W_-) = T_-^{in} - \bar{q}/W_- . \qquad (5)$$

Энтропийный баланс теплообменной ячейки:

- в режиме вытеснения прирост энтропии для горячего и для холодного потоков жидкости или газа, давление которых мало изменяется, (см. [1, 2]) для любой кинетики теплообмена, равен

$$\Delta S_{0\text{v}} = W_+ \ln\frac{T_+^{out}}{T_+^{in}}, \;\; \Delta S_{1\text{v}} = W_+ \ln\frac{T_-^{out}}{T_-^{in}}; \qquad (6)$$

- в режиме смешения обмен теплотой происходит при постоянных температурах, равных температурам потоков на выходе, поэтому приросты их энтропии равны

$$\Delta S_{0s} = -\bar{q}/T_+^{out}, \;\; \Delta S_{1s} = \bar{q}/T_-^{out} . \qquad (7)$$

Условие термодинамического баланса определяет производство энтропии в теплообменнике как сумму приростов энтропии потоков

$$\sigma = \Delta S_0 + \Delta S_1 . \qquad (8)$$

Прирост энтропии горячего потока отрицателен, а холодного положителен, причем их сумма больше нуля.

Уравнения термодинамических балансов справедливы для любой формы кинетики теплообмена. Фиксация величины тепловой нагрузки при заданном значении коэффициента теплопередачи K связывает между собой отдельные переменные W_+, W_-, T_+^{in}, T_-^{in}, входящие в (8). Так что только три из них являются свободными. Именно эта связь зависит от формы кинетической функции $q(T_+, T_-)$. Если входные температуры контактирующих потоков заданы, то для заданной тепловой нагрузки и гидродинамического режима может быть найден коэффициент теплопереноса. Причем минимуму коэффициента K соответствует такая организация процесса, для которой производство энтропии минимально.

В таблице приведены выражения, связывающие производство энтропии с тепловой нагрузкой, параметрами потоков и коэффициентом теплообмена для перечисленных выше режимов организации теплообмена.

В том случае, когда один или оба контактирующих потока меняют свое фазовое состояние, полученные формулы справедливы, если в них найти предел при стремлении теплоемкости конденсирующегося или испаряющегося потока к бесконечности, а его температуру принять постоянной и равной температуре кипения.

Приведенные в таблице 1 значения σ позволяют охарактеризовать термодинамичечкое совершенство теплообменника отношением $\eta = \sigma^*/\sigma$ при одинаковых значениях K, $\bar{q}$, T_+ и W_+, где σ^* соответствует выражению (2).

Таблица 1 – Производство энтропии σ и коэффициент теплопередачи K для заданной тепловой нагрузки двухпоточных теплообменников в зависимости от гидродинамики потоков

Гидродинамика потоков	σ	K	Обозначения
Смешение–смешение	$\frac{\bar{q}}{T_+^{in}-\bar{q}/W_+-\bar{q}/K}-\frac{\bar{q}}{T_+^{in}-\bar{q}/W_+}$	$\frac{\bar{q}}{T_+^{in}-T_-^{out}-\bar{q}/\overline{W}}$	$\overline{W}=\frac{W_+W_-}{W_++W_-}$ $z=1-\exp(-K/\overline{W})$ $z_-=1-\exp(-K/W_-)$ $z_+=1-\exp(-K/W_+)$ $A=\frac{W_--W_+}{W_-W_+}$
Вытеснение–вытеснение (прямоток)	$W_+\ln\left(1-\frac{\bar{q}}{W_+T_+^{in}}\right)+$ $+W_-\ln\left(T_+^{in}-\frac{\bar{q}}{W_+z}+\frac{\bar{q}(z-1)}{W_-z}\right)+$ $+W_-\ln\left(T_+^{in}-\frac{\bar{q}}{\overline{W}z}\right)$	$\overline{W}\ln\left(\frac{T_+^{in}-T_-^{in}}{T_+^{in}-T_-^{in}-\bar{q}/\overline{W}}\right)$	
Смешение (холодный)–вытеснение (горячий)	$W_+\ln\frac{T_+^{in}-\bar{q}/W_+}{T_+^{in}}-\frac{\bar{q}W_+z_+}{T_+^{in}W_+z_+-\bar{q}}$	$W_+\ln\frac{T_+^{in}-T_-^{in}-\bar{q}/W_-}{T_+^{in}-T_-^{in}-\bar{q}/\overline{W}}$	
Смешение (горячий)–вытеснение (холодный)	$W_-\ln\frac{T_-^{in}-\bar{q}/W_-}{T_-^{in}}-\frac{\bar{q}W_-z_-}{T_-^{in}W_-z_--\bar{q}}$	$W_-\ln\frac{T_+^{in}-T_-^{in}-\bar{q}/W_+}{T_+^{in}-T_-^{in}-\bar{q}/\overline{W}}$	
Вытеснение–вытеснение (противоток)	$W_+\ln\frac{T_+^{out}}{T_+^{in}}+W_-\ln\left(\frac{T_-^{in}+\bar{q}/W_-}{T_-^{in}}\right)$	$\frac{1}{A}\ln\frac{T_+^{in}-T_-^{out}}{T_+^{out}-T_-^{in}}$	

Замечание: Для одинаковых теплоемкостей потоков, когда $W=W_+=W_-$, с учетом зависимости температур потоков на выходе от температур на входе и теплоемкости, разность температур потоков в каждой точке контакта одинакова и равна $T_+^{in}-T_-^{out}$, а значит в последней строке таблицы $K=\bar{q}/(T_+^{in}-T_-^{out})=\bar{q}/(T_+^{in}-T_-^{in}-\bar{q}/W)$.

Заключение

В работе с использованием уравнений термодинамических балансов рассчитано производство энтропии для двухпоточных теплообменников с различной гидродинамикой потоков. Получены формулы, связывающие коэффициенты теплопередачи с тепловой нагрузкой и параметрами потоков. Сравнение полученных показателей необратимости и коэффициентов теплопередачи с минимально-возможной необратимостью σ^* и соответствующем ей коэффициентом теплопередачи K^* [см. (2), (4)] определяет степень термодинамического совершенства для теплообменников с тем или иным типом гидродинамики.

Обозначения

K – суммарный коэффициент теплопередачи, Вт/К; W – теплоемкость потока, Вт/К; q – поток теплоты, Вт; ΔS – прирост энтропии, Вт/К; T – температура, К; L – длина аппарата, м; σ – производство энтропии, Вт/К. Индексы: *in* – вход; *out* – выход; + – горячий поток; - – холодный поток, * – оптимальное значение параметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теплообменникам: в 2-х т. / Пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.

2. *Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перов В.Л.* Математические основы автоматизированного проектирования химических производств. М.: Химия, 1979. 318 с.

3. *Плановский А.Н., Николаев П.И.* Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: Химия. 1987. 496 с.

4. *Миронова В.А, Амелькин С.А., Цирлин А.М.* Математические методы термодинамики при конечном времени. М.: Химия, 2000. 379 с.

5. *Цирлин А.М.* Методы оптимизации в необратимой термодинамике и микроэкономике. М.: Физматлит, 2003. 416 с.

6. *Цирлин А.М., Ахременков А.А., Григоревский И.Н.* Минимальная необратимость, оптимальное распределение поверхности и тепловой нагрузки теплообменных систем // Теорет. основы хим. технологии. 2008. Т. 42. № 2. С. 214–221.

Tsirlin A.M., Akhremenkov A.A., Grigorevskii I.N. Minimal irreversibility and optimal distributions of heat transfer surface area and heat load in heat transfer systems // Theor. Found. Chem. Eng. 2008. Т. 42. № 2. С. 203–210.

7. *Цирлин А.М.* Оптимальное управление процессами необратимого тепло- и массопереноса. Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1991. № 2. С. 81–86.

8. *Bosnjakovic F.* Technical Thermodynamics. Holt R&W: New York, 1965.

9. *Tsirlin A.M., Mironova V.A., Amelkin S.A., Kazakov V.A*. Finite-time thermodynamics. Conditions of minimal dissipation for thermodynamics process with given rate // Physical Review E. 1998. V. 58. N 1. P. 215–223.

10. *Цирлин А.М.* Идеальная теплообменная система // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 5. С. 1089–1097.

Tsirlin A.M. Ideal heat exchange Systems // J. Eng. Phys. Thermophys. 2017. V. 90. N 5. P. 1035–1042.

УДК 66.081.2.069.82: 532.529.5: 66.069.82: 66.074.51 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-204-210

МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДСТВАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ (CFD) ПЕННОГО РЕЖИМА НА ПРОТИВОТОЧНОЙ ТАРЕЛКЕ
CFD SIMULATION HYDRAULIC OF COUNTER-FLOW SIEVE TRAY (WITHOUT OVERFLOW WEIR)

Равичев Леонид Владимирович, Трушин Александр Михайлович, Яшин Виктор Евгеньевич
Leonid V. Ravichev, Alexander M. Trushin, Victor E. Yashin

Российский химико-технологический университет – РХТУ имени Д. И. Менделеева, Россия, Москва
Mendeleev University of Chemical Technology, Russia, Moscow
(e-mail: ravichevlv@muctr.ru)

Аннотация: Одним из основных методов исследования пенных аппаратов стала вычислительная гидродинамика CFD, однако наиболее распространённые модели, взаимопроникающих фаз, турбулентности RANS, основаны на эмпирических уравнениях для перекрестноточных тарелок с круглыми отверстиями. Нашей целью было CFD-моделирования пенного слоя на противоточной тарелке, в программе OpenFOAM, двухфазной моделью VOF, модель турбулентности kOmegaSSTDES. Модель может использоваться для моделирования пенного режима малой интенсивности, например для водо-воздушной смеси скорость газа в свободном сечении аппарата не более 0,5 м/с.

Abstract: Computational fluid dynamics has become one of the main methods for research anddesign ofsieve trays, however, the most common models, Euler-Euler phases, turbulence RANS, are based on empirical correlations for cross-flow trays with round holes. Our goal was CFD modeling of sieve tray witha countercurrent flows in the OpenFOAM program, a multiphase VOF model, and a kOmegaSSTDES turbulence model. The model can be used to simulate a low-intensity mixture mode of sieve tray, for example, for a water-air system, the superfical gas velocityis no more than 0.5 m/s.

Ключевые слова: пенный режим, пенный аппарат, CFD.
Keywords: sieve trays, mixture mode, CFD.

В химической технологии широко распространены процессы взаимодействия газа и жидкости движущихся в разных направлениях на перфорированных преградах, которые называть пенным режимом [1, 2], а оборудования в который он реализуется пенными аппаратами. В процессах дистилляции и абсорбции, как правило, распространены перекрестноточные тарелки [3, 4], где жидкость движется в основном вдоль поверхности тарелки и покидает её через переливной порог, а явления провала жидкости в отверстия, как и унос жидкости с газом, являются нежелательными эффектами снижающими эффективность процесса. Рассматриваются в целом направление «дистилляция и абсорбция», внутри которого область проблем ситчатых лотков (перфорированных тарелок колонным аппаратов).

Противоточные (провальные) тарелки, в которых отсутствуют специальные элементы для подачи и отвода жидкости, применяются когда необходимо организовать промывку отверстий тарелки жидкостью, например при улавливании склонных к налипанию пылей, либо по соображениям простоты конструкции аппарата, когда реализация сложных внутренних устройств затруднена, например в условиях высокой температуры и коррозии, где тарелка выполняется из керамики.

Вычислительная гидродинамика, CFD, стала одним из основных методов исследования пенного режима [5].

В работах [6, 7, 8], была предложена методика моделирования пенного слоя CFD, на основе решения системы уравнений Навье-Стокса осреднённых по Рейнольдсу (RANS)

методом конечных объемов, в дальнейшем получившая распространение во многих работах [9, 10, 11]. Корреляция экспериментальных данных по высоте пенного слоя на перекрестноточной (с переливом) ситчатой тарелке с круглыми отверстиями, известная как корреляция Бенета 1983г.:

$$\varepsilon_L^B = exp\left(-12{,}55\left(U_G\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L-\rho_G}}\right)^{0{,}91}\right), \qquad \varepsilon_G^B = 1-\varepsilon_L^B \tag{1}$$

где ε_L^B – объемная доля жидкости в пенном слое, ε_G^B – объемная доля газа в пенном слое U_G – скорость газа, приведённая к свободному сечению аппарата, м/с, ρ_G – плотность газа кг/м^3, ρ_G – плотность жидкости кг/м^3. Принимая скорость движения газового пузырька в пенном слое постоянной, из равенства силы Архимеда и силы сопротивления получаем:

$$C_D = \frac{4}{3}\frac{\rho_L-\rho_G}{\rho_G}\mathrm{g}\cdot d_G\frac{1}{{V_{slip}}^2}, \qquad V_{slip} = U_G/\varepsilon_L^B \tag{2}$$

где C_D – коэффициент лобового сопротивления пузырька, g – ускорение свободного падения, d_G – диаметр пузырька.

Уравнение обмена импульсами между фазами, для двухфазной модели взаимопроникающих сред Эйлера:

$$\overrightarrow{M_{L,D}} = \frac{3}{4}\rho_L\cdot\frac{\varepsilon_G^B}{d_G}\cdot C_D\cdot\left(\overrightarrow{U_G}-\overrightarrow{U_L}\right)\left|\overrightarrow{U_G}-\overrightarrow{U_L}\right| \tag{3}$$

Данный метод не может быть использован для предсказания высоты чистой жидкости на противоточных тарелках, т.к. основан на корреляции экспериментальных данных для ситчатой тарелки с круглыми отверстиями.

Представляют интерес методы моделирования, в которых уравнения межфазного взаимодействия не основаны на экспериментальных данных, связанных с конкретной конструкцией пенной тарелки, что позволило бы применять их в более широком диапазоне конструкций внутренних устройств пенных аппаратов.

В работе [12] проведено CFD моделирование перекрестноточной тарелки методом объемной доли жидкости, VOF с моделированием турбулентности методом больших вихрей (LES). Проведен анализ корректности использования модели по доле турбулентной кинетической энергии, моделируемой в надсеточном масштабе, показано, что при выборе размера элементов сетки в области пенного слоя 2x2x5 мм, не менее 80% турбулентной энергии моделируется в надсеточном масштабе.

Известно [13], что модели LES требуют значительного измельчения расчетной сетки, особенно в пограничном слое, которое может привести к недопустимому росту длительности вычислений. В то же время, для безотрывных пристеночных течений и потоков с небольшим отрывом имеются достаточно надёжные и экономичные модели на основе осреднения по Рейнольдсу (RANS), возникла идея создания гибридного подхода, в рамках которого модель RANS активируется в пристеночной области, а модель LES — вдали от неё. Гибридным подходом стал так называемый метод отсоединённых вихрей Detached Eddy Simulation (DES) [14].

Нашей целью была проверка возможности CFD-моделирования пенного слоя на противоточной тарелке, методами и средствам, доступными широкому кругу инженеров. Мы использовали свободно распространяемое программное обеспечение: для построения геометрии расчетной области и сетки конечных элементов программу Salome, для CFD моделирования программный комплекс OpenFOAM, решатель InterFoam, двухфазный поток несжимаемых сред, межфазная модель VOF, модель турбулентности kOmegaSSTDES. Для расчетов использовался компьютер на основе процессора AMD Ryzen 5 3600 6-Core Processor 3.59 GHz.

Для валидации расчетной модели была проведена серия экспериментов на установке пенного слоя. Схема установки представлена на рисунке 1, основные параметры установки и использованной противоточной тарелки в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики экспериментальной установки и пенной тарелки.

Параметр	Значение
Диаметр колоны, мм	400
Расстояние между тарелками, мм	750
Число тарелок, шт	2
Диаметр отверстия тарелки, мм	20
Число отверстий	37
Толщина тарелки, мм	3
Площадь свободного сечения тарелки, %	9,3

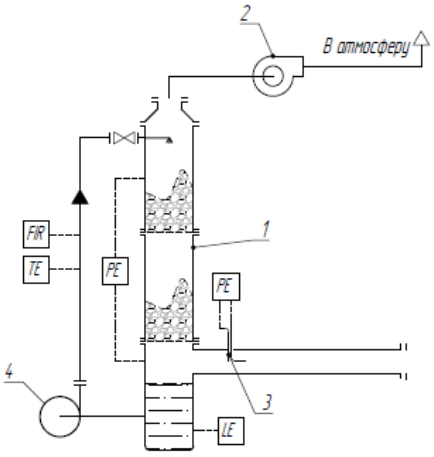


Рисунок 1 – Схема установки пенного слоя. 1 – колонна с прозрачной обечайкой, 2 – воздуходувка, 3 – трубка пито, 4 – насос, FIR – расходомер, TE – термометр, PE – дифференциальный манометр, LE – указатель уровня.

Был определён средний коэффициент сопротивления сухой тарелки, по результатам измерения перепада давления на тарелке в зависимости от скорости в свободном сечении аппарата. Газ – воздух, жидкость – вода, температура 16..18°C, влажность воздуха 50..60%.

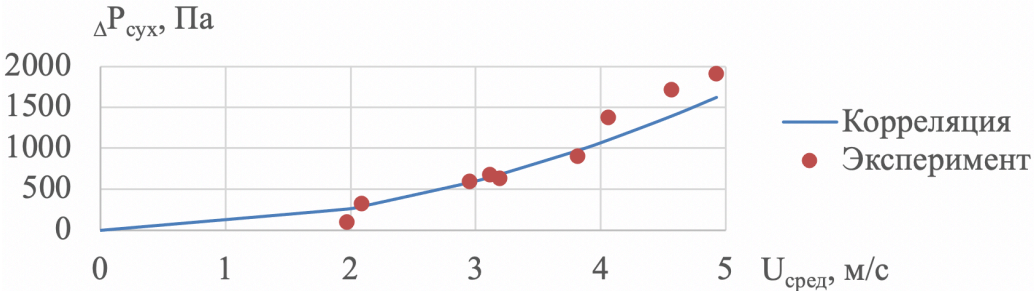


Рисунок 2 – Сопротивление сухой тарелки.

Корреляция сопротивления сухой тарелки:

$$\Delta P_{tray} = \xi \frac{\rho_G \cdot {U_A}^2}{2} \qquad (4)$$

где ξ = 110 – средний коэффициент гидравлического сопротивления тарелки, ρ_G = 1,21 кг/м^3, U_A – скорость газа приведённая к свободному сечению аппарата.

При работе данной тарелки с плотностью орошения 4,4 м^3/с/м^2 пенный слой не образовывался до скорости около 0,8м/с, далее, по мере роста скорости газа на тарелке начинала образовываться пена. В диапазоне скоростей от 1,5 до 2...2,5 м/с наблюдались значительные колебания пенного слоя на тарелке, причём содержание жидкости на тарелке оставалось близким к постоянному. При скоростях выше 2..2,5 м/с наблюдался резкий рост удерживаемой жидкости на тарелке вплоть до захлёбывания аппарата.

Высота чистой жидкости на тарелке определена по изменению уровня в кубе колоны, при прекращении подачи воздуха после достижения установившегося режима. Скорость воздуха определена по динамическому напору в подающем трубопроводе.

В данном режиме: плотность орошения 4,4 м^3/с/м^2, скорость газа в свободном сечении аппарата 1 м/с.



Рисунок 3 – Пенный слой на противоточной тарелке.

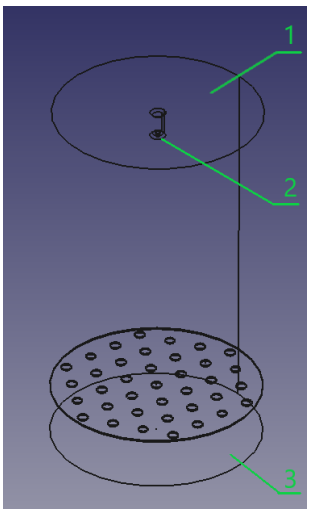


Рисунок 4 – Геометрия расчетной области,
1 – выход газа и жидкости с брызгоуносом,
2 – форсунка входа жидкости,
3 – вход газа и жидкости.

Сетка конечных элементов нерегулярная тетраэдрическая, размер элемента не более 8 мм, со сгущением до 3 мм на поверхностях тарелки, и до 1 мм на поверхностях форсунки. Призматические элементы на стенках, в три слоя общей толщиной 0,5 мм, с коэффициентом прибавления толщины 1,3. (Рисунок 5)

Моделирование CFD, было выполнено для общего перепада давления на тарелке 200, 400, 600, 800, 1200 Па. Расход воды подаваемой на тарелку составил 0,6 м^3/час. Для сокращения времени моделирования, в начальный момент времени, на тарелке находился объем жидкости 0,48 м^3, форсунка заполнена жидкость.

Средняя скорость в аппарате по результатам моделирования CFD определена как интеграл скорости по границе выхода газа, отнесённый к площади поверхности:

$$U_A = \frac{\sum_i UY_i \cdot A_i}{\sum_i A_i} \quad (5)$$

где UY_i – средний Y-компонент скорости в грани конечного элемента, м/с, A_i – площадь грани конечного элемента.

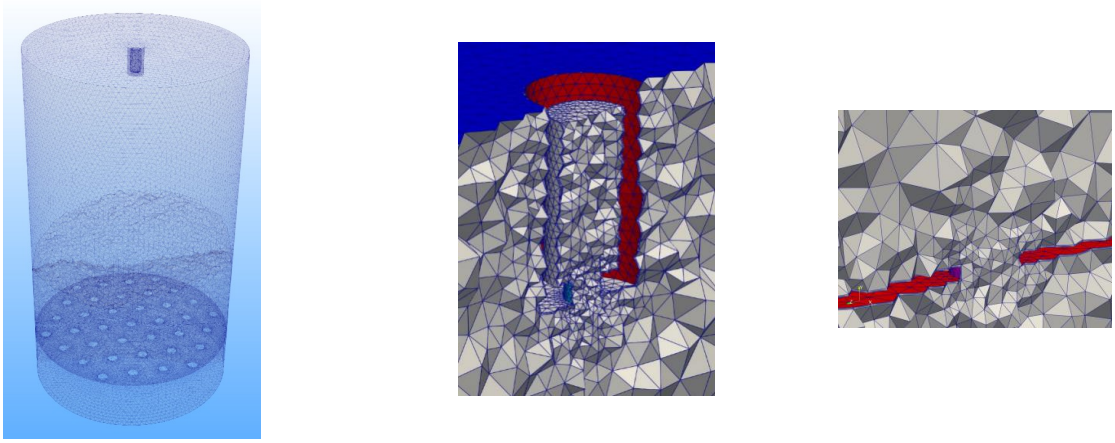
Высота чистой жидкости на тарелке, по результатам моделирования CFD определена как интеграл объемной доли жидкости по области над тарелкой, отнесённый к площади сечения аппарата

$$H_c = \frac{\sum_i \alpha_i \cdot V_i}{A} \quad (6)$$

В эксперименте измеряется общее сопротивление двух тарелок, сопротивление пенного слоя определялось по соотношению

$$_{\Delta}P_{sum} = \ _{\Delta}P_{tray} + \ _{\Delta}P_{mix} \quad (7)$$

где $_{\Delta}P_{sum}$ – общее сопротивление пенной тарелки, $_{\Delta}P_{tray}$ – сопротивление сухой тарелки (без жидкости) вычисляется по корреляции (1) для данной скорости газа, $_{\Delta}P_{mix}$ – сопротивление создаваемое слоем жидкости на тарелке.



а) б) в)

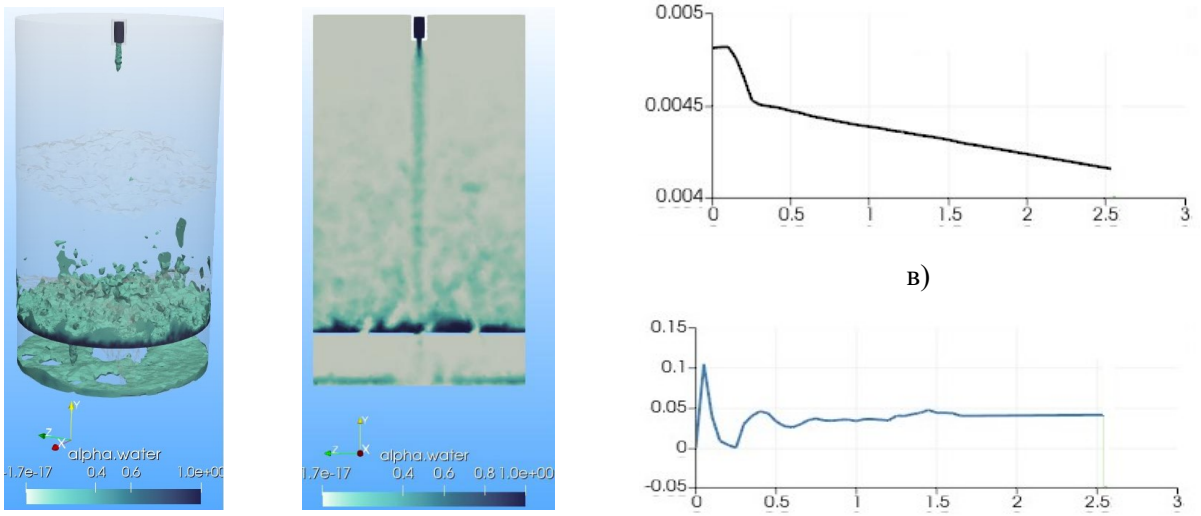
Рисунок 5 – Сетка конечных элементов, а – вся расчётная область, б – зона форсунки ввода жидкости, в – зона отверстия пенной тарелки.

Результаты моделирования приведены в таблице 2, $T_м$ – достигнутое время моделирования, когда расчет был остановлен.

Таблица 2 – Результаты компьютерного моделирования.

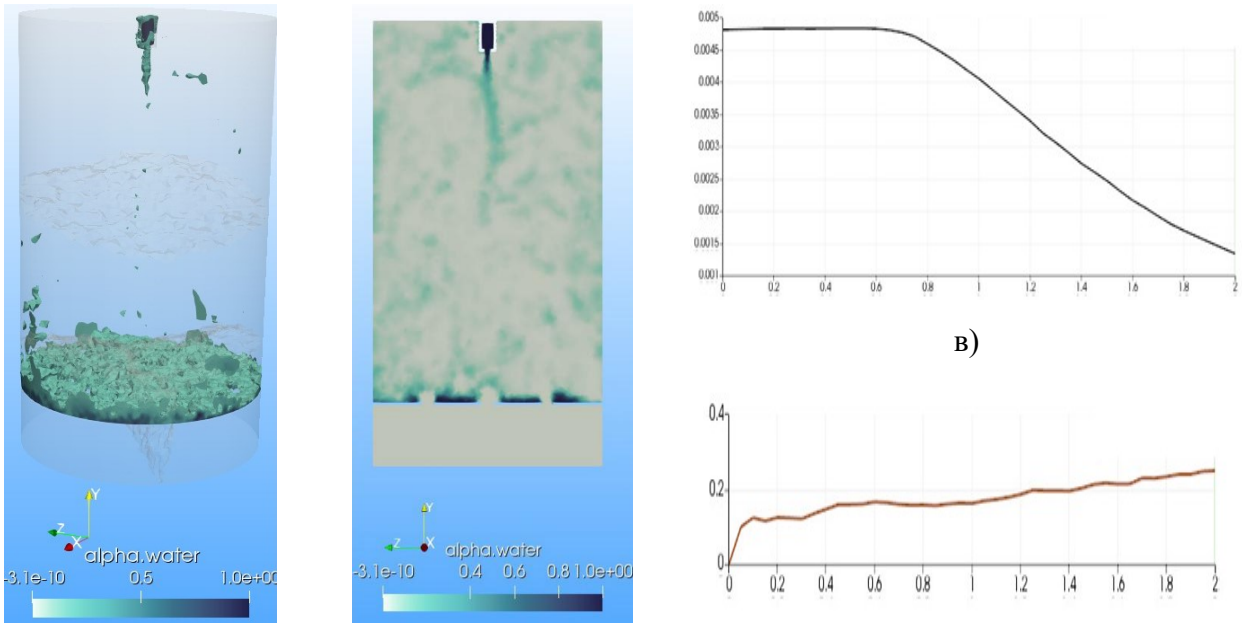
№	$_{\Delta}P_{sum}$, Па	$T_м$, с	U_A, м/с	H_c, см	$_{\Delta}P_{tray}$, Па	$_{\Delta}P_{mix}$, Па	Прим.
1	200	1	0,1616	1,700	1,439	198,6	Исключен
2	400	2,55	0,3268	3,306	5,883	394,1	
3	600	2	1,991	1,068	218,3	381,7	
4	800	1,3	1,526	2,435	128,3	671,7	Исключен
5	1200	0,8	3,0149	1,151	500,8	699,2	

В таблице 2, п. 1 – остановлено из-за заметного провала жидкости в отверстия тарелки, п. 2 – распределение жидкости наиболее близкое к пенному режиму, наблюдаемому в эксперименте, однако скорость газа ниже экспериментального значения для данной высоты жидкости на тарелке, п. 3 – соответствует захлёбыванию, нет движения жидкости под тарелку, п. 4 – остановлен из-за машинных проблем, п. 5 – быстро достигнут режим захлёбывания.



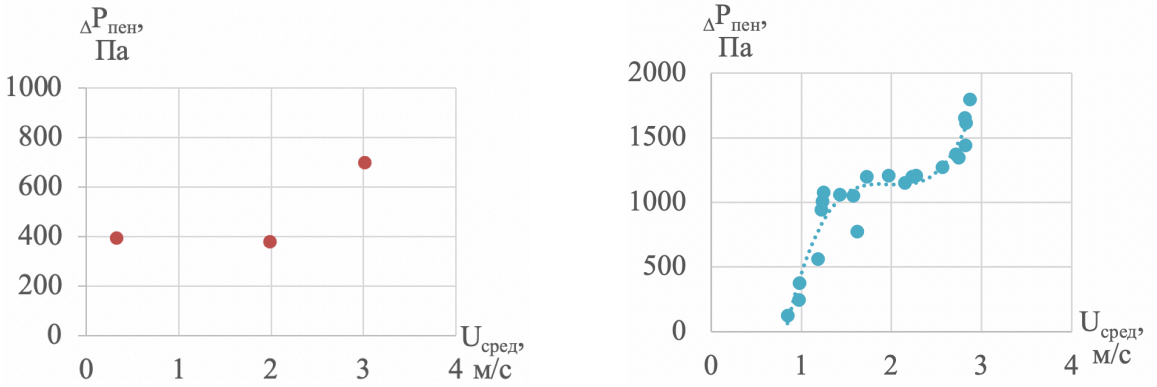
а) б) в) г)

Рисунок 6 – Результаты моделирования, $_{\Delta}P_{sum}$ = 400 Па: а) – область объемной доли жидкости выше 0,2; б) – объемная доля жидкости в плоскости YZ; в) – объем жидкости на тарелке, м^3, в зависимости от времени, сек; г) – объемный расход газа, м^3/с, в зависимости от времени, сек



а) б) в) г)

Рисунок 7 – Результаты моделирования $_{\Delta}P_{sum}$ = 600 Па: а) – область объемной доли жидкости выше 0,2; б) – объемная доля жидкости в плоскости *YZ*; в) – объем жидкости на тарелке, м^3, в зависимости от времени, сек; г) – объемный расход газа, м^3/с, в зависимости от времени, с.



а) б)

Рисунок 8 – Сопротивление пенного слоя на тарелке, а) – результаты моделирования CFD, б) – результаты эксперимента.

Выводы

Результаты численных и физических экспериментов демонстрируют схожее поведение пенной тарелки при росте скорости газа: диапазон отсутствия пены, диапазон устойчивой пены, диапазон роста высоты пены и захлёбывания. При этом условные границы диапазонов, по скорости газа, для численного моделирования казались ниже чем для физического эксперимента. Модель VOF-kOmegaSSTDES, с коэффициентами уравнений по умолчанию, может использоваться для моделирования пенного режима малой интенсивности, для водо-воздушной смеси скорость газа в свободном сечении аппарата не более 0,5 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарат Э.Я., Мухлёнов И.П., Туболкин А.Ф., Тумаркина Е.С. Пенный режим и пенные аппараты. // Л. : Химия, 1977.

2. В.М. Рамм. Абсорбция газов. Изд. 2-е, переработ. и доп. // М.: Химия, 1976.

3. Binay K. Dutta. Principles of mass transfer and seperation processes. PHI Learning Pvt. Ltd., 2007.

4. Andrzej Gorak, Zarko Olujic. Distillation: Equipment and Processes. Academic Press is an imprint of Elsevier. 2014.

5. Taylor R. Still modeling after all these years: a view of the state of the art. The international conference Distillation and Absorption. London, UK, 2006.

6. R. Krishna, J. M. Van Baten, J. Ellenberger, A. P. Higler, R. Taylor. CFD simulations of sieve tray hydrodynamics. Institution of Chemical Engineers. Trans IChemE, Vol 77, Part A, October 1999.

7. J. M. Van Baten, R. Krishna. Modelling sieve tray hydraulics using computational fluid dynamics. Chemical Engineering Journal 77 (2000) 143–151.

8. R. Krishna and J. M. Van Baten. Modelling sieve tray hydraulics using computational fluid dynamics. Institution of chemical engineers. Trans IChemE, Vol 81, Part A, January 2003.

9. Zhang Haonan, Zhang Cunquan, Zhang Meng, Song Peng-cheng. Simulation of heat-mass transportation characteristics for removal of CO in a liquid nitrogen wash sieve plate column. Cryogenics 106 (2020) 103022.

10. Galih Bangga, Felicia Januarlia Novita, Hao-Yeh Lee. Evolutional computational fluid dynamics analyses of reactive distillation columns for methyl acetate production process. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification 135 (2019) 42-52.

11. Siao-Han Huang, Jia-Lin Kang, David Shan-Hill Wong, Shi-Shang Jang, Chao-An Lin. Particle-Scavenging prediction in sieve plate scrubber via dimension reduction in computational fluid dynamics. Chemical Engineering Research and Design 160 (2020) 540–550.

12. Aldo Malvin, Andy Chan, Phei Li Lau. CFD study of distillation sieve tray flow regimes using the droplet size distribution technique. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 45 (2014) 1354–1368.

13. OpenFOAM. ЧАСТЬ 3. Авторы: Аветисян А.И., Крапошин М.В., Самоваров О.И., Стрижак С.В. Электронный ресурс //

hps-education/files/lectures/2011/avetisyan/avetisayn_2011_slides09.pdf.

14. M. Strelets. Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows. 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit January 8-11, 2001/Reno, NV.

СЕКЦИЯ 2. «ТЕХНОЛОГИЯ И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ БЕЗОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ, НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ, ТЕКСТИЛЬНОЙ, ЛЁГКОЙ, ПИЩЕВОЙ, ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ, МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ, МЕДИЦИНСКОЙ, ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ И ДРУГИХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И АПК»

УДК 621.928.9 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-211-215

ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПИЩЕВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДВСТВ НА ОСНОВЕ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ
EFFECTIVE VORTEX TECHNIQUES AND DEVICES FOR CLEANING INDUSTRIAL GAS FROM DUST AT FOOD AND CHEMICAL ENTERPRISES

Акулич Александр Васильевич, Лустенков Виктор Михайлович, Акулич Александр Александрович
Alexander V. Akulich, Viktor M. Lustenkov, Alexander A. Akulich

Могилевский государственный университет продовольствия, Беларусь, Могилев,
Mogilev State University of Food Technologies, Belarus, Mogilev
(e-mail: mail@mgup.by)

Аннотация: Дан краткий обзор систем пылеулавливания в теплотехнологических установках различных предприятиях. Разработаны новые высокоэффективные способы и аппараты для очистки газов от пыли на основе вихревых потоков, взаимодействующих прямоточно или противоточно. Проведен комплекс экспериментальных исследований гидродинамики лабораторных образцов для реализации высокоэффективных способов очистки газов от твердых частиц. Предложена двухступенчатая система сухой пылегазовой очистки, состоящей из циклона на первой ступени и вихревого противоточного или прямоточного пылеуловителя на второй ступени.

Abstract: The article overviews dust collecting systems of heat technology installations at various enterprises. There have been developed new techniques and highly effective devices for purifying gases from dust on the basis of straight and countercurrent vortex flows. Experimental studies on hydrodynamics of breadboard models have been conducted to carry out effective methods of gas purification from solid particles. A two-stage system for dry cleaning gas from dust consisting of a cyclone at the first stage and either vortex or straight-flow dust collector at the second stage is suggested.

Ключевые слова: Очистка газов, вихревые потоки, вихревой пылеуловитель, гидродинамика, системы пылеулавливания, гидравлическое сопротивление, эффективность улавливания.

Keywords: gas purification, vortex flows, vortex dust collector, hydrodynamics, dust collecting systems, hydraulic resistance, dust-catching efficiency.

В каждом производстве возникает необходимость совершенствования существующих и создания новых технологий и оборудования. Для пищевых и химических производств эффективность протекающих технологических процессов определяется не только их рентабельностью, но и экологической безопасностью. Поэтому создание эффективных способов и аппаратов для очистки промышленных пылегазовых выбросов является актуальной задачей на предприятиях пищевой и химической промышленности.

Проведен литературный обзор систем пылеулавливания в теплотехнологических установках, а также в системах аспирации и пневмотранспорта на различных предприятиях [1–6]. Установлено, что в ряде производств функционируют одноступенчатые системы

пылеочистки, оснащенные циклонами различных конструкций либо рукавными фильтрами. В теплотехнологических линиях, работающим в условиях высоких нагрузок широкое распространение получили двухступенчатые системы, включающие следующее пылеулавливающее оборудование: циклон-разгрузитель – циклон-пылеотделитель в зерноперерабатывающей промышленности; циклон и фильтр в хлебопекарной; циклон и мокрый центробежный аппарат в переработке хлопчатника; циклон и мокрый пылеуловитель, либо циклон с водяной пленкой, циклон-промыватель в производстве чая; циклон и рукавный фильтр в производстве пищеконцентратов; циклон и циклон-промыватель в производстве крахмала; осадительная камера и циклон, а так же циклон и рукавный фильтр в производстве табака.

Авторами разработаны новые высокоэффективные способы и аппараты для очистки газов от пыли на основе двух вихревых потоков, взаимодействующих прямоточно или противоточно [7–11], а также для очистки больших объемов запыленного газа способы и групповые вихревые противоточные и прямоточные пылеуловители [12–13].

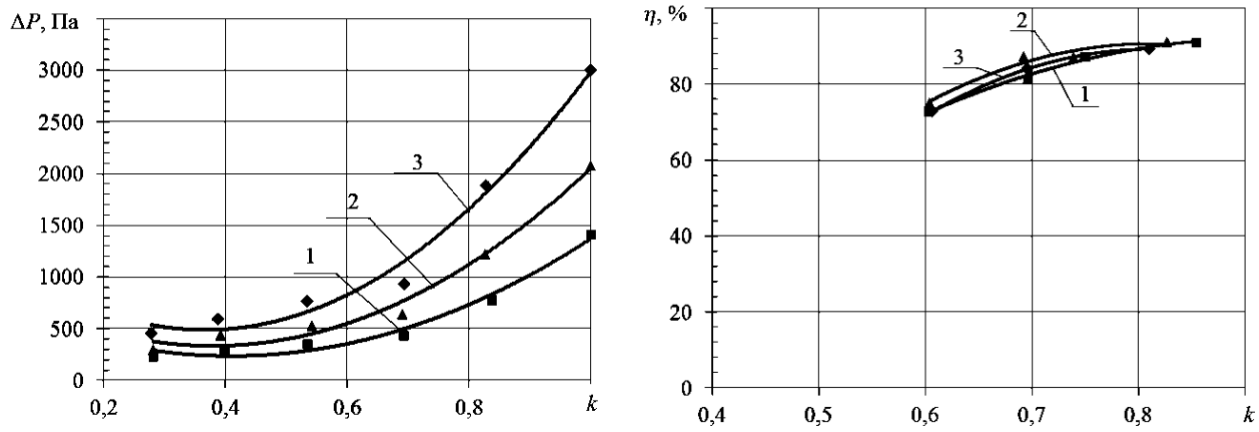
Для очистки пылегазовых выбросов промышленных предприятий содержащих мелкодисперсные частицы разработаны новые высокоэффективные комбинированные способы и аппараты, основанные на улавливании твердых частиц в центробежном поле при взаимодействии двух запыленных потоков закрученных в одном направлении и движущихся навстречу друг другу с последующей доочисткой в режиме фильтрования через ткань [14–19] или зернистый слой материала [20].

В [21] разработан новый высокоэффективный способ очистки газа от твердых частиц, реализуемый в групповом прямоточном вихревом пылеуловителе, обеспечивающий повышение эффективности процесса очистки газа от твердых частиц за счет снижения гидравлического сопротивления. Это достигается посредствам того, что процесс очистки газа от твердых частиц происходит при взаимодействии в каждой цилиндрической обечайке периферийного и центрального потоков газовзвеси, закрученных в одном направлении и движущихся нисходяще, т.е. сверху вниз. При этом очищенный газ отводят в нижней части корпуса по оси каждой цилиндрической обечайки в плоскости соединения с бункером. При таком характере взаимодействия периферийного и центрального потоков газовзвеси не происходит изменение направления их движения, т.е. деформация потоков, что не требует дополнительных затрат энергии и приводит к снижению гидравлического сопротивления.

Для обеспечения благоприятного гидродинамического режима взаимодействии в каждой цилиндрической обечайке периферийного и центрального потоков газовзвеси предусмотрена возможность изменения места ввода центрального потока по высоте корпуса.

Проведен комплекс экспериментальных исследований гидродинамики разработанного аппарата. Установлено, что гидравлическое сопротивление группового прямоточного пылеуловителя с вихревыми потоками возрастает с увеличением как объемного расхода газа Q, так и кратности расходов выше k=0,5. Для k=0,6 при Q=0,111 м^3/с гидравлическое сопротивление составляет ΔP=300 Па, при Q=0,138 м^3/с ΔP=580 Па, при Q=0,166 м^3/с ΔP=800 Па (рисунок 1а).

Получены зависимости эффективности улавливания соляной пыли в групповом прямоточном пылеуловителе с вихревыми потоками от кратности расходов газа k при диаметрах центральных завихрителей d=0,042 м. Установлено, что эффективность улавливания соляной пыли в групповом прямоточном вихревом пылеуловителе при кратности расходов k=0,75 и общем объемном расходе газа Q=0,111 м^3/с составляет η=86 %, при Q=0,138 м^3/с η=90 %, а при Q=0,166 м^3/с наблюдается незначительное снижение до η=88 % (рисунок 1б).



а) б)

Рисунок 1 – Зависимости гидравлического сопротивления (ΔP) и эффективности улавливания (η) соляной пыли в групповом прямоточном пылеуловителе от кратности расходов (k) при диаметрах центральных завихрителей а) – d=0,062 м; б) – d=0,042 м и различных общих объемных расходах газа Q
1 – Q=0,111 м^3/с; 2 – Q=0,138 м^3/с; 3 – Q=0,166 м^3/с

Разработан способ очистки газа от твердых частиц [22], обеспечивающий повышение эффективности процесса очистки газов при снижении гидравлического сопротивления. Это достигается посредством того, что газ, очищенный в сепарационной камере вихревого пылеулавливания, отводится в режиме центрального восходящего потока на последующую доочистку, осуществляемую в режиме вращательно-поступательного восходящего движения двух сплошных внутреннего и внешнего кольцевых потоков по внутренней и внешней боковым поверхностям кольцевого канала, образованного боковыми поверхностями фильтровальных элементов одинаковой высоты, соединенных между собой в нижней части торообразной поверхностью дополнительного фильтровального элемента по принципу внешней фильтрации внутрь кольцевого канала.

Изготовлен и исследован экспериментальный образец комбинированного пылеуловителя, в котором реализуется разработанный способ [22]. Впервые получена зависимость для расчета эффективности улавливания комбинированного аппарата для очистки пылегазовых потоков на основе взаимодействующих вихревых потоков и фильтрования от режимных и конструктивных параметров

$$\eta = 99{,}88 + 0{,}23 \cdot \frac{h}{H} - 0{,}14 \cdot \left(\frac{h}{H}\right)^2 - 0{,}054 \cdot k^2 + 0{,}065 \cdot k \qquad (1)$$

где h – высота фильтровального элемента, м; H – высота сепарационной камеры, м; $\frac{h}{H}$ – относительная высота фильтровального элемента; k – кратность расходов, определяемая как отношение объемного расхода газа, подаваемого через периферийный входной патрубок к общему объемному расходу газа через аппарат.

На основе комплексного анализа результатов установлено, что высокая эффективность улавливания соляной пыли η=99,99% и небольшое гидравлическое сопротивление ΔP=1660÷1870 Па комбинированного пылеуловителя обеспечиваются в интервалах кратности расходов k=0,6÷0,7 и относительной высоты фильтровального элемента h/H=0,71÷1.

Выводы

Разработанные высокоэффективные способы и аппараты на основе вихревых потоков могут быть использованы как в одноступенчатых, так и в двухступенчатых системах пылеулавливания. В зависимости от свойств улавливаемой пыли и энергетических затрат на

пылеочистку в одноступенчатых системах возможно использование вихревых противоточных или прямоточных пылеуловителей, а также комбинированных аппаратов.

Для очистки пылегазовых потоков с большой концентрацией мелкодисперсных твердых частиц в теплотехнологических установках применяются двухступенчатые системы. Авторами предложена двухступенчатая система сухой пылегазовой очистки, состоящей из циклона на первой ступени и вихревого противоточного или прямоточного пылеуловителя на второй ступени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности [Текст] : учебное пособие для вузов / Е.А. Штокман [и др.]; под ред. Е.А. Штокмана. – М. : Ассоциация строительных вузов, 2007. – 688 с.

2. Штокман Е.А. Очистка воздуха от пыли на предприятиях пищевой промышленности / Е.А. Штокман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1989. – 312 с.

3. Веселов, С. А. Вентиляционные и аспирационные установки предприятий хлебопродуктов [Текст]: учебное пособие для вузов / С.А. Веселов, В.Ф. Веденьев. – М. : КолосС, 2004. – 240 с.

4. Веселов, С.А. Проектирование вентиляционных установок предприятий по хранению и переработке зерна: учебное пособие для вузов / С.А. Веселов. – М.: Колос, 1974. – 288 с.

5. Володин, Н.П. Справочник по аспирационным и пневмотранспортным установкам / Н.П. Володин, М.Г. Касторных, А.И. Кривошеин. – М.: Колос, 1984. – 288 с.

6. Справочник по пыле- и золоулавливанию. Под общей ред. А.А.Русанова. – М.: Энергия, 1975.– 296с.

7. Вихревой пылеуловитель: пат. 2112 Респ. Беларусь, МПК6 В 04 С 3/06 / А.В. Акулич, А.А. Полевич, П.В. Акулич, А.Г. Егоров; заявитель Могил. технол. ин-т. – № 950020; заявл. 09.01.95; опубл. 30.06.98 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1998 – № 2. – С. 107.

8. Вихревой пылеуловитель: пат. 2161 Респ. Беларусь, МПК6 В 04 С 3/06 / А.В. Акулич, А.Г. Егоров; заявитель Могил.технол. ин-т. – № 950822; заявл. 14.08.95; опубл. 30.06.98 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтелектуал. уласнасці. – 1998. – № 2. – С. 107-108.

9. Вихревой пылеуловитель: пат. 2456 Респ. Беларусь, МПК6 В 04 С 3/06 / А.В. Акулич, А.Г. Егоров; заявитель Могил.технол. ин-т. – № 960496; заявл. 08.10.96; опубл. 30.12.98 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтелектуал. уласнасці. – 1998. – № 4. – С. 115.

10. Устройство для выделения частиц из газового потока: пат. 3475 Респ. Беларусь, МПК6 В 04 С 3/06 / А.В. Акулич, Б.С.Сажин, П.В.Акулич, А.Г.Егоров; заявитель Могил.технол. ин-т. – № 970300; заявл. 06.06.97; опубл. 30.09.00 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтелектуал. уласнасці. – 2000. – № 3. – С. 93-94.

11. Устройство для выделения частиц из газового потока: пат. 3476 Респ. Беларусь, МПК6 В 04 С 3/06 / А.В. Акулич, П.В.Акулич, А.Г.Егоров, В.Я.Ковалев; заявитель Могил.технол. ин-т. – № 970654; заявл. 26.11.97; опубл. 30.09.00 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтелектуал. уласнасці. – 2000. – № 3. – С. 94.

12. Групповой вихревой пылеуловитель: пат. 8329 Рэсп. Беларусь, МПК7 В04С 3/06, 5/28 / А.В. Акулич, К.В. Шушкевич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия.– № а 20040006; заявл. 08.01.2004; опубл. 30.08.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2006. – №4.– С. 56.

13. Батарейный вихревой пылеуловитель: пат. 17948 Рэсп. Беларусь, МПК7 В04С 3/06 / А.В. Акулич, К.В. Шушкевич, А.А. Акулич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия.– № а20111150; заявл. 28.02.2012; Опубл. 28.02.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці – 2014. –№1. – С.72.

14. Способ очистки газа от твердых частиц: пат. 6280 Респ. Беларусь, МПК7 B 04 C 3/04, B 01 D 45/12 / А.В. Акулич; заявитель Могил. технол. ин-т. – № a 20001037; заявл. 22.11.00; опубл. 30.06.04. – № 2. –С. 140.

15. Способ очистки газа от твердых частиц. пат. 11606 Рэсп. Беларусь, МПК (2006) B04C 3/00, B01D 45/12 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, В.М. Акулич, заявитель и Могил. гос. унив. продовольствия.– №a20060662, заявл. 04.07.2006; опубл. 28.02.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2009. – №1.– С. 62.

16. Способ очистки газа от твердых частиц: пат. 17046 Рэсп. Беларусь, МПК2006 B04C 3/06, B01D 45/12 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, В.М. Акулич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия.– № a20101291; заявл. 02.09.2010; Опубл. 30.04.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці – 2013. –№2.

17. Комбинированный пылеуловитель: пат. 8290 Рэсп. Беларусь, МПК7 B01D 46/02, B04C 3/06 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия.– № a 20030016; заявл. 08.01.2003; опубл. 30.08.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2006. – №4.– С. 52–53.

18. Комбинированный пылеуловитель: пат. 8539 Рэсп. Беларусь, МПК7 B04C 3/00, B01D 50/00 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия.– № a 20031138; заявл. 30.06.2004; опубл. 30.10.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2006. – №5.– С. 83.

19. Комбинированный пылеуловитель: пат. 15123 Рэсп. Беларусь, МПК2006 B01D 46/02, B04C 3/06 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, В.М. Акулич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия.– № a 20081401; заявл. 06.11.2008; опубл. 30.12.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2011. – №6.– С. 80.

20. Способ очистки газа от твердых частиц: пат. 16599 Рэсп. Беларусь, МПК2006 B04C 3/00, B01D 45/12, B01D 46/30 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, А.А. Акулич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия.– № a20101052; заявл. 09.07.2010; опубл. 30.12.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2012. – №6.

21. Способ очистки газа от твердых частиц: Евразийский патент 035880, B1 B04C 7/00, B01D 45/12 / А.А. Акулич, А.В. Акулич, В.М. Лустенков, заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия.– № 201700235; заявл. 17.04.2017; выдан 26.08.2020. Опубликован в Бюллетене ЕАПВ «Изобретения (евразийские заявки и патенты)», №8.-2020 г.

22. Способ очистки газа от твердых частиц: Евразийский патент 029246, B1 B01D 50/00 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, А.А. Акулич, заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия.– № 201500461; заявл. 01.04.2015; выдан 28.02.2018. Опубликован в Бюллетене ЕАПВ «Изобретения (евразийские заявки и патенты)», №2.-2018 г.

УДК 66.048.5.086.4:621.8.037-027.236 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-216-220

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ
ENERGY-EFFICIENT DEVICES FOR DEHYDRATION OF PLANT RAW MATERIAL

Бурдо Олег Григорьевич, Сиротюк Илья Вадимович, Акимов Александр Викторович
Oleg G. Burdo, Ilya V. Sirotyuk, Aleksandr V. Akimov

Одесская национальная академия пищевых технологий – ОНАПТ, Украина, Одесса
Odessa National Academy of Food Technologies – ONAFT, Ukraine, Odessa
e-mail: oleg-burdo@mail.ru, ilyxin09@gmail.com, akimch27@gmail.com)

Аннотация: Анализируются особенности разных принципов обезвоживания пищевого сырья. Предложена гипотеза о возможности обезвоживания высоковлажного сырья в условиях электромагнитного поля путем организации из твердой фазы двух потоков (жидкости и пара). Гипотеза основана на пародинамическом эффекте. Выполнены экспериментальные исследования, которые подтвердили справедливость гипотезы. Представлена оценка энергетических характеристик процесса дегидратации.

Abstract: The article provides analysis of different types of dehydration of food raw material. A proposed hypothesis suggests a possibility of dehydration of raw material with high water content in electromagnetic field by formation two flows from solid phase (liquid and vapor). The hypothesis is based on vapordynamic effect. Experimental studies were carried out and confirmed the hypothesis. The study provides energetic description of dehydration process.

Ключевые слова: обезвоживание, дегидратация, выпарка, сушка, электромагнитное поле.

Keywords: dehydration, evaporation, drying, electromagnetic field.

В технике повышения концентрации растворов используются 3 принципа удаления влаги: механический (мембранный, центрифугирование и пр.), тепловой (выпаривание) и диффузионный [1]. Всем присущи и достоинства и недостатки (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация принципов обезвоживания растворов.

№	Процесс/движущая сила	Достоинства	Недостатки
1	Механический Разность давлений	Минимальные энергетические затраты на процесс из-за отсутствия фазового перехода	Малая производительность. Ограниченное значение конечной концентрации. Проблемы производства мембран.
2	Тепловой (выпаривание) Разность температур	Простота конструкции. Большая производительность. Простота эксплуатации.	Максимальные энергетические затраты для перевода влаги в пар. Ограниченное значение конечной концентрации. Опасность порчи термолабильных компонентов сырья.
3	Диффузионный (криоконцентрирование) Разность концентраций	Низкие затраты энергии. Полное сохранение функциональных свойств компонентов	Высокие капитальные затраты. Сложность реализации тоннажного производства. Ограниченное значение конечной концентрации.

В пищевых технологиях для концентрирования растворов наибольшее распространение получили выпарные аппараты. Они предельно просты и имеют высокую

производительность. Однако их проблема связана с ростом термического сопротивления пограничного слоя на поверхности теплопередачи с повышением концентрации раствора и его вязкости. Появляется привкус «варки», опасность порчи продукта. Для соответствия растущим требованиям к качеству продукта ограничиваются значением конечной концентрации. И это ограничение (от 25 до 60%), определяется видом продукта.

При наличии твердой фазы для обезвоживания сырья применяют технологии сушки, теория которой отличается значительной сложностью среди всех массообменных процессов. Кроме того, сушка характеризуется и высокими затратами энергии. Например, энергетический КПД самой простой выпарки составляет 85%, а лучших сушильных технологий – в разы меньше. Причина в известном противоречии сушильных технологий. Задача повышения интенсивности процессов переноса связана с ростом скорости потока теплоносителя. А это требует повышения расхода теплоносителя и, как следствие, роста потерь энергии с отработанным теплоносителем.

В работе поставлена задача найти эволюционные пути развития техники обезвоживания, перейти от конвективных принципов к инновационным, снять с воздуха задачу теплоносителя и оставить только задачу диффузионной среды. В качестве инновационных источников энергии рассматриваются электромагнитные генераторы микроволнового диапазона.

Для решения задачи сформулирована гипотеза: «Применение электромагнитных источников энергии в процессе удаления влаги из пищевого сырья, содержащего твердую фазу, позволит кроме традиционного выхода паровой фазы сформировать дополнительно своеобразный поток жидкой фазы, движущей силой которого является пародинамический эффект, возникающий в результате локальной диссипации электромагнитной энергии в объеме твердой фазы». Фактически, такой поток жидкой фазы будет представлять сок пищевого сырья. Рассмотрим физическую схему, которая иллюстрирует гипотезу (рисунок 1).

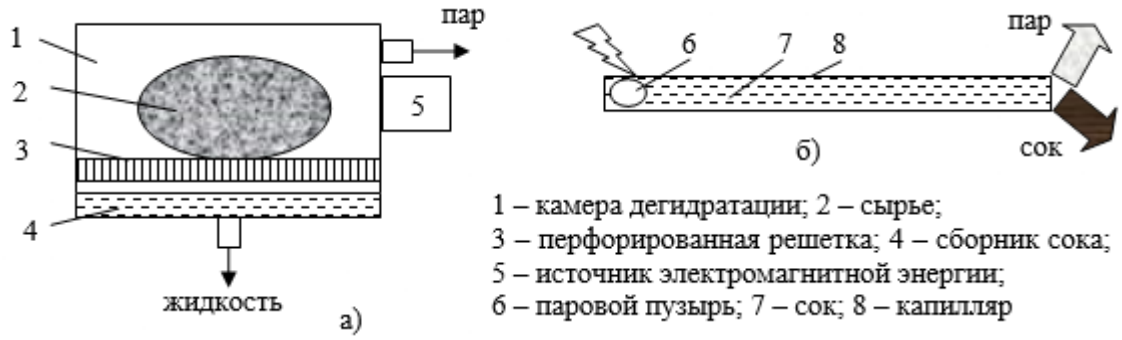


Рисунок 1 – Схема процесса дегидратации: а) – физическая модель установки; б) – модель «пародинамического эффекта».

Анализируемый процесс обезвоживания, по сути, не является ни классической сушкой (он не диффузионный), ни выпариванием [1, 2]. Авторы называют его процессом дегидратации. Использование электромагнитных источников энергии приводит задачу и к другим граничным (ГУ) условиям. При ГУ 2 рода проходит диссипация электромагнитной энергии (рис.1, б) в теплоту. В результате внутри капилляра 8, заполненного соком 7, формируется паровой пузырек 6. В глубине капилляра растет давление, которое инициирует пародинамический эффект – жидкость выбрасывается из открытого торца капилляра в среду. Таким образом, на выходе капилляра два потока: пара и жидкости. Впервые такой эффект заявлен в работе авторов [3], дальнейшее развитие теории бародиффузии проведено в [4], а доказательство его существования видеосъемкой – в [5]. Установлены интервалы формирования пузыря и времени полного осушения канала [5].

Представляется, что запись нестационарной математической модели такого процесса дегидратации при ГУ 2 рода корректна при таких допущениях.

Полярные молекулы равномерно распределены по объему продукта. Поэтому поток электромагнитной энергии, поступающей в камеру, расходуется на повышение внутренней энергии продукта и рассматривается как равномерно распределенные по объему внутренние источники энергии.

Все физические характеристики в процессе обезвоживания являются непрерывными функциями координат и времени.

Моделирование процессов в капиллярах и в межклеточном пространстве проводится в цилиндрических координатах.

Действием гравитационных и инерционных сил в объеме и теплообменом с окружающей средой пренебрегается.

В такой постановке при начальных условиях ($\tau = 0$): $t_1 = t_н$; $V_1 = V_н$; нестационарное поле температур для процесса нагрева жидкости записывается в форме

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1\left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 t_1}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2}\right) + \frac{N\eta}{V_1 c_{1\prime} \rho_1}, \quad (1)$$

Формирование пузырька пара характеризуется постоянством температуры фазового перехода ($t_и = const$), а подведенная энергия ($N\eta\tau$) расходуется на повышение внутренней энергии:

$$N\eta = W_П t_И \left(c_Ж - c_П\right) = W_П r \quad (2)$$

В результате резко повышается давление

$$P(\tau) = Pa + \Delta P \quad (3)$$

В соотношениях (1 - 3): c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); a – коэффициент температуропроводности, м^2/с; N – мощность электромагнитного генератора, Вт; η – КПД магнетрона; τ – время работы, с; W – расход пара, кг/с; r – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; *Ж* – жидкость; *П* – пар; *z, r, φ* – координаты.

Уровень роста давления (ΔP) определяется основным уравнением гидравлики [1] дополненным капиллярным потенциалом канала:

$$\Delta P = \frac{\rho w^2}{2}\left[\frac{\lambda l}{d} + \Sigma\zeta\right] + \rho g l + \frac{\sigma}{d} \quad (4)$$

где: l - длина каналов, d – их диаметр, м; λ – коэффициент трения, ζ – сумма местных гидравлических сопротивлений; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

В результате объем жидкости в капилляре уменьшается и его текущее значение определяется уравнением материального баланса

$$V_1(\tau) = V_Н - (V_П - V_Ж)(\tau) \quad (5)$$

Причем, уменьшение объема может быть следствием выброса объема пара ($V_П$) и части жидкости ($V_Ж$) из капилляра.

Сформулированная гипотеза подтверждена экспериментально. В соответствии с рисунком 1 собран стенд, который включал вакуумную резонаторную камеру, микроволновой генератор энергии, холодильную установку, систему вакуумирования, датчики температуры пара и сока. Продукт устанавливался на тефлоновую подставку, вторичный пар конденсировался в холодильнике-дистилляторе. Сок и конденсат собирались в отдельные емкости, установленные на весах ТВЕ-0,21-0,01. Текущие значения веса и температур поступали на систему сбора информации, собранную на базе планшета CHUWI CW1506. Опыты проводились на высоковлажном сырье – бананы и арбуз.

Результаты исследований, проведенных на арбузе, (рисунок 3) подтверждают сформулированную гипотезу. За время эксперимента выход сока составил 77,5% от общей суммы сока и гидролата. При дегидратации бананов получены сушеные образцы без механических повреждений (рисунок 2).



Рисунок 2 – Банан после дегидратации.

Энергетика процесса дегидратации анализировалась в 2 аспектах. Во-первых, проведена оценка режима работы аппарата в условиях пародинамического эффекта. Соотношение расходов сока и гидролата показывает, что затраты энергии снижаются до 25%. Во-вторых, проведена оценка энергетической эффективности технологии обезвоживания, основанной на использовании электромагнитных источников энергии. В связи с тем, что сравниваются технологии с разными источниками энергии, то предложено приводить расчеты к затратам первичной энергии. За базовый вариант принимается 1кг нефтяного эквивалента (кг н.э.). Т.е. - характеристики топлива с теплотой сгорания 40 МДж/кг. Тогда:

$$d_0 = \frac{кг\ удаленной\ влаги}{кг\ нефтяного\ эквивалента} \qquad (6)$$

а полезно использованная на процесс обезвоживания энергия: **J = МДж/кг н.э.**

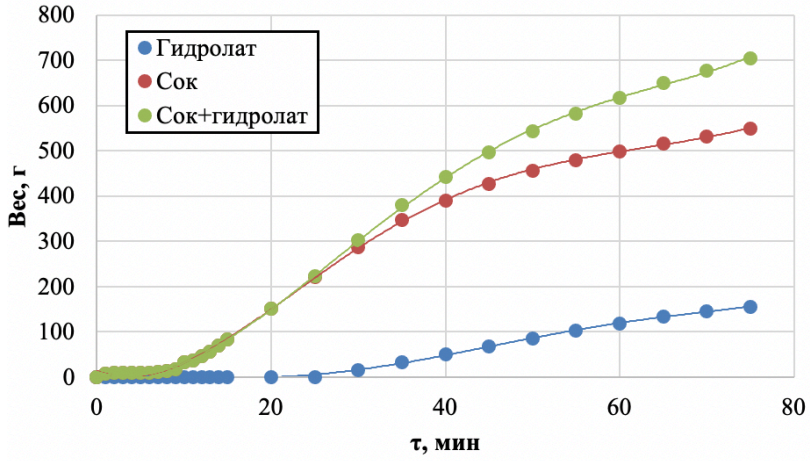


Рисунок 3 – Кинетика обезвоживания сырья с твердой фазой.

Результаты анализа традиционного коэффициента удельной энергоэффективности (КУЭ) и предложенных показателей представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение традиционных и предложенных показателей энергоэффективности различных технологий обезвоживания.

Энерготехнология	**КУЭ, МДж/кг влаги**	**J, МДж/кг н.э.**	**do, кг в/кг н.э.**
Сушка традиционная	4 – 7	4 – 9	1 – 3
Сушка в ЭМП	2 – 4	10 – 20	5 – 6
Выпарка + сушка традиционная	2,8	8 – 20	3 – 6
Выпарка в ЭМП	2,7	10 – 20	3,5 – 7,5

Значение **do = 6 кг в/кг н.э.** в настоящее время достигнуто при испытаниях сушильных аппаратов с ЭМП. Визуально отмечено, что из камеры выходит пароводяная смесь [5]. Аппараты реализуют режим бародиффузии, а это существенно снижает расход энергии. В режиме пародинамического процесса реально достичь значений **do = 50 кг в/кг н.э.** при четком согласовании мощности электромагнитных генераторов с характеристиками пищевого сырья.

Выводы

Экспериментально доказано существование «пародинамического эффекта» при дегидратации влажного сырья с твердой фазой. Показано, что возможно удаление из сырья сока без механической порчи и получение готового продукта с высокими потребительскими свойствами. Использование пародинамического эффекта позволяет в разы снизить удельные затраты энергии на процесс дегидратации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Химия, 1987. 495 с.

2. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: Колос, 2010. 320 с.

3. Burdo O.G. Nanoscale effects in food-production technologies // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2005. Vol. 78(1). P. 90–96.

4. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Одесса: Полиграф, 2010. 368 с.

5. Burdo O.G., Syrotyuk I.V., Alhury U., Levtrinska J.O. Microwave Energy, as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polydisperse Extract Formation // Problemele energeticii regionale. 2018. Vol. 36(1). P. 58–71.

УДК 66.084.8 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-221-225

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ БЕЗ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА
ULTRASONIC INFLUENCE FOR FOOD DEHYDRATION WITHOUT PHASE TRANSITION

Хмелёв Владимир Николаевич, Шалунов Андрей Викторович, Терентьев Сергей Александрович, Нестеров Виктор Александрович
Vladimir N. Khmelev, Andrey V. Shalunov, Sergey A. Terentiev, Viktor A. Nesterov

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Россия, Бийск
Biysk Technological Institute (branch) of FSBEI of HE «Altai state technical university named after I.I. Polzunov», Russia, Biysk
(e-mail: vnh@bti.secna.ru, shalunov@bti.secna.ru, sergey@bti.secna.ru, nva@bti.secna.ru)

Аннотация: В работе представлены результаты сушки картофеля при синергетическом воздействии теплом и ультразвуковыми колебаниями в диапазоне 130-175 дБ. Построены кривые скорости сушки и зависимости средней скорости сушки от уровня звукового давления для двух периодов сушки (высокое и малое влагосодержание). Выявлен механизм удаления свободной жидкости на начальном этапе сушки за счет ультразвукового диспергирования, триггером которого является уровень звукового давления в 150 дБ.

Abstract: The paper presents the results of drying potatoes with a synergistic effect of heat and ultrasonic vibrations in the range of 130-175 dB. The curves of the drying rate and the dependence of the average drying rate on the sound pressure level for two drying periods (high and low moisture content) were plotted. The mechanism of free liquid removal at the initial stage of drying due to ultrasonic dispersion is revealed, the trigger of which is the sound pressure level of 150 dB.

Ключевые слова: ультразвуковая сушка, диспергирование, уровень звукового давления.
Keywords: ultrasonic drying, dispersing, sound pressure level.

Уменьшение веса продуктов питания и их длительное хранение обеспечивается за счет обезвоживания. Обычно обезвоживание реализуется путем сушки, т.е. за счет фазового перехода жидкости в пар. В некоторых случаях, при высоких влагосодержаниях в материале влагу удаляют механическим воздействием, например, фильтрованием, центрифугированием, выбиванием [1]. Механическое удаление влаги позволяет экономить энергию, так как исключается энергозатратный перевод жидкости в пар. Однако, для многих овощей и фруктов механическое воздействие или не допустимо, или мало эффективно. Поэтому для ускорения сушки все чаще обращают внимание на воздействие энергией акустических колебаний. Низкочастотное акустическое воздействие (менее 16 кГц) негативно воздействует на человека, поэтому на практике для сушки материалов необходимо использовать ультразвуковой диапазон (выше 20 кГц) [2-5].

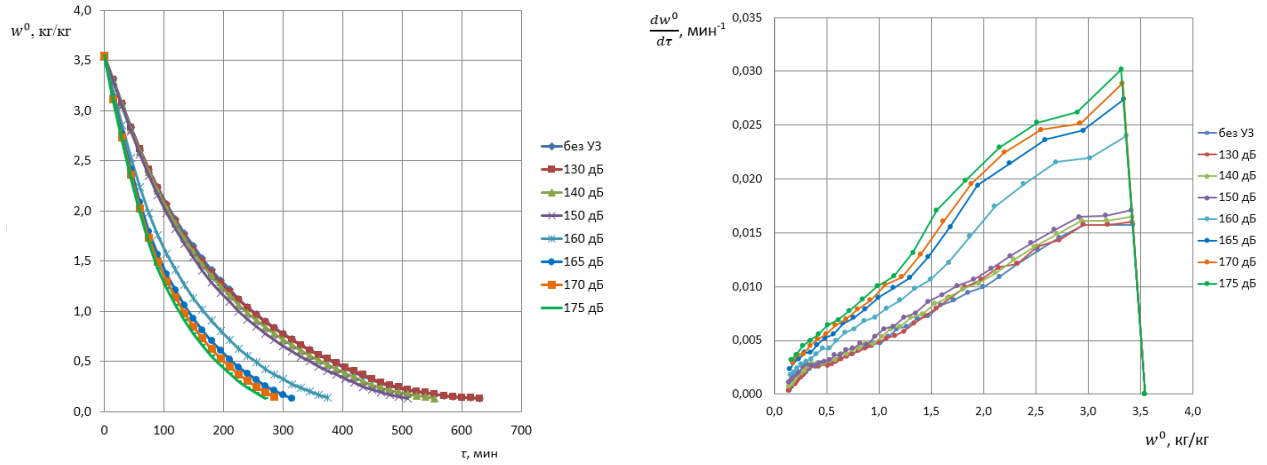
Механизм интенсификации удаления влаги ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности до конца не раскрыт, однако выделяют следующие физические механизмы: акустические потоки, нестабильность на границах раздела, радиационное давление, механическое воздействие или «эффект губки», термическое действие, структурная диффузия и т. п. [6]. Распространение ультразвуковых волн, в основном, вызывает механические эффекты в обезвоживаемом материале, которые могут удалять воду путем ее диспергирования [7, 8].

Целью данной работы является выявление уровней звукового давления ультразвукового воздействия на обезвоживаемый материал, при которых включается механизм диспергирования (выбивания) жидкости.

Для исследований применялась модернизированная сушильная установка SHINI SHD25, с ультразвуковым дисковым излучателем [9]. В данной установке, за счет ее конструктивных особенностей и используемого ультразвукового аппарата «Соловей» [10] удается достигать уровня звукового давления 175 дБ.

В качестве высушиваемого продукта был выбран самый распространенный в РФ овощ – картофель. Масса картофеля в экспериментах составляла 250±0,1 г, с размером кубиков 15×15×15±1 мм. Температура сушильного воздуха 60±1 ^{0}C, скорость потока – 0,5±0,03 м/с.

Картофель взвешивали каждые 15 мин сушки с точностью ±0,1 г. Процесс обезвоживания заканчивался, когда масса картофеля уменьшалась в 4 раза, после чего строились кривые сушки и скорости сушки (Рисунок 1).



а) б)

а) кривые сушки; б) кривые скорости сушки

Рисунок 1 – Кинетические кривые сушки картофеля при различных уровнях звукового давления

Влагосодержание картофеля w^0 определялось по [1]:

$$w^0 = \frac{W}{G_c}, \quad (1)$$

где W – масса влаги, G_c – масса сухого картофеля.

Скорость сушки определялась методом численного дифференцирования:

$$\frac{dw^0}{d\tau} = -\frac{w^0_{i+1} - w^0_i}{\tau_{i+1} - \tau_i}, \quad (2)$$

где w^0_i – влагосодержание картофеля в момент времени τ_i, w^0_{i+1} – влагосодержание в момент времени τ_{i+1}.

Время сушки картофеля конвективным способом (без УЗ) составило 630 мин. Эксперименты с применением ультразвукового воздействия выявили уменьшение времени обезвоживания с увеличением уровня звукового давления (Таблица 1).

В Таблице 1 эффективность обезвоживания – это уменьшение времени удаления влаги по сравнению со временем при конвективной сушке. Низкий уровень звукового давления (130 дБ) не интенсифицирует процесс обезвоживания. Ультразвуковое воздействие с уровнем 160-165 дБ дает значительный прирост эффективности по сравнению с более низким уровнем звукового давления.

Таблица 1 – Время обезвоживания картофеля при различных уровнях звукового давления

	Уровень звукового давления, дБ							
	0	130	140	150	160	165	170	175
Время сушки, мин	630	630	555	510	375	315	285	270
Эффективность обезвоживания, %	0	0	12,7	19	40,5	50	54,8	57,1

Удаление влаги в ультразвуковом поле при уровнях 130-150 дБ характеризуется постоянной скоростью, при более высоких уровнях период постоянной скорости не виден. Однако заметен скачкообразный рост скорости сушки на начальном этапе процесса при уровнях 160-165 дБ. В указанном диапазоне на начальном этапе идет интенсивное обезвоживание, причем скорость удаления свободной влаги с поверхности картофеля ограничена скоростью диффузии влаги из внутреннего объема, что подтверждается отсутствием периода постоянной скорости сушки. В диапазоне 165-175 дБ такой эффективности роста скорости не выявлено.

Если разделить процесс обезвоживания на два равных периода по влагосодержанию картофеля, то можно оценить среднюю скорость обезвоживания в период высокого влагосодержания (>1,78) и малого влагосодержания (<1,78) при разных уровнях звукового давления (Рисунок 2).

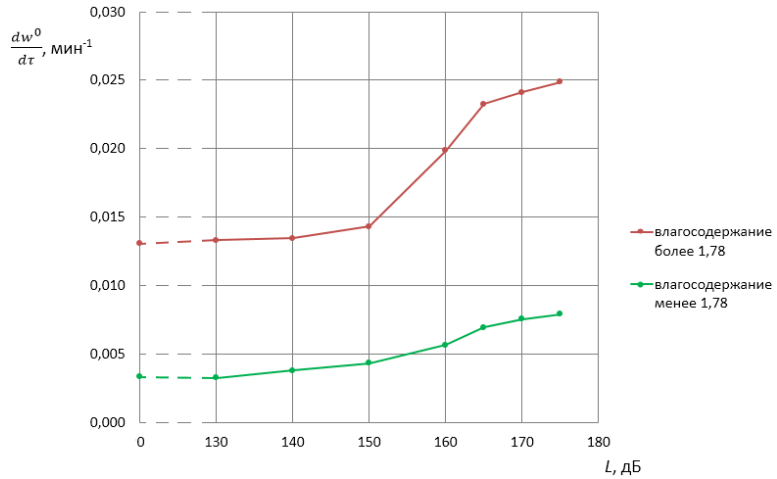
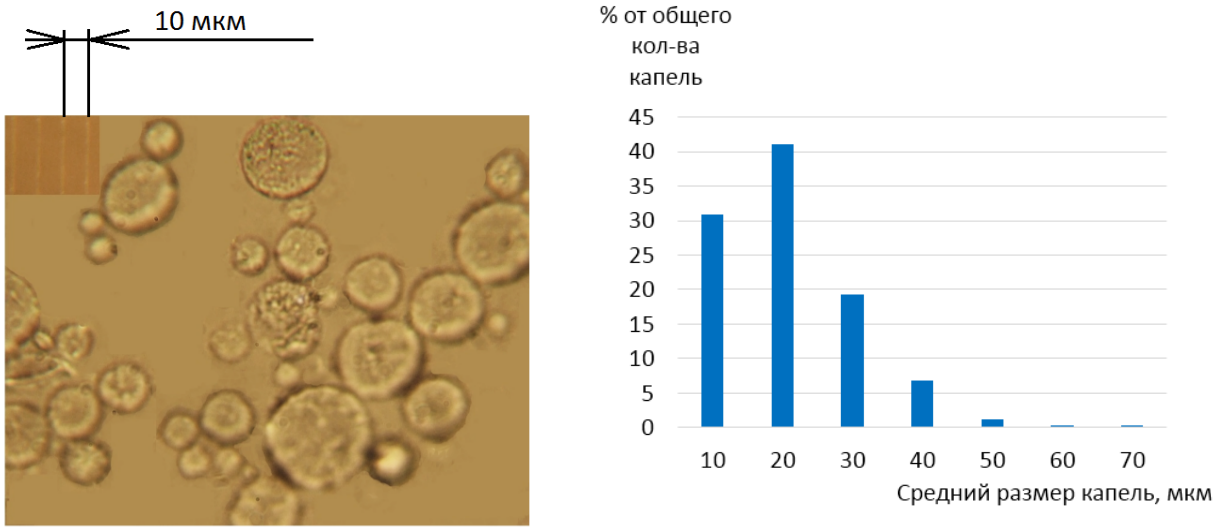


Рисунок 2 – Средняя скорость обезвоживания в зависимости от уровня звукового давления

В период малого влагосодержания (<1,78) средняя скорость обезвоживания растет практически линейно с увеличением уровня звукового давления. Для характеристики изменения средней скорости в период высокого влагосодержания был определен тангенс угла наклона кривой при разных уровнях звукового давления т.е. коэффициент прироста скорости *WL* при увеличении уровня звукового давления. В диапазоне 130-150 дБ прирост скорости не значительный (коэффициент *WL* не превышает 80×10^{-6} (мин×дБ)$^{-1}$), в диапазоне 150-165 дБ наблюдается резкий скачок скорости обезвоживания, *WL* достигает 680×10^{-6} (мин×дБ)$^{-1}$, в диапазоне 165-175 дБ прирост скорости снижается до 160×10^{-6} (мин×дБ)$^{-1}$. Значительный рост скорости обезвоживания в диапазоне 150…165 дБ может быть обусловлен реализацией механизма удаления влаги без фазового перехода, т.е. за счет диспергирования свободной влаги с поверхности картофеля ультразвуковыми колебаниями.

Для подтверждения механизма диспергирования воды на начальной стадии обезвоживания был проведен следующий эксперимент. Предметное стекло, покрытое тонким слоем иммерсионной жидкости, размещалось параллельно кубикам картофеля на расстоянии

3 см. Капли влаги, выбитые ультразвуковыми колебаниями из картофеля, улавливались слоем иммерсионной жидкости, погружаясь в нее. После этого проводилось фотографирование капель жидкости и построение распределения капель по размерам (Рисунок 3).



а) б)

а) микрофотография капель диспергированной воды, б) гистограмма распределения средних размеров капель воды

Рисунок 3 – Гистограмма распределения диаметров капель воды

Наличие, капель диспергированной ультразвуком жидкости свидетельствует об эффективной сушке за счет удаления влаги без фазового перехода (перевода жидкости в пар). Средний диаметр диспергируемых капель составляет около 20 мкм, что должно соответствовать ультразвуковому диспергированию на частоте 60…70 кГц. При условии осуществляемого в эксперименте ультразвукового воздействия на частоте 22 кГц средний размер капель должен быть около 70 мкм [11]. Различие в реальных размерах капель и их ожидаемом теоретическим значением можно объяснить многократным диспергированием (вторичным разрушением) удаляемых с поверхности высушиваемого материала [12, 13].

Механизм диспергирования реализуется пока присутствует свободная влага, однако средняя скорость ультразвуковой сушки в период малого влагосодержания значительно превышает среднюю скорость конвективной сушки, что доказывает эффективность ультразвука для ускорения диффузии влаги из внутренних слоев картофеля. Ускорение ультразвуковой сушки при малых влагосодержаниях происходит за счет формирования и взрыва кавитационных пузырьков в жидкости, находящейся в капиллярах.

Выводы

Использование ультразвуковых полей высокой интенсивности позволяет интенсифицировать процесс обезвоживания продуктов питания (картофеля). По результатам проведенных экспериментов отмечено уменьшение времени обезвоживания с увеличением уровня звукового давления. При 175 дБ сокращение времени достигает 57,1% по сравнению с чисто конвективной сушкой при тех же условиях.

Однако наиболее оптимальным уровнем звукового давления является диапазон 160-165 дБ, реализация которого не требует значительных конструктивных и энергетических затрат на формирование ультразвукового поля, но при котором обеспечивается ультразвуковое диспергирование жидкости без затрат энергии на реализацию фазового перехода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дытнерский Ю.И.* Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 3-е. В 2-х кн.: Часть 2. Массообменные процессы и аппараты, М.: Химия, 2002. 400 с.

2. *Верболоз Е. И., Иванова М. А., Демченко В. А. [и др.]* Исследование процесса сушки шиповника в поле действия ультразвука // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50, № 1. С. 79–86.

3. *Szadzińska J., Mierzwa D., Pawłowski A., Musielak G., Pashminehazar R., Kharaghani A.* Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot // Drying Technology. 2020. V. 38:1-2, P. 93-107, DOI: 10.1080/07373937.2019.1624565

4. *de Medeiros R. A. B., Barros Z. M. P., de Carvalho C. B. O. [et al.]* Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango // LWT – Food Science and Technology. 2016. V. 67. P. 167–173. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.049.

5. *Kowalski, S. J.* Ultrasound in wet materials subjected to drying: A modeling study // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. V. 84. P. 998-1007.

6. *Розенберг Л. Д.* Физика и техника мощного ультразвука: [в 3 кн.] АН СССР. Акустический ин-т. Москва, Наука, 1967-1970.

7. *Ensminger D.* Acoustic and electroacoustic methods of dewatering and drying // Drying Technology: An International Journal, 1988. V. 6(3). P. 473–499.

8. *Schossler K., Jager H., Knorr D.* Novel Contact Ultrasound System for the Accelerated Freeze- Drying of Vegetables // Innovat. Food Sci. Emerg. Technol. 2012. V. 16. P. 113–120.

9. *Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Хмелев М.В., Нестеров В.А., Тертишников П.П., Цыганок С.Н.* Ультразвуковая сушилка. Патент на ПМ RU 195247 U1: МПК F26B 5/02 (2006.01) / F26B 3/02 (2006/01), Опубл. 21.01.2020.

10. *Нестеров В.А., Хмелёв В.Н., Галахов А.Н., Шалунов А.В.* Создание и применение ультразвуковых излучателей для интенсификации процессов химических технологий в газовых средах или через газовые промежутки // Южно-Сибирский научный вестник. 2013. № 2 (4). С. 82–93.

11. *Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Shalunova A.V.* Providing the efficiency and dispersion characteristics of aerosols in ultrasonic atomization // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Т. 90. № 4. P. 831-844.

12. *Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н., Доровских Р.С., Нестеров В.А.* Теоретическое выявление режимов воздействия, обеспечивающих формирование высокодисперсного аэрозоля при двухстадийном ультразвуковом распылении // Ползуновский вестник. 2017. № 2. С. 99-104.

13. *Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A.* Method for producing fine liquid-drop systems in ultrasound fields // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2019. Т. 53. № 3. С. 419-431.

УДК 677.027:677.047.6 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-226-229

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСИИ МИКРОКАПСУЛИРОВАННЫХ АКАРИЦИДНО-РЕПЕЛЛЕНТНЫХ ВЕЩЕСТВ
DEVELOPMENT OF A METHOD FOR OBTAINING DISPERSION WITH MICROCAPSULATED ACARICIDAL-REPELLENT SUBSTANCES

Одинцова Ольга Ивановна, Липина Анна Андреевна, Есина Ольга Александровна, Смирнова Анастасия Сергеевна
Odintsova Olga Ivanovna, Lipina Anna Andreevna, Esina Olga Alexandrovna, Smirnova Anastasia Sergeevna

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail:odolga@yandex.ru, prohorova.a94@yandex.ru, Esina2016olga@mail.ru, nastyaassasmirnova0@gmail.com)

Аннотация: Разработана методика получения дисперсии, содержащей в своем составе микрокапсулы, в ядро которых включен альфа-циперметрин, растворенный в нетоксичном масляном растворителе. Оболочка капсул состоит из разноименно заряженных синтетических полиэлектролитов и ПАВ. Оценено дисперсное состояние разработанной системы. Предложена технология иммобилизации разработанного состава на текстильных материалах различного волокнистого состава.

Abstract: A method for obtaining a dispersion, which contains the microcapsules including alpha-cypermethrin dissolved in a non-toxic oil solvent, was developed. The capsule shell consists of differently charged synthetic polyelectrolytes and surfactants. The dispersion state of the developed system was estimated. The technology of developed dispersion immobilization on textile materials with various fibrous composition was proposed.

Ключевые слова: микрокапсулирование, синтетические полиэлектролиты, альфа-циперметрин, акарицидно-репеллентные вещества, репеллентная отделка.

Keywords: microencapsulation, synthetic polyelectrolytes, alpha-cypermethrin, acaricidal-repellent substances, repellent finishing.

В современном мире метод микрокапсулирования находит повсеместное применение в фармацевтике, сельском хозяйстве, пищевой и легкой промышленности [1-3]. Особый интерес данный метод представляет для создания «умных» тканей. Интеграция микрокапсул в структуру текстильного материала позволяет придавать им новые уникальные свойства [4,5]. Такие виды отделок волокнистых материалов в скором времени могут заменить малоэффективную традиционную заключительную отделку на основе препаратов старого поколения. Актуальным метод микрокапсулирования является для создания текстильных материалов с защитными свойствами против насекомых. Костюмы, пошитые из таких материалов, станут необходимым средством защиты в период активности опасных насекомых, особенно, клещей. Заключение акарицидно-репеллентных веществ в микрокапсулы позволит снизить риск возможных аллергических реакций человека, за счет отсутствия непосредственного контакта с кожей и пролонгированного выделения в процессе эксплуатации текстильного изделия [6].

Цель исследования заключалась в разработке методики получения стабильной формы дисперсии с микрокапсулами, содержащими акарицидно-репеллентные вещества и создании технологии их иммобилизации на текстильные материалы. В качестве акарицидно-репеллентного вещества был выбран синтетический пиретроид альфа-циперметрин (АЦП). По своим показателям он оказывает более эффективное паралитическое воздействие на насекомых по сравнению с импортным аналогом перметрином.

Современные технологии пропитки текстильных материалов акарицидно-репеллентными веществами основаны на применении препаратов, где данные вещества растворены в летучих органических растворителях, поэтому для перехода к более простому аппаратурному оформлению и исключения побочных реакций при вдыхании таких веществ, было предложено использовать нетоксичные масляные растворители. Первоначальной стояла задача получения устойчивой прямой наноэмульсии «масло в воде» для того, чтобы в дальнейшем получать на ее основе дисперсию, содержащую капсулы АЦП в масле, окруженные полиэлектролитной оболочкой. В качестве эмульгаторов были опробованы ряд эмполов, неонолов и карбоксипав. Исследовано влияние ПАВ на размер частиц и устойчивость полученной эмульсии. Оценку эмульгирующей способности проводили по измерению объема выделившейся водной фазы через 30 минут и 1 час после приготовления эмульсии масло/вода. В качестве масляной фазы использовали подсолнечное масло. Устойчивая прямая эмульсия получена при введении в систему препаратов Карбоксипав, Неонола АФ-9/10, Эмпола 10 и Синтанола АЛМ -10. Максимальное время жизни эмульсии наблюдалось при использовании в качестве эмульгаторов композиции Карбоксипав и Неонола АФ 9/10 (рис. 1).

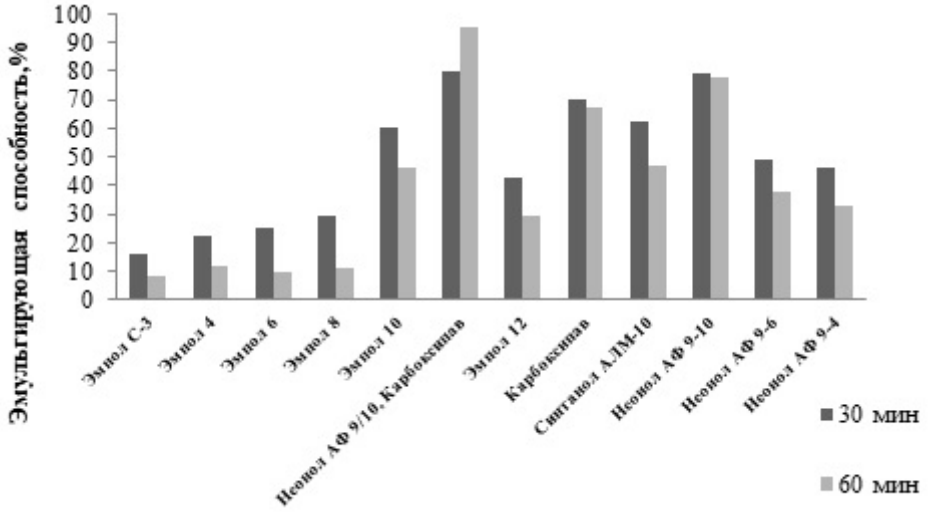
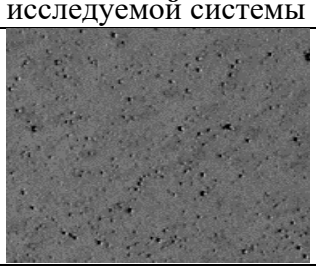
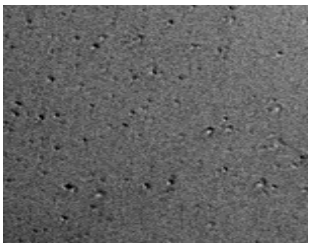
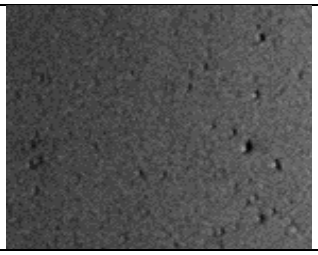


Рисунок 1 – Влияние природы ПАВ на их эмульгирующую способность

Важными показателями возможности использования масел в разрабатываемой системе является не только их способность растворять альфа-циперметрин, но и образовывать с ним эмульсию, устойчивую в течение длительного времени. В качестве растворителей были опробованы: облепиховое, пихтовое, кедровое, сосновое, лемонграсс, мятное, шалфейное, гвоздичное, розмариновое, чайного дерева, эвкалиптовое, оксиэтилированные подсолнечное и рапсовое масла. Все исследуемые вещества растворяют АЦП при нагревании до 40 ^{0}C, при комнатной температуре эффективны гвоздичное, лемонграсс и сосновое масла. Наиболее однородными по размеру и устойчивыми в течение 24 часов оказались дисперсии, содержащие капсулы, полученные на основе масел пихты, сосны, мяты, розмарина, эвкалипта, чайного дерева и оксиэтилированных рапсового (ОРМ) и подсолнечного масел (ОПМ). Выбраны составы для получения дисперсии, содержащей микрокапсулированное акарицидно-репеллентное вещество, растворенное в наиболее экономически доступном масляном растворителе, эмульгаторы и полиэлектролиты, применяемые в качестве оболочки капсул, при использовании которых получается устойчивая система с нанометровым размером частиц, параметры которых были определены методом динамического рассеяния света на приборе Photocor Compact-Z. Изображение микрокапсул было получено методом оптической микроскопии на микроскопе МИКМЕД-6. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние состава дисперсии на размеры микрокапсул

№, п/п	Состав слоев микрокапсулы	Фотографии исследуемой системы	Размеры частиц, нм	Процентное соотношение, %
1	Состав 1: ОРМ с АЦП, Карбоксипав, Неонол АФ 9/10		102,1 157,4	2,9 97,1
			102,1 161,7	0,1 91,9
2	Состав 2: ОРМ с АЦП, Карбоксипав, Неонол АФ 9/10, ПДАДМАХ		102,1 168,4	1,7 98,3
			173,0	100,0
3	Состав 3: ОРМ с АЦП, Карбоксипав, Неонол АФ 9/10, ПДАДМАХ, Акремон LK-2		217,8	100,0
			198,1	100,0
			187,7	100,0

Сформированная микрокапсула с альфа-циперметрином в дисперсии выглядит следующим образом (рис. 2): масляное ядро капсулы, состоящее из альфа-циперметрина, растворенного в оксиэтилированном рапсовом масле, далее ядро окружает смесь эмульгаторов карбоксипав и неонола, после чего идет оболочка, состоящая из катионного полиэлектролита ПДАДМАХ (полидиаллилдиметиламмоний хлорид), и анионного ПЭ - Акремона LK-2. Количество самоорганизованных слоев полиэлектролитов может варьироваться до 8.

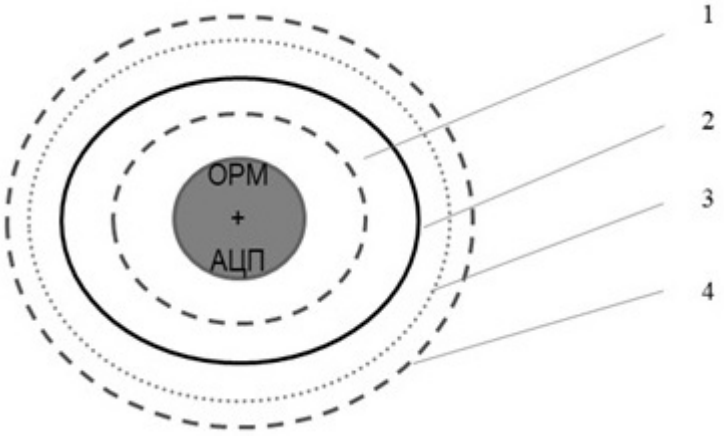


Рисунок 2 – Состав микрокапсулы с альфа-циперметрином:
1 – Карбоксипав; 2 – Неонол АФ-9/10; 3 – ПДАДМАХ; 4 – Акремон LK-2

Предложена и успешно внедрена в производство ООО «Объединение «Специальный текстиль» г. Шуя технология иммобилизации разработанной дисперсии на текстильные материалы, включающая в себя пропитку дисперсией, конвективную подсушку, повторную пропитку, контактную сушку, послойное закрепление полиэлектролитами и контактную сушку [7].

Разработанная технология защищена 4 патентами РФ. Успешно исследовано защитное действие костюмов в условиях природного очага вирусного клещевого энцефалита в природных биотопах Иркутской области и Ханты-Мансийского автономного округа. Установлена высокая степень защиты от клещей-переносчиков (КЗД клещи = 98,2% при нормативном показателе не менее 98%) и 97,5% от гнуса (при нормативном показателе не менее 95%).

Выводы

Предложены нетоксичные эффективные растворители альфа-циперметрина. Обоснован выбор эмульгаторов для получения стабильной дисперсии растворенного в масле АЦП. Разработана методика микрокапсулирования АЦП и иммобилизации капсул на текстильном материале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кролевец А.А., Тырсин Ю.А., Быковская Е.Е. Применение нано- и микрокапсулирования в фармацевтике и пищевой промышленности. Ч. 2. Характеристика инкапсулирования // Вестник Российской академии естественных наук. 2013. № 1. С. 77.

2. Rodrigues S.N., Martins I.M., Fernandes I.P. et al. Microencapsulated perfumes for textile application // Chemical Engineering Journal. 2009. V. 149. № 1–3. P. 463.

3. Yuen C.W.M., Kan C.W., Cheuk K.L. Synthesis and characterisation of chitosan-based oil-in-water microcapsules for skin caring fibrous materials // International Journal of Molecular Medicine. 2011.V. 28. P.72.

4. Bezerra F.M. Carmona O.G., Carmona C.G. Controlled release of microencapsulated citronella essential oil on cotton and polyester matrices // Cellulose. 2016. V. 23. № 2.P. 1459.

5. Aracil M.A.B., Bou-Belda E., Monllor P. et al. Binder effectiveness of microcapsules applied onto cotton fabrics during laundry // Text. Inst. 2016.V. 107.№ 3. P. 300.

6. Одинцова О.И., Прохорова А.А. (Липина А.А.), Владимирцева Е.Л., Петрова Л.С. Использование метода микроэмульсионного капсулирования для придания текстильным материалам акарицидных свойств // Изв. вузов. Технология Текстильной промышленности. 2017. Т. 367. № 1. С. 332.

7. Липина А.А., Есина О.А., Смирнова А.С., Одинцова О.И. Оптимизация условий иммобилизации микрокапсул на текстильных материалах // Журнал «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы», Иваново. 2019. Ч.2. С. 110.

УДК 677.46 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-230-234

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОГНЕЗАЩИТНОЙ МОДИФИКАЦИИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
DEVELOPMENT OF A METHOD FOR FIRE-RESISTANT MODIFICATION OF TEXTILE MATERIALS

Бесшапошникова Валентина Иосифовна *, Микрюкова Ольга Николаевна *, Лебедева Татьяна Станиславовна *, Хамматова Венера Василовна **
Valentina I. Beshaposhnikova*, Olga N. Mikryukova*, Tatyana S. Lebedeva*, Venera V. Khammatova**

**Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва*
** The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow*
Казанский научно-исследовательский технологический университет (КНИТУ), Россия, Казань
***Kazan Scientific Research Technological University (KNRTU), Russia, Kazan*
(e-mail: vibesvi@yandex.ru; olgavggu@gmail.com; tatka-1535@yandex.ru; venerabb@mail.ru)

Аннотация: Представлены результаты огнезащитной модификации ПАН волокна способом инклюдации под воздействием ВЧЕ плазмы пониженного давления. Кислородный индекс огнезащищенного ПАН волокна возрастает до 30-31%об. Замедлитель горения афламмит KWB усиливает процессы циклизации, дегидрирования и карбонизации огнезащищенного ПАН волокна, что способствует снижению его горючести.

Abstract: The results of the flame-retardant modification of the PAN fiber by the method of incubation under the influence of low-pressure HPE plasma are presented. The oxygen index of the fire-proof PAN fiber increases to 30-31% vol. The gorenje aflamit KWB flame retardant enhances the processes of cyclization, dehydrogenation and carbonation of the flame-proof PAN fiber, which helps to reduce its flammability.

Ключевые слова: огнезащита, ВЧЕ плазма, свойства, структура, ПАН-волокно.
Key words: fire protection, VCE plasma, properties, structure, PAN-fiber, fabrics.

Анализ рынка отечественных и зарубежных текстильных материалов показал, что обивочные и отделочные ткани вырабатывают преимущественно из натуральных и синтетических многотоннажных химических волокон – в том числе полиакрилонитрильных. Однако такие материалы являются легко воспламеняемыми, характеризуются высокой скоростью горения и токсичностью продуктов пиролиза, поэтому должны подвергаться огнезащитной обработке. В технологии огнезащиты достигнуты определенные успехи [1-7], однако прогресс не стоит на месте, появляются новые технические и технологические возможности и замедлители горения (ЗГ), что обуславливает актуальность исследований направленных на разработку энергоресурсосберегающих, эффективных и безопасных способов модификации текстильных материалов.

Полиакрилонитрильное (ПАН) волокно обладает комплексом ценных свойств: высокой прочностью и эластичностью, упругостью и устойчивостью к истиранию, светостойкостью и малой теплопроводностью. Это придает изделиям из ПАН волокна хорошие теплозащитные свойства, и делает привлекательным их применение в производстве как текстиля для одежды, так и обивочных, отделочных и других материалов и изделий.

Существенным недостатком ПАН волокон, сдерживающим его широкое применение, является горючесть, легкая воспламеняемость (кислородный индекс ~19%), высокая скорость распространения пламени, температура воспламенения - 250 ^{o}C. Высокая горючесть волокна обусловлена тем, что уже при низких температурах выделяются легко летучие нитрильные соединения (акрилонитрил, ацетонитрил и др.), которые, взаимодействуя с воздухом,

образуют горючую газовую смесь. Поэтому для снижения горючести ПАН волокон необходимо предотвратить деполимеризацию, приводящую к образованию нитрилов, и создать условия для реакции циклизации. Этого можно достичь, используя фосфорсодержащие замедлители горения (ЗГ) [3, 4]. Поэтому в работе, в качестве замедлителя горения выбрали фосфоразотсодержащий афламмит KWB (N-гидроксиметиламид диалкилфосфонпропионата). Приготовление модифицирующего раствора осуществляли разбавлением ЗГ дистиллированной водой до требуемой концентрации вещества в пропиточном растворе.

Модификацию ПАН волокон осуществляли по четырем способам:

1-ый способ – пропитку плюсованием, кондиционного ($ПАН_{конд}$) волокна 10÷30% раствором афламмита KWB с добавлением 1% фосфорной кислоты, осуществляли при температуре 60-80ºС в течение 120-180 сек. Для закрепления ЗГ на волокне, образцы погружали на 2-3 мин в ванну с 10% раствором сшивающего агента квекадур DM 70. Затем образцы отжимали, сушили до влажности 8-10% и термообрабатывали при температуре 150±5ºС в течение 2 минут. Огнезащищенное волокно промывали дистиллированной воде с добавлением мягчителя с целью удаления избытка реагентов и подвергали сушке;

2-ой способ – отличается от 1-го тем, что образцы кондиционного $ПАН_{конд.}$ – волокна предварительно обработали ВЧЕ плазмой пониженного давления;

3-ий способ – инклюдации, который отличается от 1-го способа тем, что модификации подвергали свежесформованное (гель) $ПАН_{гель}$ - волокно, с развитой пористой внутренней структурой и хорошей сорбционной способностью [2].

4-ый способ - отличается от 3-го тем, что сушку модифицированного $ПАН_{гель}$ волокна осуществляли потоком ВЧЕ плазмы пониженного давления.

Известно [8], что обработка материалов ВЧЕ плазмой способствует образованию полярных групп в его структуре, изменению морфологической структуры и очистке поверхности от различного рода загрязнений. При этом температура обработки не превышает 70ºС, что позволяет проводить модификацию без изменения их первоначальных свойств. Кроме того, плазменная обработка не изменяет молекулярное строение материала, не ухудшает свойств, а улучшает смачиваемость и сорбционную способность волокон. Поэтому представляло интерес применение данной технологии в огнезащитной модификации текстильных материалов.

Обработку образцов ВЧЕ плазмой пониженного давления проводили при давлении в разрядной камере P=21.5 Па; расходе газа G= 0.04 г/с, напряжении W_p=1.5 кВт, силе тока лампы анода I_a =0.5А и напряжении на аноде W_a=4.5кВ. Модификацию проводили в плазме воздуха на высокочастотной емкостной плазменной установки «ВАТТ 4000 ПТ ПЛАЗМА» КНИТУ. Кислородный индекс определяли по ГОСТ 12.1.044-89 на приборе Stenton Recfor (Австралия), физико-механические свойства по стандартным методикам.

Исследования показали (таблица 1), что с увеличением концентрации афламмита KWB в пропиточном растворе с 10% (образцы №3-6) до 20% (образцы №7-10), его содержание в структуре волокна возрастает на 20-30%.

Повышение концентрации афламмита KWB в модифицирующем растворе до 30%, дает незначительный (2-5%) привес ЗГ на волокне, что свидетельствует о неэффективности использования 30% раствора.

Таблица 1 - Свойства ПАН волокон, модифицированных разными способами.

№ образца	Состав образцов, % масс	Способ огнезащиты	P_o, сН/текс	ε_o, %	КИ, % об.	
					До стирки	После стирки
1	100 $ПАН_{конд.}$	исходное	27.9	35.0	19.5	19.5
2	100 $ПАН_{гель}$	исходное	21.4	49.0	19.5	19.5
Модификация 10% раствором ЗГ						
3	95.0 $ПАН_{конд}$, 5.0 афламмит KWB	1-плюсованием	24.4	34.5	24.5	21.5
4	91.1 $ПАН_{конд}$, 8.9 афламмит KWB	2 - ВЧЕ плазма, плюсованием	27.6	31.5	28.0	27.5
5	90.9 $ПАН_{гель}$, 9.1 афламмит KWB	3-инклюдацией	20.0	43.3	27.5	27.0
6	87.6 $ПАН_{гель}$, 12.4 афламмит KWB	4-инклюдацией, ВЧЕ плазмой	21.3	42.8	30.5	30.0
Модификация 20% раствором ЗГ						
7	93.9 $ПАН_{конд}$, 6.1 афламмит KWB	1-плюсованием	21.7	34.1	26.5	23.5
8	91.2 $ПАН_{конд.}$, 9.8 афламмит KWB	2 - ВЧЕ плазма, плюсованием	27.3	33.0	29.0	28.0
9	89.0 $ПАН_{гель}$, 11.0 афламмит KWB	3-инклюдацией	19.2	43.5	29.5	28.5
10	84.0 $ПАН_{гель}$, 16.0 афламмит KWB	4-инклюдацией, ВЧЕ плазмой	20.7	42.5	32.5	31.3

Примечания: P_o – относительная разрывная нагрузка, ε_o - относительное разрывное удлинение, КИ - кислородный индекс. Коэффициент вариации по прочности не превышает 4.8%, удлинению – 6.2%.

Модификация $ПАН_{конд}$ волокна 1-ым способом - плюсованием является поверхностной и неэффективной, о чем свидетельствует низкое значение кислородного индекса после 5 кратной стирки, не более 23.5% (таблица 1, образцы №3 и 7), относительная разрывная нагрузка нитей снижается на 12-22%.

Модификация $ПАН_{конд}$ волокна по 2-ому способу с его предварительной обработкой образцов ВЧЕ плазмой пониженного давления является более эффективной. Привес замедлителя горения на волокне возрастает на 60-78% (таблица 1, образцы №4 и 8) по сравнению с модификацией по первому способу. Кислородный индекс после 5-ти кратной стирки высокий 27.5-28%, прочность при растяжении снижается незначительно - на 1.5-2%, относительное удлинение - на 7%.

Модификация 3-им способом – инклюдацией, то есть огнезащитной пропиткой свежесформованного $ПАН_{гель}$ волокна, является более эффективной по сравнению с первым способом и сопоставима по эффективности огнезащитного эффекта со вторым способом. Кислородный индекс достигает 27-28.5%, относительная разрывная нагрузка нитей снижается на 6.5-10.5% (таблица 1, образцы №5 и 9).

Модификация 4-ым способом – огнезащитной пропиткой свежесформованного $ПАН_{гель}$ волокна и последующей сушкой потоком ВЧЕ плазмы пониженного давления является самым эффективным способом по сравнению с предыдущими. Кислородный индекс после пятикратной стирки остается высоким 30.0-31.3%, относительная разрывная нагрузка нитей снижается незначительно на 0.5-3.3% (таблица 1, образцы №6 и 10).

Сохранение прочности нитей, модифицированных с применением ВЧЕ плазмы пониженного давления, обусловлено возрастанием однородности и уменьшением дефектности структуры ПАН волокна, о чем свидетельствуют данные микроскопии (рисунок 1, *а* и *б*), полученные на приборе LEXT 3D measuring laser microscope JLS 4100.

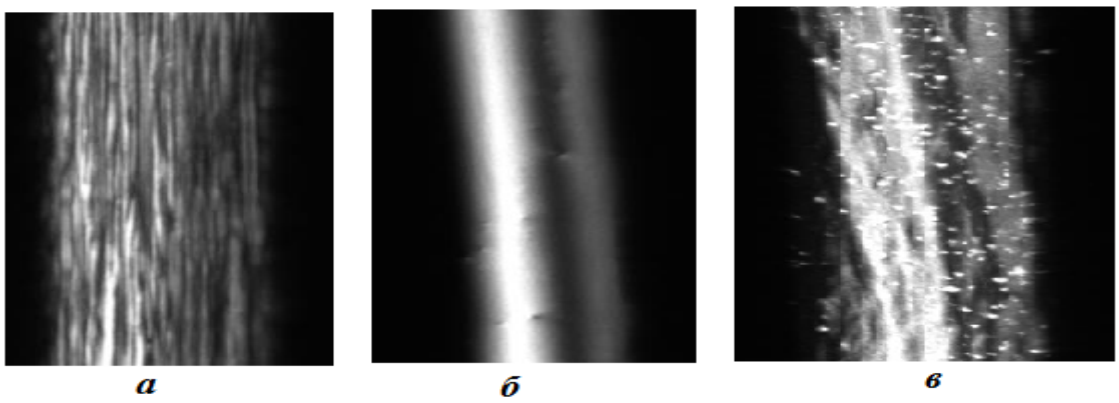


Рисунок 1 – Данные микроскопии ПАН волокон: *а* – $ПАН_{конд}$ исходное; *б* - $ПАН_{конд}$ обработанное ВЧЕ плазмой и модифицированное афламмитом KWB (2-ой способ); *в* -$ПАН_{гель}$ модифицированное афламмитом KWB и обработки ВЧЕ плазмой пониженного давления (4-ый способ). (увеличение 2128)

Высокая эффективность четвертого способа обусловлена тем, что афламмит KWB сорбируется всем пористым объемом $ПАН_{гель}$ волокна и после обработки ВЧЕ плазмой пониженного давления до полного высыхания надежно в нем фиксируется, о чем свидетельствуют данные микроскопии (рисунок 1, *в*).

Исследование влияния способа модификации на процесс пиролиза ПАН волокна осуществляли на приборе «Дериватограф Q-1500Д». Образцы массой 0,2 г и 0,01 г нагревали в среде воздуха до 1000°С с постоянной скоростью нагрева – 10°С / мин. Чувствительность по каналам ДТГ – 1mv; ТГ – 500 μv; ДТА – 500 μv. Ошибка измерений 0,1 %.

По данным DTA температура начала разложения ПАН волокна модифицированного афламмитом KWB незначительно возрастает (на 8-10°С) (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние условий огнезащитной модификации ПАН-волокон на процесс пиролиза (данные DTG, TG)

Состав образца, % масс	Температура деструкции, °С, $\frac{T_н - T_к}{T_{макс}}$	$\frac{\Delta m,\ \%,}{V_{ср},}$ мг/мин	Потери массы, % масс., при температуре, °С							
			200	300	400	500	600	700	800	900
ПАН волокно исходное	210-265 240	18 3.6	2	21	29	38	60	80	94.5	98
афламмит KWB исходный	168-430 271, 365	38 2.91	25	40	58	63	65	77	84	84
$ПАН_{гель}$, 11 KWB (образец 9)	218-270 250	15 3	4.5 4.53	20 23.1	27 32.2	34 40.1	46 60.6	61 79.7	81 93.3	86.5 96.5
$ПАН_{гель}$, 16 KWB (образец 10)	220-278 251	9 1.7	5.6 5.7	18 24	24 33.6	32 42	42 60.8	60 79.5	80 92.8	85 95.7

Примечания: в числителе фактические потери массы, в знаменателе расчетные, полученные на основе аддитивности свойств ПАН волокна и афламмита KWB

Образование карбонизованного остатка возрастает и образовавшийся кокс более термостоек, так как потери массы при температурах выше 500 °С у модифицированных волокон меньше. Снижается скорость реакции разложения, и фактические потери массы меньше расчетных, полученных на основе аддитивности свойств компонентов. Выявленные особенности процесса пиролиза обусловлены взаимодействием афламмита KWB с волокнообразующим полимером, и его влиянием на термические превращения, приводящие к карбонизации огнезащищенного ПАН волокна.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена высокая эффективность огнезащитной модификации полиакрилонитрильного волокна способом инклюдации под воздействием ВЧЕ плазмы пониженного давления. Кислородный индекс образцов из ПАН волокна возрастает до 30-31%об и устойчив к многократным стиркам.

Установлено влияние замедлителя горения афламмит KWB на термические превращения, приводящие к усилению процессов циклизации и дегидрирования, и как следствие карбонизации огнезащищенного ПАН волокна, что способствует снижению его горючести.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Перепелкин К. Е.* Принципы и методы модифицирования волокон и волокнистых материалов // Хим. волокна. - 2005. - №2. - С. 37-51.

2. *Бесшапошникова В.И.* Огнезащитная модификация полиакрилонитрильных волокнистых материалов // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология.- Том 56, Вып.1, 2013. С.95-99.

3. *Chen S., Zheng Q.-K., Ye G.-D., Zheng G.-K.* Fire-Retardant Properties of the Viscose Rayon Containing Alkoxycyclotriphosphazene // Journal of Applied Polymer Science. – 2006. – Vol. 102. - P. 698-702.

4. *Зубкова Н.С., Бутылкина Н.Г., Гальбрайх Л.С.* Принципы выбора замедлителей горения для снижения пожарной опасности гетероцепных волокнообразующих полимеров // Химические волокна. 1999. № 4.- С. 17-21.

5. *Besshaposhnikova V.I., Mikryukova O.N., Gal'braikh L.S.* Influence of Aflammit KWB on the Process of Pyrolysis and the Properties of Cellulose Fabrics // Fibre Chemistry, 2017, V. 49, Issue 4.- pp. 246–250.

6. *Бесшапошникова В. И.* Научные основы и инновационные технологии огнезащиты текстильных материалов : Монография, РИО РГУ им. А.Н. Косыгина, 2018. – 188 с. https://elibrary.ru/item.asp?id=36270318

7. *Бесшапошникова В.И. Артеменко С.Е., Панова Л.Г., Куликова Т.В., Гришина О.А., Штейнле В.А., Загоруйко М.В.* Огнезащитная модификация синтетических материалов под воздействием лазерного излучения // Химические волокна. 2008. - № 1.- С. 48-52.

8. *Сафина Л.А., Хамматова В.В., Тухбатуллина Л.М.* Влияние плазменной обработки материалов на эксплуатационные свойства одежды специального назначения / Вестник технологического университета. 2016, т.19, в.12. - С.110-113.

УДК 677.027 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-235-238

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТДЕЛКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ADVANCED FINISH TECHNOLOGIES TEXTILE MATERIALS

Козлова Ольга Витальевна, Зимнуров Анвар Русланович, Одинцова Ольга Ивановна
Olga V.Kozlova, Anvar R.Zimnurov, Olga I. Odintsova

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, г. Иваново
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail: ovk-56@mail.ru, odolga@yandex.ru

Аннотация. В работе отражены проблемы колорирования и описаны перспективные пути решения задач в области отделки параарамидных тканей. Представлены теоретические и практические аспекты получения и применения пигментно-полимерных композиций для колорирования параарамидных тканей. Показана положительная роль предварительной плазмохимической обработки на качественные характеристики получаемых окрасок.

Abstract: The paper reflects the problems of coloring and describes promising ways to solve problems in the field of finishing para-aramid fabrics. Theoretical and practical aspects of the preparation and use of pigment-polymer compositions for the para-aramid tissues kolorirovaniya are presented. The positive role of the preliminary plasma-chemical treatment on the qualitative characteristics of the resulting colors is shown.

Ключевые слова: параарамидные ткани, пигментное колорирование, плазма тлеющего разряда, акриловые и уретановые полимеры.

Keywords: para-aramid fabrics, pigment coloring, glow discharge plasma, acrylic and urethane polymers

Появление параарамида – волокна нового поколения с уникальными свойствами негорючести, высокой прочности, термостойкости, открывает широкие возможности для создания материалов и одежды с комплексом защитных свойств (от огня, высокой температуры, теплового излучения и др. воздействий) и в полной мере отвечающих требованиям охраны и безопасности объектов, оборудования, а также целой категории рабочих и служащих.

Внедрение наукоемких технологий, позволяющих производить материалы нового поколения, в том числе создание технологий облагораживания тканей из высокопрочных огнестойких арамидных волокон и получение инновационного текстиля с комплексом функциональных свойств представляется перспективным.

Специфические свойства арамида такие, как неоднородность структуры и наличие естественной цветности, затрудняют получение колористических эффектов различной цветовой гаммы [1], особенно в глубокие темные тона, а, следовательно, сдерживают применение арамидсодержащих волокнистых материалов.

Одним из методов химической модификации текстильных волокон и материалов, позволяющим повысить восприимчивость поверхности волокон к красящим веществам, является обработка их полимерами-модификаторами различной природы. Как показано учеными [2] применение метода поверхностной модификации дает возможность решить проблему колорирования трудноокрашиваемых материалов из синтетических волокон, в том числе и из арамидных.

Ранее проведенные на кафедре исследования [3] позволили выработать научные подходы к разработке технологий прочного окрашивания параарамидных тканей, основанных на использовании пигментно-полимерных композиций и специальных добавок, улучшающих

качественные показатели окрасок. Важная роль при этом отводилась так называемым отвердителям-сшивателям, вводимым в состав красильных композиций, которые в силу своих специфических свойств способны образовывать с полимерными связующими пространственно-сшитые структуры и улучшать тем самым устойчивость окрасок к трению. Установлено, что лучшим сшивателем является бесформальдегидный предконденсат термореактивной смолы Отексид - Д2, а связующим – термореактивный акриловый полимер Рузин-14и. Варьирование концентраций акрилового полимера и термореактивной смолы позволило определить оптимальные их соотношения, при которых достигнуты высокие результаты колорирования в глубокий черный цвет и хорошая устойчивость окрасок к истиранию. Показатель, характеризующий интенсивность окраски, k|s повышается на 5-7%.

Кроме того, при колорировании параарамидной ткани большое значение имеет такая характеристика, как истирание окраски при трении по поверхности ткани твердым предметом. Это выражается в ослаблении окраски в местах трения и образовании белесых полос.

Установлено, что при введении в пигментно-полимерную композицию минеральных добавок улучшается прочность окраски к вытиранию.

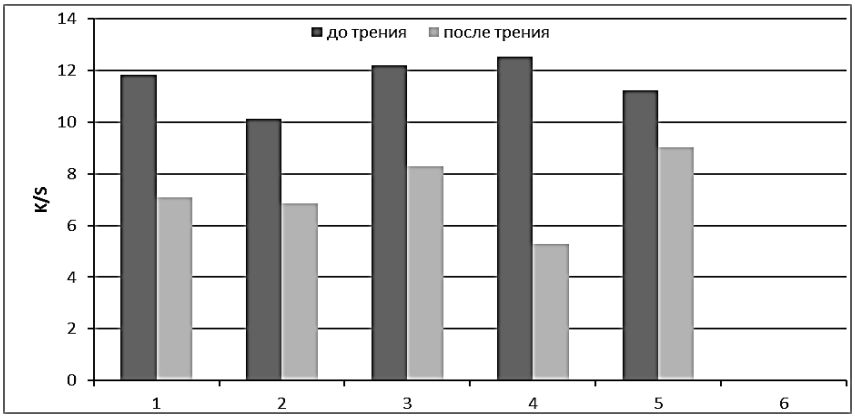


Рисунок 1 – Влияние минеральных добавок в красильную композицию на основе Рузина 33. Варианты композиций: 1-без добавок; 2-каолин (10г/л); 3-диатомит (10г/л); 4-маршалит (10г/л); 5-каолиновая паста (50г/л).

На диаграмме (рис.1) показано влияние минеральных добавок в красильную композицию на основе Рузина-33 на результаты крашения параарамидной ткани имероном черным. Анализ полученных данных показал, что введение добавок несколько снижает интенсивность окраски, но улучшает прочность ее к вытиранию. Максимальный эффект упрочнения окраски наблюдается при использовании в составе композиции каолиновой пасты.

Положительным результатом в разработках этого направления, особенно при реализации крашения в глубокие черные тона, явился факт значительного улучшения прочностных показателей окрасок к трению и вытиранию за счет предварительной плазмохимической модификации тканей. Кратковременная обработка ткани низкотемпературной плазмой на основе O_2 или Ar перед ее окрашиванием позволяет добиться увеличения интенсивности окрасок (рис.2) с 22 до 29 ед k/s. При этом и прочность окраски увеличивается значительно.

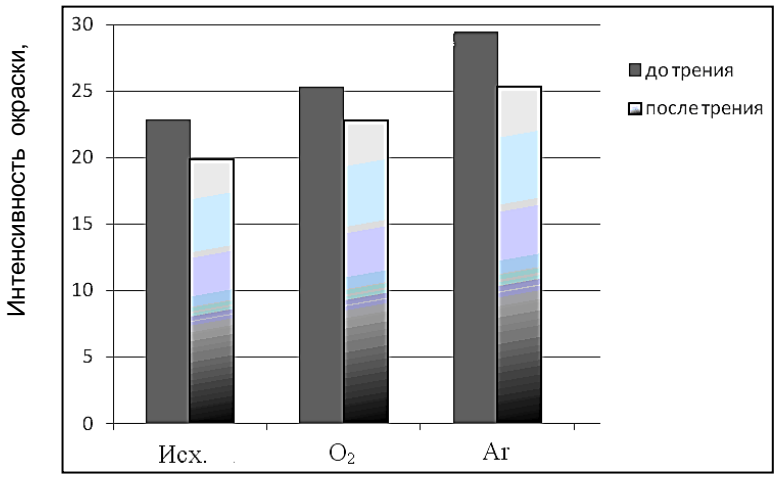


Рисунок 2 –Влияние плазмохимической обработки ткани на интенсивность окраски.

Таким образом, разработана эффективная технология пигментного крашения параарамидных тканей в глубокие черные тона при использовании отечественных акриловых полимеров. Наиболее эффективным и по технологическим показателям и по экономическим соображениям является Рузин 14и. Композиция включает пигмент черный, Рузин-14и, Отексид-Д2, катализатор и каолиновую пасту. Перед крашением ткань подвергается плазмохимической обработке.

Перспективным направлением научных исследований кафедры ХТВМ явилось создание дублированных и многослойных материалов, в том числе с мембранными свойствами. В индустрии производства одежды для активного отдыха и работы в экстремальных условиях большое значение имеет высокая способность материала к транспорту водяного пара, что позволяет избежать пользователю перегрева и при этом оставаться сухим.

Основная задача при создании мембраны – выбор полимерной композиции, на основе которой возможно получить пленку, имеющую достаточную паропроницаемость для отвода паров воды от тела человека для обеспечения комфортного пребывания в такой одежде длительное время [5-6]. Определённой паропроницаемостью обладают все использующиеся сегодня ткани и утеплители. Однако в численном выражении она представлена только для описания свойств мембран, применяющихся в производстве одежды, и для очень малого количества не водонепроницаемых текстильных материалов.

Показатель паропроницаемости измеряют в г/м²/24 часа, т.е. количество водяного пара, которое пройдёт через квадратный метр материала за сутки. Обозначается этот параметр аббревиатурой MVTR (*«moisture vapor transmission rate« или «скорость прохождения водяного пара»*).

С целью улучшения физико-механических и других свойств полимеров и сополимеров широко используются методы, основанные на включении в их состав различных добавок из числа наноразмерных частиц графита, металлов, их оксидов, сульфидов, глин и др. нами изучены свойства наполненных полимеров в зависимости от характера распределения наполнителей, а также природы взаимодействия на границе раздела полимер-наполнитель. При использовании минеральных наполнителей в результате взаимодействия их с полимерной матрицей уменьшается подвижность макромолекул в системе, что существенно отражается на свойствах материала.

Исследовано влияние вводимых в полимерный субстрат минеральных наполнителей, которые являются известными сорбентами на показатель паропроницаемости текстильных материалов. В данной работе были использованы минеральные добавки: САС, каолин, доломит, маршалит, диатомит, оксид графена с размером частиц 0,09мм.

Полученные в работе показатели паропроницаемости дублированного композита с использованием в качестве клеевого слоя полимерной композиции на основе акрилового сополимера и включающей оксид графена в различных количествах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ образца	Количество оксида графена (2 г/л) в полимере, % от массы полимера	Показатель паропроницаемости, MVTR (г/м²)
1	-	191
2	10	340,5
3	30	1125,0

Используя различное количество вводимого сорбента в полимерную матрицу (табл.1), можно изменять в сторону увеличения показатель паропроницаемости, что позволяет прогнозировать заранее требуемые свойства материалов. Увеличение минерального компонента с 10 до 30% приводит к повышению показателя MVTR со 191 г/м^2 до 1125 г/м^2, что соответствует требованиям для паропроницаемых тканей.

Таким образом, показано, что введение оксида графена в качестве добавки к полимерной матрице позволяет повысить паропроницаемость композита, а дальнейшая оптимизация технологии позволит создать структуру, отвечающую требованиям «дышащих» мембран, а следовательно, и дублированных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дянкова, Т. Ю. Применение алкилфосфатов натрия в составах для окрашивания арамидных нитей /Т.Ю. Дянкова, Н.В. Дащенко, А.П. Михайловская // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2008. - N 4 (309). - С. 56-59.

2. Kozlova, O.V. Dyeing of Para-Aramid Fabrics in the Presence of Domestic Urethane Polymers /O.V.Kozlova, O.I.Odintsova, E.V.Melenchyk, A.S.Fedorinov//Russian Journal of General Chemistry, 2016, Vol. 86, No. 2, 488-491

3. Козлова, О.В. Использование полимеров-модификаторов при колорировании параарамидных тканей / О.В.Козлова, Е.В. Меленчук // Изв. Вузов. «Химия и химическая технология», 2013, т. 56, вып.8, стр.90-93

4. Сперлинг Л. Взаимопроникающие полимерные сетки и аналогичные материалы / Пер. с англ. М.: Мир, 1984

5. Фатхутдинов Р.Х. Защитные композиционные мембранные материалы на основе отечественных полимеров / Р.Х. Фатхутдинов, В.В. Гайдай, О.Ю. Миронова, Д.П. Шалыминова, А.С. Ковальчук, И.Ш. Абдуллин, И.Ф. Сайфутдинова // Журнал нанотехнологии и охрана здоровья. – 2012. - № 4. – С. 26-33.

6. Сайфутдинова, И.Ф. Текстильный материал с мембранным слоем / И. Ф. Сайфутдинова, И. Ш. Абдуллин, Р. А. Мифтахова Вестник Казанского технологического университета. – 2014. - С.84-86.

УДК 66.048.625; 66.048.3-932.4; 66.048.3.069.833 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-239-241

ВЫДЕЛЕНИЕ ФТОРОРГАНИЧЕСКИХ СПИРТОВ ИЗ АЗЕОТРОПНЫХ СМЕСЕЙ С НЕФТОРИРОВАННЫМИ СПИРТАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКСТРАКТИВНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ
PURIFICATION OF ORGANIC FLUORINE ALCOHOLS FROM AZEOTROPIC MIXTURES WITH NON-FLUORINATED ALCOHOLS USING EXTRACTIVE DISTILLATION

Лупачев Егор Владимирович, Полковниченко Андрей Владимирович, Николай Николаевич Кулов
Egor V. Lupachev, Andrei V. Polkovnichenko, Nikolai N. Kulov

Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Россия, Москва
Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow
(e-mail:egorlu91@gmail.com; lupachevev@igic.ras.ru; anzakhlevniy@rambler.ru; kulov@igic.ras.ru)

Аннотация: Экспериментально изучен процесс разделения азеотропной смеси 2,2,2-трифторэтанол – изопропанол на насадочной колонне экстрактивной дистилляции периодического действия с применением в качестве разделяющего агента N-метилпирролидона. Показано, что применение такого метода разделения позволяет устранить ограничения, накладываемые азеотропом, и получить 2,2,2-трифторэтанол чистотой более 0,99 мольных долей.

Abstract: The extractive distillation process of 2,2,2-trifluoroethanol – isopropanol azeotropic mixture using N-methyl-2-pyrrolidone as a separating agent has been experimentally studied. The experiments were carried out on a batch column with regular packing. The results are shown that using this separating agent makes it possible to eliminate thermodynamic constraints imposed by binary azeotrope and to recover 2,2,2-trifluoroethanol with a purity of more than 0,99.

Ключевые слова: 2,2,2-трифторэтанол, N-метилпирролидон, экстрактивная дистилляция.

Keywords: 2,2,2-trifluoroethanol, N-methyl-2-pyrrolidone, extractive distillation.

Одним из промышленных способов производства фторированных спиртов типа CF_3-$(CF_2)_n$-CH_2-OH является гидрирование эфира соответствующей фторорганической кислоты [1]. В результате синтеза образуется смесь, состоящая из фторированного и нефторированного спиртов и побочных соединений. Для выделения неорганических продуктов реакции смесь разбавляют водой, в результате чего образуется две несмешивающиеся фазы**:** водная и органическая. После отделения водной фазы, оставшаяся органическая фаза содержит фторированный спирт, воду и нефторированный спирт. Следующая стадия очистки, предполагает выделение из образованной смеси фторорганического спирта требуемой чистоты. Однако, технологические аспекты разделения таких систем в научной литературе освещены не в полной мере.

Как показано в работе [2] системы 2,2,2-трифторэтанол – метанол, 2,2,2-трифторэтанол – этанол, 2,2,2-трифторэтанол – изопропанол имеют азеотроп с максимумом температуры кипения. Наличие азеотропа накладывает термодинамические ограничения на разделение промышленной смеси 2,2,2-трифторэтанол – спирт – вода. Это, в свою очередь, приводит к необходимости использовать сложные схемы разделения. В настоящее время применяется химический метод выделения 2,2,2-трифторэтанола. На первой стадии разделяемую смесь обрабатывают сухой щелочью, в результате чего 2,2,2-трифторэтанол преимущественно переходит в алкоголят. Из полученной смеси, с помощью ректификации, выделяют

нефторированный спирт с водой. Далее, сухой алклголят переводят обратно в спирт, добавляя к нему кислоту. Из полученной смеси путем ректификации отделяют товарный 2,2,2-трифторэтанол. Нами была предпринята попытка интенсификации процесса разделения смеси 2,2,2-трифторэтанол – спирт – вода, заменив многостадийную схему процессом экстрактивной дистилляции.

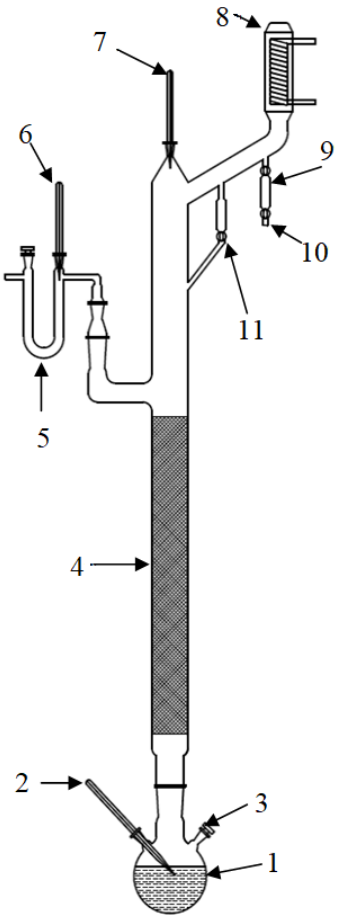


Рисунок 1 – Ректификационная колонна экстрактивной дистилляции.
1 – куб,
2, 6, 7 – ртутные термометры,
3 – точка отбора проб кубовой жидкости, 4 – насадочная секция,
5 – U-образная трубка,
8 – холодильник-дефлегматор,
9 – счетчик капель дистиллята,
10 – точка отбора проб дистиллята,
11 – счетчик капель флегмы.

В настоящей работе для разделения бинарной подсистемы 2,2,2-трифторэтанол – изопропанол был использован совмещенный процесс экстрактивной дистилляции. Изучение влияния таких разделяющих агентов (РА) как диметилсульфоксид и N-метилпирролидон на относительную летучесть системы 2,2,2-трифторэтанол – изопропанол, позволило установить, что при концентрации РА 0,5 мольных долей система 2,2,2-трифторэтанол – изопропанол становиться зеотропной, а изопропанол оказывается легкокипящим компонентом во всем диапазоне концентраций [3].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование разделения бинарной смеси 2,2,2-трифторэтанол – изопропанол в периодическом процессе экстрактивной дистилляции. В качестве разделяющего агента использовали N-метилпирролидон.

Исследования проводили на насадочной колонне периодического действия, схема которой представлена на рис.1.

В качестве массообменного устройства использовали спирально-призматическую насадку из нержавеющей стали размером 3×3×0,2 мм. Эффективность колонны была оценена на смеси четыреххлористый углерод – бензол и составила 7,5 теоретических ступеней разделения. Колонна оснащена узлом подачи РА, состоящего из U-образной трубки, снабженной обмоткой электрообогрева, и дозирующего насоса. Расход РА регулируется насосом. Температура РА, подаваемого в колонну, регулируется автотрансформатором подключенным к обмотке электрообогрева на U-образной трубке. Точка подачи РА в колонну расположена над слоем насадки.

Экспериментальная методика

Разделяемую смесь эквимолярного состава загружали в куб колонны. Расход по колонне устанавливали равным 3,86 моль/ч. Работая в режиме полной флегмы, выводили колонну в стационарное состояние. Затем в колонну подавался РА с расходом равным расходу разделяемой жидкой фазы по колонне. После достижения в верхнем сечении колонны температуры кипения изопропанола начинали отбор дистиллята. В течение эксперимента через выбранные промежутки времени производили отбор проб дистиллята и кубовой жидкости. Изменение концентраций в дистилляте и кубе колонны представлены на рис. 2.

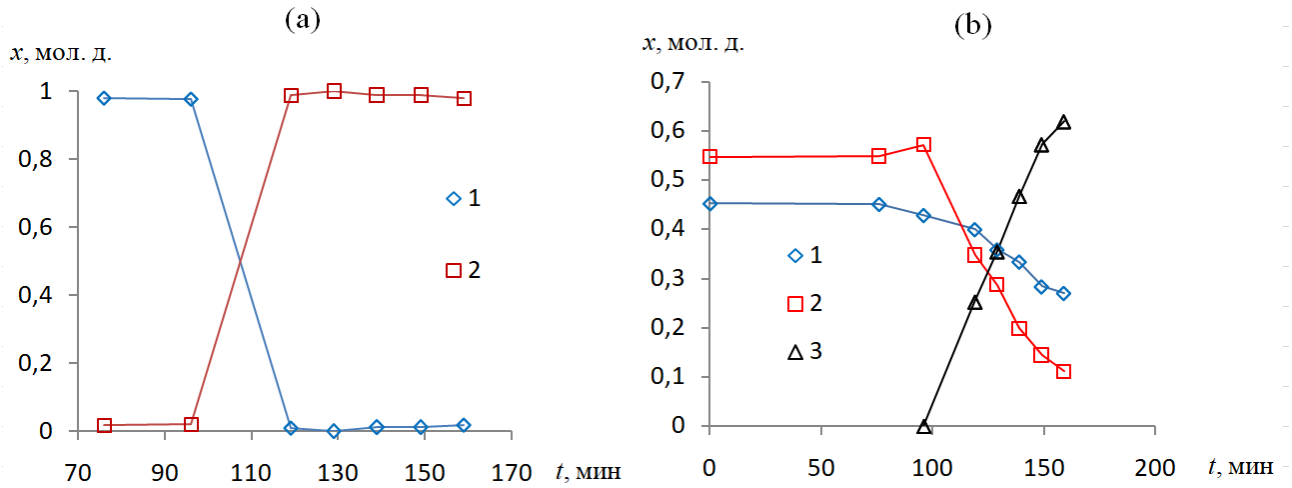


Рисунок 2 – Зависимость составов дистиллята (a) и кубовой жидкости (b) от времени эксперимента. 1 – 2,2,2-трифторэтанол, 2–изопропанол, 3- N-метилпирролидон.

Как видно из рис.2, в начале эксперимента вверху колонны концентрируется 2,2,2-трифторэтанол, достигая концентрации более 0,98 мол. д. После начала подачи РА профиль по колонне изменяется, дистиллят начинает обогащаться по изопропанолу, и через 20-30 мин вверху колонны достигается концентрация изопропанола более 0,99 мол. д., что согласуется с данными о парожидкостном равновесии системы 2,2,2-трифторэтанол – изопропанол – N-метилпирролидон [3]. После установления в дистилляте температуры кипения изопропанола начинали отбор дистиллята. Флегмовое число составляло R=3. Отбор продолжали до достижения вверху колонны температуры кипения чистого 2,2,2-трифторэтанол. Затем подача РА прекращалась, и отгонялся чистый 2,2,2-трифторэтанол.

Выводы

Используя процесс экстракивной дистилляции, с N-метилпирролидоном в качестве РА, удалось эффективно разделить азеотропную смесь 2,2,2-трифторэтанол – изопропанол в одном аппарате. В виде дистиллята были последовательно отобраны фракции изопропанола и 2,2,2-трифторэтанола чистотой более 0,99 мольных долей каждый. Показано, что мольное соотношения потоков разделяемой смеси и разделяющего агента равное 1:1 достаточно для разделения смеси на колонне эффективностью в 7,5 теоретических ступеней разделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry V.15. Siegemund G., Schwertfeger W., Feiring A., Smart D., Behr F., Vogel H., McKusick B. Fluorine Compounds, Organic. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2012.

2. Lupachev E.V., Polkovnichenko A. V., Kvashnin S. Y., Lotkhov V. A., Kulov N. N. Investigation of the Phase Equilibrium in Ternary Systems Formed by 2,2,2-Trifluoroethanol, Water, and Organic Alcohols // Theor. Found. Chem. Eng., 2019. V. 53, №. 3, P. 333–345, https://doi.org/10.1134/S0040579519030060.

3. Polkovnichenko A. V., Lupachev E.V., Voshkin A. A., Kulov N. N. Effect of Sulfolane, Dimethyl Sulfoxide, and N -Methyl-2-pyrrolidone on Relative Volatility of a 2,2,2-Trifluoroethanol–Isopropanol Azeotropic System // J. Chem. Eng. Data. 2021. V. 66, № 3. P. 1238–1248, https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00790

УДК 535.5.1 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-242-246

ВЛИЯНИЕ ТИПА КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ГЛУБИНУ ОХЛАЖДЕНИЯ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ В ГРАДИРНЕ

EFFECT OF THE TYPE OF CONTACT UNIT FOR GEOMETRIC CHARACTERISTICS AND APPROACH OF RECYCLED WATER IN THE COOLING TOWER.

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

Московский политехнический университет, Россия, Москва
Moscow Polytechnic University, Russia, Moscow
(e-mail: bagomedovmurad@mail.ru)

Аннотация: Представлены результаты анализа влияния конструкции пленочных и капельных оросителей на их геометрические характеристики и глубину охлаждения оборотной воды в градирне. Приведены расчетные зависимости. Показана перспективность решетчатых капельных оросителей.

Abstract: The results of the analysis of the influence of the design of film and drip sprinklers on their geometric characteristics and on the approach of circulating water in a cooling tower are presented. Calculated dependencies are given. The prospects of lattice drip sprinklers are shown.

Ключевые слова: градирня; охлаждение оборотной воды; оросители капельного и пленочного типа; геометрические характеристики насадок.

Keywords: cooling tower; cooling of circulating water; drip and film sprinklers; geometric characteristics of the nozzles.

Используемые в градирнях контактные устройства обычно выполняются в виде регулярных структурированных насадок из полимерных материалов [1]. Наряду с этим часто используются решетчатые регулярные насадки, также выполненные из полимерных материалов [2].

В случае регулярных структурированных насадок в объеме оросителя реализуется пленочный режим течения охлажденной оборотной воды. При использовании решетчатых структур реализуется преимущественно струйно–капельный режим течения [3]. В этой связи представляет интерес анализ влияния типа оросителя (насадки) на его геометрические характеристики и глубину охлаждения оборотной воды в градирне. Рассмотрим эти вопросы на примере данных фирмы ООО «СПИГ-ВОСТОК» по пленочным и капельным оросителям [4]. Проектные данные этой фирмы по указанным двум типам оросителей представлены в таблицах 1 и 2. Геометрические характеристики регулярных насадок и их взаимовлияние друг на друга обсуждаются в работах [1,5]. Там же приведены расчетные соотношения для оценки основных геометрических характеристик этих насадок – удельной поверхности, порозности и величины эквивалентного диаметра канала слоя насадки.

Таблица 1 – Проектные данные по охлаждению оборотной воды в вентиляторных градирнях по данным фирмы ООО «СПИГ-ВОСТОК» [4].

Тип оросителя	Производительность градирни по охлаждаемой воде, $Q_ж$, $м^3/ч$	Проектные данные по охлаждению оборотной воды в оросителе градирни				Глубина охлаж. в оросителе на 1 м3/ч охлаж. воды $\Delta T/ Q_ж$
		Тем–ра воды на входе, Т, °С	Тем–ра воды на выходе, Т, °С	Глубина охлаж., ΔТ, °С	Тем-ра влаж. термометра, Т, °С	
FILM	13,333	37,8	23,9	13,9	12,0	0,00104
FILM	4,500	46,0	31,0	15,0	26,0	0,00333
SPLASH	3,300	54,0	34,0	20,0	30,0	0,00606
SPLASH	18,120	33,1	21,9	11,2	12,9	0,000618
FILM	14,700	29,6	21,0	8,6	12,0	0,000585
SPLASH	10,000	40,5	28,5	12,0	22,5	0,0012

Таблица 2 – Технические характеристики пленочных и капельных оросителей фирмы ООО «СПИГ- ВОСТОК» [4].

№ п/п	Тип оросителя	Материал	Высота гофра, $Н_г$, мм	Угол наклона гофр к горизонтальной плоскости, β	Толщина материалов элементов насадки δ, мм	Сухой удельный вес 1 $м^3$ слоя насадки ρ, $кг/м^3$.	Удельная поверхность слоя насадки а, $м^2/м^3$.
1	FILM X12	ПВХ/ ПП	12	60	0,26-0,4	32-48 (40)	240
2	FILM X20	ПВХ/ ПП	20	60	0,26-0,4	22-32 (27)	145
3	FILM Y20	ПВХ/ ПП	20	90/65	0,3-0,4	25-32 (28,5)	148
4	FILM LC40	ПВХ/ ПП	37	80	0,45	16,5	86
5	SPLASH Filling HP 600	ПП	-	90		0,35	3*
6	SPLASH Filing FUTURA	ПП	-	45		1,5	8*
7	SPLASH Filling STAR 12/20	ПП	-	90		11	52*

Примечания:

В скобках указаны средние значения величины ρ;

*Расчетные значения величин **а** для насадок капельного типа (*) определены по формуле (1) с учетом известной величины сухого удельного веса этих насадок ρ.*

Поскольку какие-либо сведения о величине удельной поверхности насадок капельного типа в рекламных материалах [4] отсутствуют, была построена графическая зависимость а=f(ρ) для полимерных регулярных насадок пленочного типа (см. рис. 1).

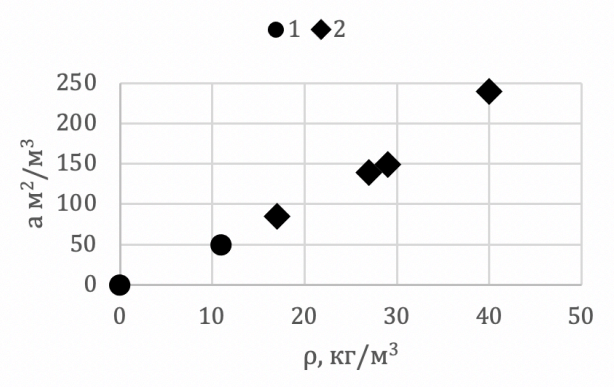


Рисунок 1 – Зависимость a=f(ρ) для полимерных регулярных насадок по данным таблицы 2: 1 – регулярные насадки пленочного типа; 2 – насадки капельного типа;

По этой зависимости исходя из гипотезы о пропорциональности величины удельной поверхности насадки ее удельному весу, при условии, что материал у всех рассматриваемых насадок одинаковый (ПВХ или ПП), могут быть определены величины удельной поверхности а и для регулярных насадок капельного типа. Соответствующая расчетная зависимость a=f(ρ) для рассматриваемых насадок имеет вид:

$$a = \beta * \rho^{k} \quad (1)$$

При построении этой зависимости по данным таблицы 2 для насадок пленочного типа принимались средние значение величины ρ. Рассчитанные по формуле (1) значения величины удельной поверхности для насадок капельного типа приведены в таблице 2.

Зависимость удельной поверхности а от высоты гофр – $H_г$ для регулярных насадок пленочного типа, построенная по данным таблицы 2 показана на рис. 2. Эту зависимость можно описать эмпирическим уравнением вида:

$$a = \beta * H_г^{m} \quad (2)$$

Здесь β – коэффициент, равный β=0,55; m – показатель степени, равный m=-1,43. Полученное выражение (2) практически совпадает с полученным ранее [1] уравнением для структурированных регулярных металлических и полимерных насадок.

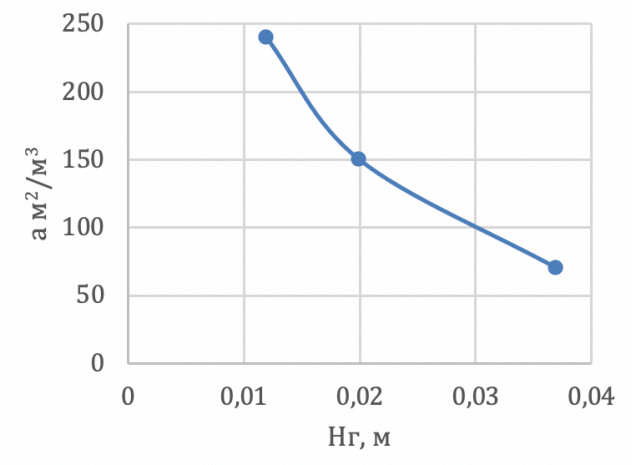


Рисунок 2 – Зависимость a=f($H_г$) для регулярных насадок пленочного типа по данным таблицы 2.

Другая важная геометрическая характеристика рассматриваемых насадок – эквивалентный диаметр канала d_e. В случае известной величины высоты гофр $H_г$ значение d_e может быть рассчитано по формуле работы [1] вида:

$$d_e = A * H_г + C \quad (3)$$

Здесь А – коэффициент, равный А=1,203; С – коэффициент, равный С=0,005

Что касается регулярных насадок капельного типа, то для оценки величины d_e при известной величине а можно воспользоваться формулой работы [5,6] вида:

$$d_e = E * a^n \quad (4)$$

Здесь Е – коэффициент, равный Е=57,32; n – показатель степени, равный n= – 1,3985

Формула (4) в работе [6] была получена на основе обобщения геометрических характеристик насыпных промышленных насадок, в объеме которых, как известно [7], реализуется преимущественно смешанный капельно-пленочный режим течения жидкой фазы. Это обстоятельство делает возможным использование формулы (4) для качественной оценки величины эквивалентного диаметра канала насадки для капельных контактных устройств.

Пи известных величинах d_e и **а** рассматриваемых насадок величину их порозности ε можно оценить по формуле:

$$\varepsilon = 0{,}25 * a * d_e \quad (5)$$

Зависимость глубины охлаждения оборотной воды – ΔТ от производительности градирни по охлажденной воде $Q_ж$ показана на рис. 3. Как это видно, с уменьшением производительности градирни по охлаждаемой воде от $Q_ж$=18 000 м^3/ч до $Q_ж$=3 000 м^3/ч глубина охлаждения возрастает от ΔТ=10^{o}С до ΔТ=20^{o}С.

Зависимость глубины охлаждения оборотной воды – ΔТ от удельного параметра ($\Delta T/Q_ж$) показана на рис. 4. Здесь заметна тенденция к увеличению глубины охлаждения оборотной воды с ростом величины параметра ($\Delta T/Q_ж$). Здесь параметр ($\Delta T/ Q_ж$) глубина охлаждения в расчете на V=1 м^3 оборотной воды.

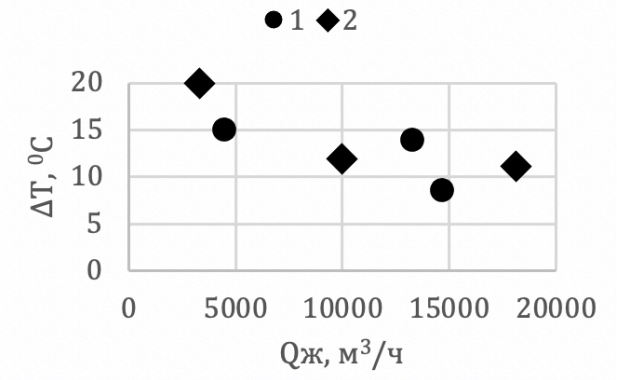


Рисунок 3 – Зависимость ΔТ=f($Q_ж$) для различных типов оросителя по данным таблицы 1: 1 – оросители пленочного типа FILM; 2– оросители капельного типа SPLASH.

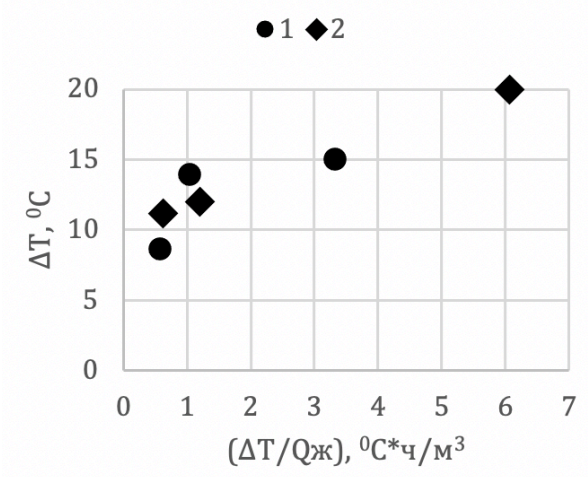


Рисунок 4 – Зависимость ΔТ=f ($\Delta T/ Q_ж$) для пленочных и капельных оросителей по данным таблицы 1: 1 – оросители пленочного типа FILM; 2 – оросители капельного типа SPLASH.

Анализ данных, приведенных в таблице 1,2 и на графиках рис. 3 и рис. 4 показывает, что оросители капельного типа SPLASH, выполненные из решетчатых элементов, несмотря на свою существенно меньшую величину удельной поверхности, при идентичных или близких плотностях орошения обеспечивают близкую, а в ряде случаев и несколько большую по сравнению с оросителями пленочного типа FILM глубину охлаждения. В целом, учитывая невысокое гидравлическое сопротивление [8], низкую материалоемкость, хорошее поперечное перемешивание взаимодействующих потоков и тепломассообменные характеристики капельных оросителей, следует признать объемные решетчатые оросители сравнительно конкурентоспособной конструкцией для современных вентиляторных градирен как секционных, так и малогабаритных, которые в последнее время получают все большее

распространение в промышленной практике гибких автоматизированных систем. Вместе с тем нельзя не отметить их сравнительно невысокую величину развиваемой поверхности контакта.

Представленные результаты анализа влияния типа контактного устройства на геометрические характеристики насадок и глубину охлаждения оборотной воды в градирне и предлагаемые расчетные зависимости могут быть использованы при реконструкции действующих секционных и малогабаритных вентиляторных градирен, а также при разработке перспективных конструкций насадок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Городилов А.А. Пушнов А.С., Беренгартен М.Г. Совершенствование конструкции хордовой насадки //Химическое и ефтегазовое машиностроение, 2014, №2, с.10-13.

2. Блок насадки градирни: патент 2182302 РФ: МПК F28F 25/08, F28C 1/100/ Буланов П.Ф., Ипатов В.Н., Пономаренко В.С., Сухов В.М.: Заявитель НПФ «Техэкопром», заявка №2000128899/06; заявл. 21.11.00; опубл. 10.05.02, №13

3. Баранова Е.Ю., Пушнов А.С., Платонова Н.А., Коровин П.И. Влияние пространственной ориентации элементов регулярной насадки в виде решетчатых призм на особенности растекания капель жидкости по ее поверхности //Энергосбережение и водоподготовка, 2016, №1 (99), с.29-40.

4. Http://www.spig-vostok.ru.

5. Новикова И.В., Пушнов А.С. О взаимовлиянии основных геометрических характеристик регулярных наадок. // Химическая техника, 2015, №4, с.21-23

6. Пушнов А., Каган А. Структура и газораспределение в колонных аппаратах с насадкой. Колонные аппараты с насадкой для осуществления тепло- и массообменных процессов. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG Saarbrücken, Germany, 2012, 160 p.

7. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов. Монография. Под ред. Лаптева А.Г. Казань: Отечество, 2013, 454с.

8. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. Справочное пособие / Под общей ред. В.С. Пономаренко. М.: Энергоиздат, 1998, 376 с.

УДК 62-97/-98 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-247-251

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЛИМИТИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РАБОТУ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ
ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF LIMITING FACTORS ON THE OPERATION OF HEAT PIPES

Бородина Елена Сергеевна, Тюрин Михаил Павлович, Домбровская Анастасия Игоревна
Elena S. Borodina, Mikhail P. Tyurin, Anastasia I. Dombrovskaya

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

Аннотация: В статье представлены результы обзора и анализа работ, направленных на изучение влияния лимитирующих факторов, таких как предел вязкости, звуковой предел, ограничение уноса, капиллярное ограничение, кризис кипения и др., на работу тепловых труб

Ключевые слова: тепловая труба, лимитирующие факторы, геометрические характеристики, режимные характеристики.

Abstract: The article presents the results of a review and analysis of works aimed at studying the influence of limiting factors, such as viscous limit, sonic limit, entrainment limit, capillary limit, boiling limit, etc., on the operation of heat pipes.

Keywords: heat pipe, limiting factors, geometric characteristics, operating characteristics.

Благодаря высокой эффективности и компактности тепловые трубы и в частности такие их разновидности, как закрытые двухфазные термосифоны (ЗДТ) находят широкое применение для переноса теплоты между отдельными теплоносителями. Однако на работу тепловых труб накладываются некоторые ограничения, которые необходимо учитывать при проектировании термосифонов.

Факторы, лимитирующие работу тепловых труб, представлены на рис. 1. К ним относятся: предел вязкости, звуковой предел, ограничение уноса, капиллярное ограничение, кризис кипения и др. Позиции и формы кривых зависят от материала фитиля, типа рабочей жидкости и геометрии тепловой трубы. Помимо приведённых факторов необходимо также учитывать и ограничение, связанное с уровнем рабочей жидкости.



Рисунок 1 – Ограничения теплопереноса в тепловой трубе [1].

Капиллярное ограничение. Для работы фитильной тепловой трубы максимальное капиллярное давление $\Delta P_{кmax}$ должно быть выше, чем общий перепад давления в трубе. Этот перепад давления складывается из трех компонентов: 1) перепад давления $\Delta P_ж$, необходимый для возвращения жидкости из конденсатора в испаритель, 2) перепад давления $\Delta P_п$, необходимый для течения пара из испарителя к конденсатору; 3) давление, обусловленное гравитационным напором ΔP_g, которое может быть равным 0, принимать положительные или отрицательные значения в зависимости от угла наклона тепловой трубы.

Для надлежащей работы тепловой трубы, необходимо выполнение условия:

$$\Delta P_{кmax} \geq \Delta P_ж + \Delta P_п + \Delta P_g \quad (1)$$

Если это условие не выполняется в испарительной части тепловой трубы, то фитиль будет высыхать. Максимальный возможный тепловой поток, при котором выполняется условие 1, носит название капиллярного ограничения. Как правило, капиллярное ограничение определяет максимальный тепловой поток на большей части рабочего диапазона.

Звуковой предел. В процессе пуска или при использовании в качестве рабочих жидкостей высокотемпературных жидких металлов, скорость пара может достигать значений скорости звука. Скорость звука накладывает ограничения на производительность тепловой трубы. Достигается состояние, которое носит название "запирание" канала тепловой трубы. При этом, если уменьшать температуру в зоне конденсации, то тепловая труба потеряет свойство изотермичности - по ее длине будет наблюдаться значительный градиент температур. При скоростях, приближающихся к скорости звука, необходимо учитывать сжимаемость пара при расчетах перепада давления пара.

Ограничение по вязкости или по давлению пара. Данное ограничение наиболее существенно в момент пуска. При низких температурах давление в испарителе крайне мало, и, т.к. давление в конденсаторе не может быть ниже нуля, максимальная разность давлений пара недостаточна для преодоления сил вязкости и гравитации, что препятствует нормальной работе тепловой трубы.

Ограничение уноса. При высоких тепловых потоках скорость пара неизбежно возрастает. Если эта скорость достаточна для уноса капель жидкости, возвращающейся из конденсатора в испаритель, производительность тепловой трубы будет падать, обуславливая наличие ограничения уноса.

Ограничение уноса исследовалось в работах [2, 3, 4]. В работе [3] приводится соотношение для максимального осевого массового потока пара, которое хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными:

$$Q_{max}/AL_m = f_1 f_2 f_3 (\rho')^{0.5}[g(\rho' - \rho'')\sigma_{ж}]^{0.25} \quad (2)$$

где А – площадь сечения парового потока; коэффициент f_1 – функция от числа Бонда, Bo; f_2 - от безразмерного параметра K_p; f_3 - функция от угла наклона термосифона.

Величина коэффициента f_1 является функцией числа Бонда, которое определяется из выражения:

$$Bo = D\frac{g(\rho' - \rho'')^{0.5}}{\rho'}. \quad (3)$$

График зависимости f_1 от числа Бонда приведен на рис. 2.

Коэффициент f_2 является функцией от безразмерного параметра K_p, определяемого по формуле:

$$K_p = \frac{P_п}{g(\rho' - \rho'')\sigma_ж^{0.5}},$$
$$f_2 = K_p^{-0.17} \text{ при } K_p \leq 4 \times 10^4, \quad (4)$$
$$f_2 = 0.165 \text{ при } K_p > 4 \times 10^4,$$

где $P_п$ – давление пара.

Коэффициент f_3 является функцией от угла наклона термосифона. Если термосифон расположен вертикально, $f_3 = 1$. Если аппарат расположен под наклоном, то значение коэффициента f_3 для различных значений числа Бонда Во может быть определено по графику, приведенному на рис. 3. Произведение f_1, f_2, f_3 носит название числа Кутателадзе.

Большинство экспериментальных данных по производительности термосифонов показывают, что максимальная теплопередающая способность имеет место, когда термосифон наклонен на 10° - 30° к вертикали.

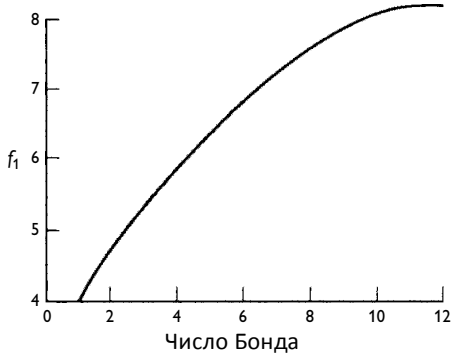


Рисунок 2. Зависимость коэффициента f_1 от числа Бонда.

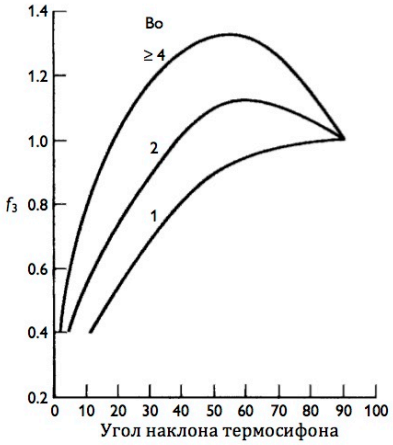


Рисунок 3. Зависимость коэффициента f_3 от угла наклона термосифона при различных числах Бонда

Кризис кипения. Радиальный тепловой поток в испарителе обеспечивается относительно небольшой разностью температур, до тех пор, пока не достигнуто критическое значение теплового потока, при котором слой пара покрывает поверхность испарителя. Наибольшую популярность получила гидродинамическая теория кризиса теплоотдачи при кипении, впервые разработанная С. С. Кутателадзе [5]. При докритичных значениях теплового потока имеет место пузырьковое кипение. При пузырьковом кипении паровая фаза возникает на отдельных микровпадинах поверхности нагрева (центрах парообразования). Возникающий зародыш парового пузырька растет вследствие тепломассообмена с окружающей жидкостью, достигает некоторого отрывного размера и всплывает. При этом над центрами парообразования возникают цепочки паровых пузырей и циркулирующие токи жидкой фазы. Основная часть поверхности нагрева омывается при этом жидкостью, пограничный слой которой интенсивно перемешивается движущимися паровыми пузырями. Вследствие этого интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении весьма велика и растет с увеличением скорости парообразования, пропорциональной плотности теплового потока.

При постепенном наращивании теплового потока, по достижении некоторого значения, пузырьковое кипение скачкообразно сменяется пленочным. При дальнейшем увеличении теплового потока существует устойчивое плёночное кипение. Переход к развитому пленочному кипению происходит вследствие нарушения устойчивости жидких пленок и струек, проникающих из основной массы жидкости к стенке через граничный слой. При пленочном кипении пар образует сплошной слой, отделяющий поверхность нагрева от массы жидкости. С поверхности этого слоя отделяются большие пузыри, уходящие в толщу жидкости. Из-за малой теплопроводности парового слоя интенсивность теплоотдачи при пленочном кипении многократно снижается по сравнению с пузырьковым.

Е. Никояма выяснил, что область интенсивного возрастания теплового потока с увеличением температурного напора связана с пузырьковым режимом кипения (область *а*), а область относительно медленного роста функции q(ΔT) связана с пленочным режимом кипения (область *в*). Между максимумом и минимумом этой функции лежит область перехода от одного режима кипения к другому (область *б*).

С.С. Кутателадзе первым объяснил эти эффекты как следствие гидродинамической неустойчивости двухфазного пограничного слоя [5, 6].

Согласно С.С. Кутателадзе, критерий устойчивости кипящего пограничного слоя в условиях свободной конвекции, определяется выражением:

$$\mathrm{Ku} = \frac{q_{\text{кр}}}{L\sqrt{\rho''}\sqrt[4]{g\sigma(\rho' - \rho'')}}, \quad (5)$$

где $q_{кр}$ – критическая плотность теплового потока, Вт/м^2; L – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; ρ′и ρ′′ – плотности жидкости и пара соответственно, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; σ –поверхностное натяжение, Н/м^2.

В общем случае критерий зависит от относительного размера паровых пузырей, вязкости жидкости и сжимаемости пара. На величину критического теплового потока влияют также свойства поверхности нагрева и ее состояние. Шероховатость поверхности нагрева может приводить к некоторому увеличению критического теплового потока.

Уровень залива рабочей жидкости. Исследованию влияния уровня заливаемой рабочей жидкости посвящен ряд работ [7-9]. Согласно [1], количество заливаемой рабочей жидкости ограничивается двумя соображениями: слишком малое количество заливаемой жидкости может привести к высыханию поверхности нагрева, в то время как чрезмерное количество жидкости может приводить к забрасыванию жидкости в конденсаторную часть термосифона и блокированию части поверхности конденсации. В [10] авторы рекомендуют, чтобы уровень залива рабочей жидкости был около 50% от испарительной секции термосифона и что объем жидкости должен быть связан с размерами термосифона следующим соотношением:

$$V_l > 0.001D(l_и + l_a + l_к), \quad (6)$$

где D – внутренний диаметр корпуса термосифона, $l_и$, l_a, $l_к$ – длины испарительного, адиабатного и конденсаторного участков термосифона.

В комплексной работе [11] исследовалось влияние уровня заполнения жидкостью на производительность термосифонов, содержащих различные парожидкостные разделители (чтобы минимизировать взаимодействие между этими компонентами). Было выявлено, что для нескольких рабочих жидкостей коэффициент заполнения имел довольно плоский оптимум между 20% и 80%. Также в данной работе была предложена формула для оценки минимума рабочей жидкости:

$$V = \left[\frac{4(L_c + L_e)}{5} + L_a\right] \times \sqrt[3]{\frac{3Q\mu_L(\pi D)^2}{(\rho_L)^2 g h_{fg}}} + \frac{\pi L_p D^2}{4} \quad (7)$$

где индексы c, e, a – относятся к конденсатору, испарителю и адиабатному участку соответственно; индексы L и p относятся, соответственно, к жидкости и бассейну жидкости; Q – количество подводимой теплоты, D – внутренний диаметр трубы, μ – абсолютная вязкость, h_{fg} – скрытая теплота парообразования, g – ускорение свободного падения.

Ограничения по заполнению для замкнутого двухфазного термосифона проиллюстрированы в [12]. Рабочая область возможного заполнения двухфазного закрытого термосифона показана на рисунке 4.

Для эффективной работы термосифона большое значение имеет правильный выбор рабочей жидкости, для быстрого сравнения при выборе рабочих жидкостей используется показатель «качества» жидкости M, определяемый для термосифона по формуле:

$$M = \left(\frac{r_ж \lambda_ж^3 \sigma_ж}{\mu_ж}\right)^{\frac{1}{4}}, \quad (9)$$

где $r_ж$ – теплота парообразования жидкости; $\lambda_ж$ – теплопроводность жидкости; $\sigma_ж$ – поверхностное натяжение жидкости; $\mu_ж$ – вязкость жидкости.

Оптимальная теплопроизводительность термосифона достигается при максимальном значении M.

Таким образом область эффективной работы тепловых труб ограничена рядом влияющих факторов, не учёт которых может привести не только к существенному снижению эффективности, но и полной неработоспособности самой тепловой трубы.

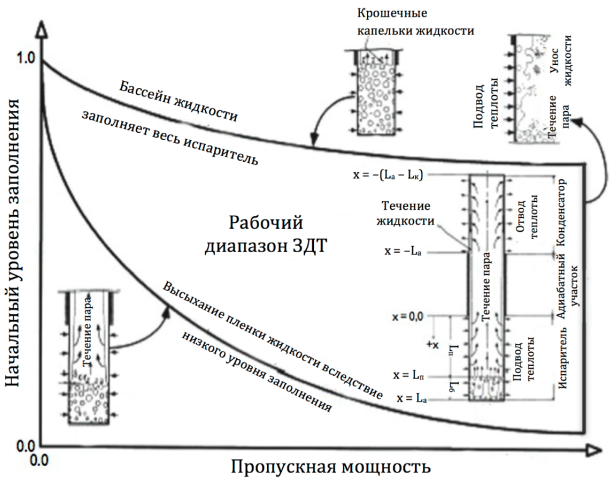


Рисунок 4 – Рабочий диапазон закрытого двухфазного термосифона [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reay, D. Heat Pipes. Theory, Design and Application / D. Reay, P. Kew. – Fifth edition. – Oxford : Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2006. – 377 p.

2. Nguyen-Chi, H. Entrainment or flooding limit in a closed two-phase thermosyphon / H. Nguyen-Chi, M. Groll // Proceedings of IV International Heat Pipe Conference, London. – Oxford : Pergamon press, 1981. – P. 53 – 56.

3. Terdtoon, P. Investigation of effect of inclination angle on heat transfer characteristics of closed two-phase thermosyphons / P. Terdtoon [et. al.] // Proceedings of 7th International Heat Pipe Conference. – 1990, May. – P. 67-71.ьт

4. Сорокин, Ю. Л. Критическая скорость пара (газа) для процесса захлебывания в вертикальных трубах / Ю. Л. Сорокин, М. Ю. Сорокин // Энергомашиностроение. – 1985. – No 6. – С. 5–6.

5. Кутателадзе, С. С. Гидродинамика газожидкостных систем/ С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – М.: Энергия, 1976. - 296 с.

6. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

7. Yong, J. P. Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon to the fill charge ratio / J. P. Yong, K. K. Hwan, J. K. Chul // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2002. – N 45. – P. 4655 - 4661.

8. Кравец, В. Ю. Теплопередающие характеристики двухфазных термосифонов/ В. Ю. Кравец, В. А. Чернобай, А. К. Готовцева // Восточно- европейский журнал передовых технологий. – 2012.– 2/8(56). – С. 61 – 63.

9. Emami, M. R. Sarmasti. Effect of aspect ratio and filling ratio on thermal performance of an inclined two-phase closed thermosyphon / M. R. Sarmasti Emami, S. H. Noie, M. Khoshnoodi // Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering. – 2008. – Vol. 32, N B1. – P. 39 – 51.

10. Безродный, М.К. Исследование кризиса тепломассопереноса в низкотемпературных бесфитильных тепловых трубах / М. К. Безродный, Д.В.Алексеенко // Теплофизика высоких температур. – 1977. – 15, N 2. – С. 370 - 376.

11. Groll, M. Heat recovery units employing reflux heat pipes as components : Final Report, Contract EE-81-133D(B) / M. Groll [et al.] – 1984.

12. El-Genk, M.S. Determination of operation envelopes for closed two-phase thermosyphons / M. S. El-Genk, H. H. Saber // Int. J Heat Mass Transf. – 1999. – Vol. 42. – P. 889 – 903

13. Анализ факторов, влияющих на эффективность работы термосифонов / М. П. Тюрин, Е. С. Бородина, Н. В. Дерюгин // Промышленные процессы и технологии. 2021. No 1. С. 77 – 88 DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-77-88.

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-252-256

ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН
EMITTER FOR FORMATION OF NONLINEAR ULTRASONIC WAVES

Хмелёв Владимир Николаевич, Шалунов Андрей Викторович, Нестеров Виктор Александрович, Боченков Александр Сергеевич
Vladimir N. Khmelev, Andrey V. Shalunov, Victor A. Nesterov, Alexander S. Bochenkov

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Россия, Бийск
Biysk Institute of Technology (Branch) of the Altai State Technical University named after I. I. Polzunov, Russia, Biysk
(e-mail: vnh@bti.secna.ru; shalunov@bti.secna.ru; nva@bti.secna.ru; tertishnikov.pp@bti.secna.ru; sanya.bochankov@mail.ru)

Аннотация: статья посвящена разработке способа воздействия на аэрозоли нелинейно-искаженными волновыми пакетами конечной длительности, определения оптимальных характеристик волновых пакетов, до разработки новой конструкции твердотельных излучателей механических колебаний ультразвуковой частоты, определения оптимальных геометрических размеров этих излучателей и их взаимного расположения.

Abstract: The article is devoted to the development of a method for influencing aerosols with nonlinearly distorted wave packets of finite duration, determining the optimal characteristics of wave packets, before developing a new design of solid-state emitters of mechanical vibrations of ultrasonic frequency, determining the optimal geometric dimensions of these emitters and their relative position.

Ключевые слова: ультразвук, нелинейные волны, ультразвуковой излучатель.
Keywords: ultrasound, nonlinear waves, ultrasonic emmiter.

Введение

Применение вихревых акустических течений для повышения эффективности очистки газа эффективно в объёмах резонансных размеров (или при использовании резонансных частот колебаний для данного объёма), чтобы скорости течений были сопоставимы со скоростями, реализуемыми в современных газоочистных аппаратах [1-3].

Известно, что применение способа, основанного на нелинейно-искаженных волновых пакетах конечной длительности для очистки в замкнутых объёмах наиболее целесообразно для газовых сред с малой счетной концентрацией дисперсных частиц [4-5].

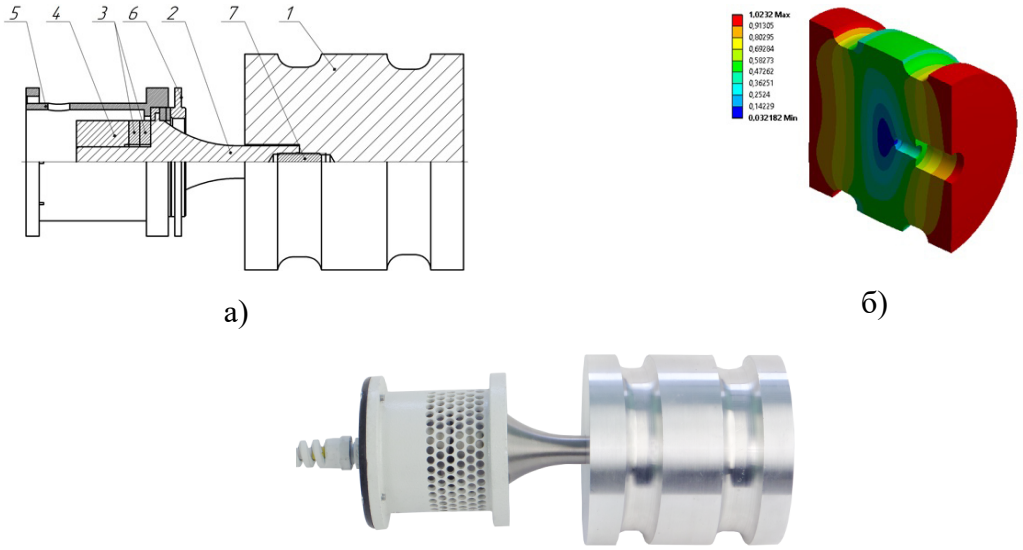
Поэтому для создания нелинейных ультразвуковых колебаний необходимо разработать конструкций ультразвуковых излучателей, обеспечивающих создание ультразвуковых колебаний и волновых пакетов с требуемыми характеристиками.

Разработка ультразвуковых излучателей проводилась с учетом следующего:

- расширение частотного диапазона излучателей в область высоких частот, создание излучателей, способных работать на частотах до 100 кГц;
- повышение интенсивности излучения и увеличение мощности излучателей, эффективной площади излучающей поверхности и увеличение эффективности вывода энергии в газодисперсные среды;
- создание систем излучения ультразвуковых колебаний, способных обеспечить направленное излучение, суммирование колебаний в отдельных зонах обрабатываемого пространства в потоках с уровнем звукового давления не менее 165 дБ..

Практическая часть

Для увеличения удельной эффективной площади излучателя был разработан излучатель поршневого типа, основой конструкции которого служит цилиндрическое тело полуволновой длины (рисунок 1).. Применение такой конструкции обеспечило увеличение эффективной площади излучения до 99% за счет высокой равномерности амплитуды колебаний на торцевой (излучающей) поверхности. Установлено, что предельный диаметр излучателей с равномерным распределением колебаний на излучающей поверхности не может превышать трех длин полуволн.



а) б)

в)

1 – УЗ излучатель; 2 – концентратор пьезопреобразователя; 3 – пьезокерамические элементы; 4 – отражающая накладка; 5 – корпус; 6 – фланец; 7 – шпилька

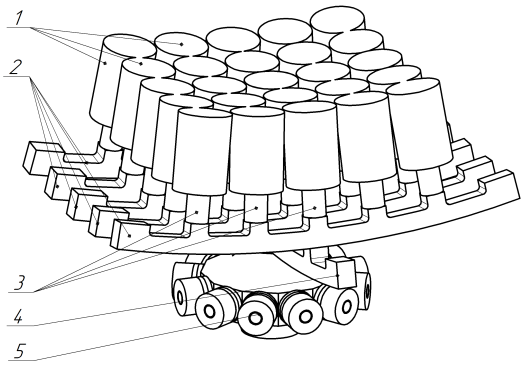
Рисунок 1 – Эскиз УЗКС с излучателем поршневого типа (а), форма колебаний УЗ дискового излучателя (б), фото излучателя (в)

Отличительной особенностью конструкции излучателя, является выполнение присоединительной (для возбуждения колебаний) плоскости, углубленной относительно торцевой поверхности на некоторое расстояние. Для повышения равномерности амплитуд колебаний вблизи излучающей поверхности выполнена проточка.

Однако, поскольку диаметр излучателя ограничивается 3 длинами волн, он формирует уровень звукового давления, недостаточный для формирования скачка уплотнения. Для увеличения площади излучателя, фокусировки ультразвуковых колебаний и формирования скачка уплотнения в открытых пространствах предложено разработанные излучатели объединить в синфазно колеблющийся массив (рисунок 2), путем размещения излучателей на изгибно-колеблющимся распределителе (рисунок 3).

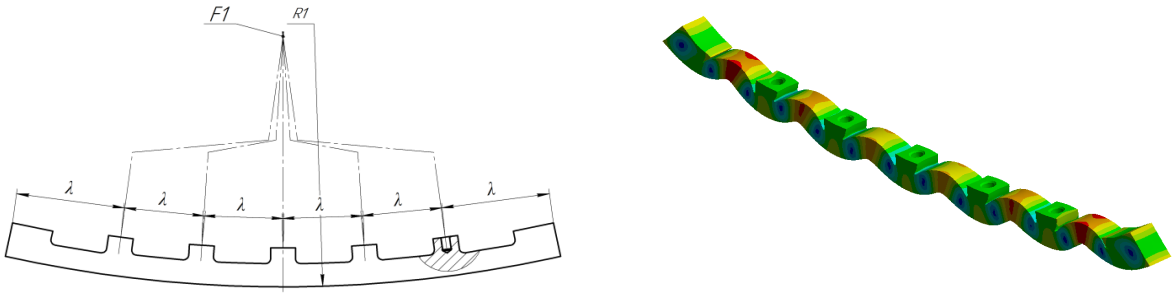
Распределитель (рисунок 3) представляет собой изгибно-колеблющуюся пластину с собственной частотой колебаний, соответствующей частоте пьзопреобразователя. Изгибно-колеблющийся распределитель колебаний отвечает сследующим требованиям:

- для обеспечения синфазной работы всех излучателей массива, места установки концентраторов расположены в зонах максимальных амплитуд колебаний;
- для исключения изгибных колебаний излучателей, колебания присоединительные области нормально направлены относительно присоединительной плоскости (компланарная составляющая амплитуды колебаний составляет не более 5 % от нормальной);
- разность амплитуд колебаний присоединительных плоскостей не более 5%;
- обеспечивается частотное согласование распределителя с излучателями, концентраторами и пьезопреобразователем;
- форма распределителя обеспечивает направленность излучения в область фокуса.



1 – продольно-колеблющиеся излучатели; 2 – распределители колебаний;
3 – концентраторы; 4 – центральный распределитель колебаний;
5 – пьезоэлектрический преобразователь

Рисунок 2 – Схема установки двумерного массива излучателей распределителю.

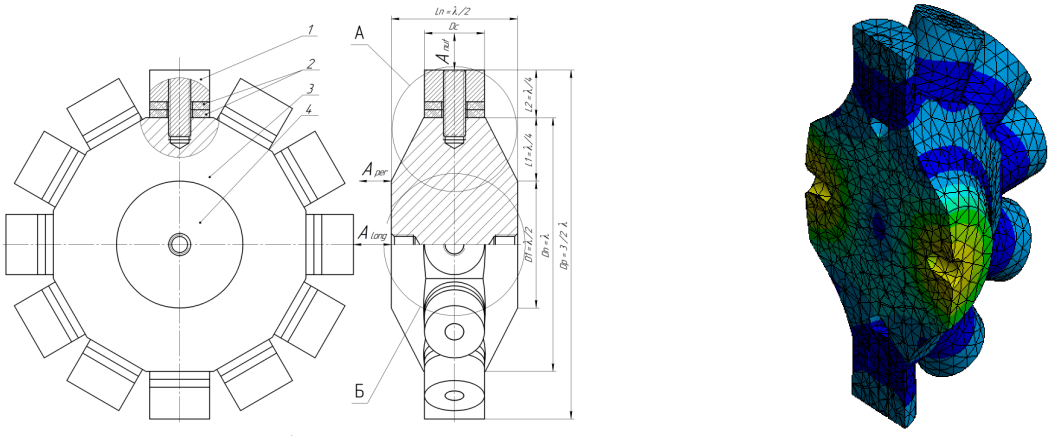


а) б)

F1 – область фокусировки, расположенная на расстоянии, равном R1 – радиус распределителя

Рисунок 3 – Конструктивная схема распределителя колебаний (а) и
форма колебаний распределителя (б)

Для возбуждения механических колебаний в массиве излучателей в диапазоне частот до 100 кГц предложен и разработан пьезоэлектрический преобразователь увеличенной мощности [6]. В его основу положен принцип суммирования на диаметрально колеблющейся суммирующей накладке колебаний радиально установленных отдельных преобразователей Ланжевена (рисунок 4).



а) б)

1 – суммирующая излучающая накладка; 2 – пьезокерамические элементы;
3 – отражающие накладки; 4 – соединительные шпильки.

Рисунок 4 – Конструкция высокочастотного пьезопреобразователя увеличенной мощности (а) и
картина распределения колебаний (б)

На рисунке 5 показано расчетное распределение уровня звукового давления, формируемое массивом излучателей поршневого типа

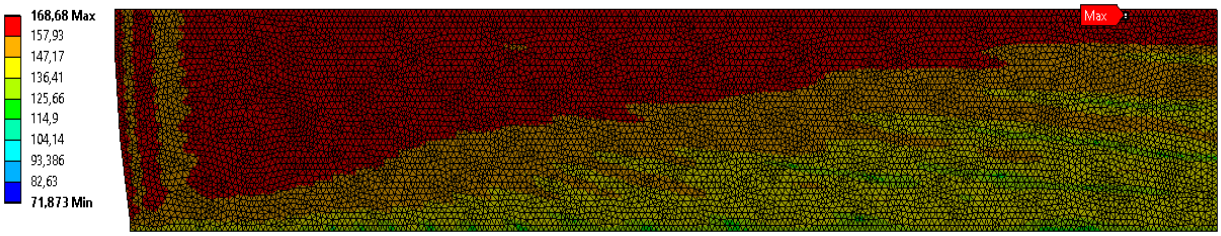
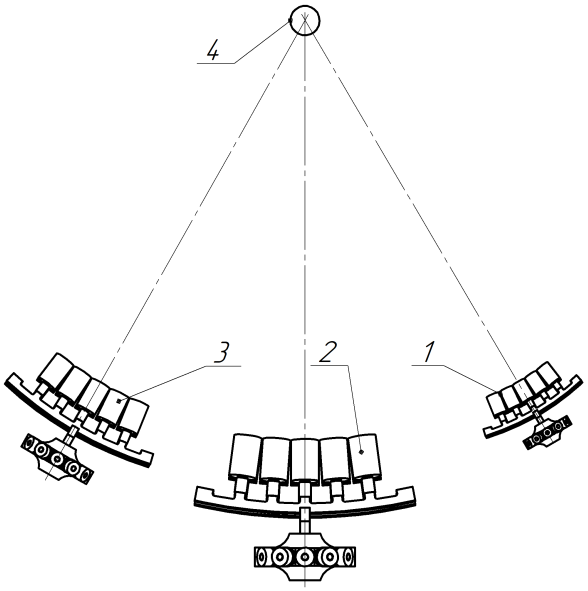


Рисунок 5 – Пример распределения уровня звукового давления, создаваемого одномерными массивом (5 шт.) продольно-колеблющихся излучателей

Для формирования нелинейно-искаженных ультразвуковых колебаний путем сложения равноамплитудных колебаний, создаваемых ультразвуковыми излучателями с кратными частотами, предложено использовать несколько массивов излучателей, а именно 1 массив излучателей на частоте 30 кГц, 4 массива, колеблющихся на частоте 60 кГц и 16 массивов излучателей колеблющихся на частоте 90 кГц. На рисунке 6 представлена схема расположения излучателей.



1 – излучатель 90 кГц; 2 – излучатель 30 кГц; 3 – излучатель 60 кГц;
4 – область фокусировки

Рисунок 6 – Схема расположения массивов излучателей поршневого типа с кратными частотами

Для питания всех разработанных ультразвуковых излучателей созданы генераторы, обеспечивающие импульсное возбуждение, с резким возрастанием амплитуды колебаний и принудительным резким снижением амплитуды колебаний за счет подачи напряжения на электроды пьезокерамических элементов пьезопреобразователя в противофазе. Каждый массив излучателей с кратными частотами питается от отдельного генератора, при этом системы управления генераторами синхронизированы между собой. Тем самым реализуя алгоритм работы, повышающий нелинейность формируемых нелинейно-искаженных волновых пакетов. Особенностью разработанных генераторов является наличие задающего генератора, на базе цифрового синтезатора частоты, предназначенный для формирования сигнала ультразвукового диапазона с точностью ±0.1 Гц. При этом схема выделения сигналов

обратной связи, предназначена для формирования сигналов необходимых для работы систем автоматической подстройки частот и системы управления амплитудой колебаний.

Заключение

Были разработаны практические конструкции твердотельных ультразвуковых излучателей широкого диапазона частот (до 90 кГц), увеличенной мощности и электронные генераторы для их питания, обеспечивающие формирование нелинейно-искаженных волновых пакетов с варьируемыми характеристиками. Были выработаны предложения по форме излучающих поверхностей и взаимному расположению излучателей в пространстве для формирования скачка уплотнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 19-19-00121.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tsujino J., Ihara S., Harada Y., Kasahara K., Sakamaki N. Characteristics of coated copper wire specimens using high frequency ultrasonic complex vibration welding equipments // Ultrasonics. 2004. V.42 P. 121-124..

2. Riera E., Golás Y., Blanco A., Gallego-Juárez J.A., Blasco M., Mulet A. Mass transfer enhancement in supercritical fluids extraction by means of power ultrasound // Ultrasonics Sonochemistry. 2004. V.11 P. 241-244.

3. Riera E., Gallego-Juárez J.A., Mason A. Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams // Ultrason. Sonochem. 2006. V.13 P. 107-116.

4. Khmelev V.N., Kuzovnikov Y.M., Tsyganok S.N., Levin S.V., Khmelev S.S. Evaluation of the area of intensive coagulation of dispersed-phase particles in emulsion and suspension due to high-intensive ultrasonic treatment // International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Erlagol, Altai. 2012. P. 140-144.

5. Kuzovnikov Y.M., Khmelev S.S., Tsyganok S.N., Khmelev V.N. Studying of coagulation and sedimentation of small hard particles in liquid medium during ultrasonic treatment // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Novosibirsk. 2010. P. 281-284.

6. Summation of high-frequency Langevin transducers vibrations for increasing of ultrasonic radiator power / Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A. // Ultrasonics. – 2021. – V. 114, 106413;

УДК 66.08

P DOPED CoCu AEROGEL AS A BIFUNCTIONAL ELECTROCATALYST FOR EFFICIENT OVERALL WATER SPLITTING

Hongchen Liu, Fan Yang, Xingru Yan, Fengjiang Chen

State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing, 102249, China
(e-mail: yangfan@cup.edu.cn)

Abstract

In recent years, global energy crisis and environmental pollution stimulate the development and production of renewable and clean energy. Hydrogen is considered as one of the most ideal renewable energies due to the highest gravimetric energy density and no pollutant exhaust. Electrochemical overall water splitting (OWS), which composed by hydrogen evolution reaction (HER) on cathode and oxygen evolution reaction (OER) on anode, is regarded as an environmental-friendly approach for large-scale hydrogen production. Currently, conventional noble metal-based catalysts (Pt for HER and RuO_2, IrO_2 for OER) are usually applied for electrolytic OWS with low overpotentials. However, high cost and low storage of these materials limit their large-scale application. Besides, the majority of reported catalysts usually exhibit high activities for only one-half of OWS (HER or OER). Nonetheless, the mismatch of two different catalysts not only reduces the stability and activity, but also increases the complexity and cost of the system. Therefore, using bifunctional water splitting catalysts for both HER and OER possesses the advantages of systematization and low cost. To this end, it is significant to develop inexpensive bifunctional catalysts with lower overpotentials for efficient OWS reaction.

Among all non-precious-metal-based catalysts for OWS, cobalt (Co) has attracted wide attention because of its high electrocatalytic performance and low cost. Due to the suitable adsorption/desorption performance of H^*, elemental Co has been reported as good active site for HER. Meanwhile, Co oxides have the moderate binding energy of O^* between OH^* and OOH^*, which causes their favorable catalytic activity of OER. Thus, compared with other transition metals (such as Ni, Mo, etc.), Co-based catalysts are more likely to bind the active sites of HER/OER to achieve electrocatalytic OWS reaction. However, when used to catalyze HER/OER, the overpotentials of pure Co-based catalysts still much higher than that of noble-metal catalysts. To solve this problem, a series of strategies have been reported to optimize the catalytic activity of Co-based materials. An effective approach is introducing another transitional metal into the skeleton of Co to form bimetallic alloy, such as Co-Ni nanocones, Co-Cu nanoparticles and Co-Fe nanolayers. Alloying Co with other metals can change the coordination environment of the Co atom and modifies the electronic environments, which further leads to the appropriate interaction between catalysts and reactive intermediates. According to the DFT calculation results, Co-Cu surface alloy has ideal hydrogen adsorption Gibbs free energy (close to zero), which leads to better catalytic activity of HER than other Co-based transition metal alloys. In fact, the introduction of copper can not only produce synergistic effect, but also improve the charge transfer efficiency of catalysts, which has been confirmed by some recent reports of Cu-based materials. In addition to forming alloy, heteroatom doping is also a common way to improve catalytic performance. In all kinds of non-metals commonly used for doping, P has large atomic size and strong electron-donating ability, which can significantly improve the electrochemical performance by adjusting the electronic structure of the catalysts. Previous studies have shown that P doping can optimize the activity of Co-based catalysts for not only HER (Co catalysts) but also OER (Co oxides catalysts).

On the basis of composition control, morphology engineering can also significantly improve the electrocatalytic performance of materials through increasing active sites exposure and enhancing

mass transfer. In recent years, various metallic micro/ nanoarchitectures with large specific surface area and high porosity have attracted extensive attention. Among them, metal aerogels can provide abundant active sites and form interconnected mass transfer pathways due to their unique three-dimensional interconnect-network structures. Dubale et al. prepared transition metal aerogels (nickel-bismuth aerogels) by $NaBH_4$ reduction method. This work shows that the network structures of transition metal aerogels are usually composed of metal oxides in the shell and elemental metals in the core layer. In addition, this work also points out that the morphology of the aerogels and electronic structure of the active sites can be regulated by adjusting the molar ratio of bimetal, so that better electrocatalytic performance can be obtained. In conclusion, transition metal aerogels have the potential to be employed in electrocatalysis, but their application in OWS reaction has not been widely paid attention.

Based on the above findings, we present a P-doped CoCu aerogel (P-CoCu) for electrocatalytic OWS reaction. With $NH_4H_2PO_2$ as the P source, P can be doped at a low temperature of 250℃, so that the characteristic morphology of the aerogel can be maintained after P doping process. The bifunctional P-CoCu catalyst possess impressive performance of HER (74 mV@10 mA cm^{-2}) and OER (194 mV@10 mA cm^{-2}), which results in a low cell voltage of 1.60 V to achieve a current density of 10 mA cm^{-2} for electrocatalytic OWS reaction. The excellent performance of the P-CoCu can be attributed to the following three points: 1. The Cu alloying benefits the desorption of H_2 at the gas-liquid-solid interfaces, and its good electrical conductivity optimizes the charge transfer efficiency of the material. 2. P doping adjusts the electron densities around CoCu, which promotes the adsorption of water and proton. 3. The unique structure of aerogel provides high electrochemical active surface area (ECSA) with large number of exposed active sites. This work provides a new perspective for the design of high performance and low cost Co-based transition metal catalysts of OWS reaction.

Keywords: Transition metal; Alloy; Aerogel; Phosphorus doping; Electrocatalyst; Overall water splitting

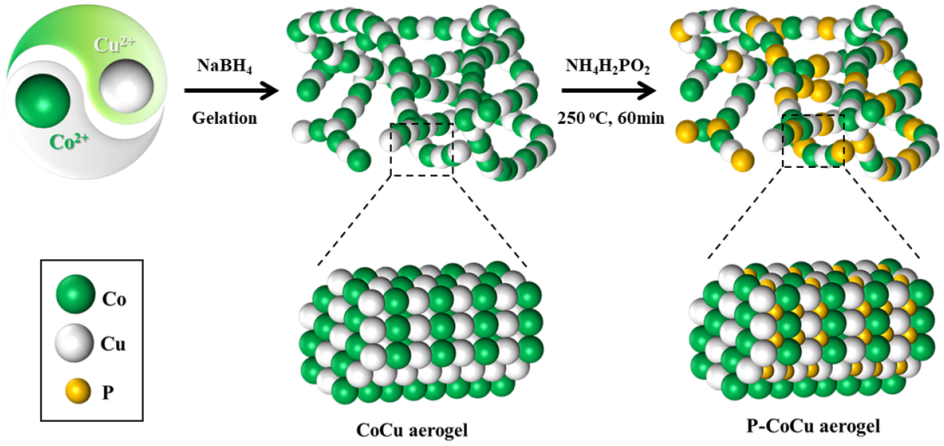


Figure 1. Schematic illustration for the synthesis of P-CoCu aerogels

УДК 677.027.652 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-259-262

ИЗУЧЕНИЕ КЛЕЕВЫХ СВОЙСТВ АКРИЛОВЫХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ СОЗДАНИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
STUDY OF ADHESIVE PROPERTIES OF ACRYLIC POLYMERS IN THE CREATION OF MULTILAYER TEXTILE MATERIALS

Полушин Евгений Геннадьевич, Зимнуров Анвар Русланович, Козлова Ольга Витальевна
Evgeny G.Polushin, Anvar R.Zimnurov, Olga V.Kozlova

Ивановский государственный химико-технологический университет
Россия, г. Иваново
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail: ovk-56@mail.ru)

Аннотация: В работе исследована зависимость прочности клеевых соединений при дублировании текстильных волокнистых материалов от природы и характеристик применяемых полимеров. Исследования изменений температурно-временных параметров термообработки на прочность склейки позволили определить эффективные составы полимерно-клеевых композиций и оптимальные условия процесса склейки (температура 150°С, 15 мин).

Abstract: The paper investigates the dependence of the strength of adhesive joints when duplicating textile fibrous materials on the nature and characteristics of the polymers used. Studies of changes in the temperature-time parameters of heat treatment for gluing strength made it possible to determine the effective compositions of polymer-adhesive compositions and optimal conditions for the gluing process.

Ключевые слова: дублированные текстильные материалы; полимерно-клеевые композиции; акриловые полимеры; прочность склеивания материалов.

Keywords: duplicated textile materials; polymer adhesive compositions; acrylic polymers; adhesion strength of materials.

Для дублирования текстильных материалов применяют полимерные клея, удовлетворяющие определенным требованиям. Прежде всего, они должны характеризоваться хорошей адгезией к текстильным материалам и образовывать достаточно эластичные пленки, устойчивые к влаге, светопогоде, к химической чистке и старению. Полимерные клея, применяемые для склеивания материалов одежды, не должны также содержать веществ, вредно действующих на организм человека.

Многочисленные работы по изысканию и исследованию клеев, пригодных для склеивания текстильных материалов, проведены авторами [1]. Ими показано, что склеивание материалов путем сплошного клеевого покрытия может приводить к повышенной жесткости материала, уменьшению паро- и воздухопроницаемости изделия и что для изготовления материалов для одежды правильнее применять клееные материалы, полученные мокрым склеиванием и представляющие собой волокнистый слой из натуральных и искусственных волокон, пропитанных растворами, эмульсиями, дисперсиями, латексами водорастворимых или органических вяжущих веществ, которые склеивают волокна без изменения их химического состава.

Для детального изучения процесса дублирования текстильных материалов использовали комбинации материалов в соответствии с назначением дублированных материалов и их основными характеристиками. В таблице 1 приведена характеристика выбранных материалов для дублирования.

Таблица 1 – Характеристика материалов для дублирования

Назначение ДВМ	Верхний слой	Нижний слой	Основные характеристики ДВМ
Одежда для рабочих, для активного отдыха (охотники, рыболовы и др.)	Хлопкополиэфирная (33/67) ткань, 100% полиэфирная ткань с отделкой ВО	Среднеплотный флис (200 г/кг) полиэфирный гладкокрашеный, хлопчатобумажный трикотаж	Прочность склеивания Устойчивость к стиркам Гигроскопичность Теплозащита
Декоративные материалы (текстильные обои)	Хлопчатобумажная, льняная или полульняная и в смеси с полиэфиром	Флизелин хлопчатобумажный	Прочность склейки Прочность к истиранию Отделка ГМВО
Декоративные материалы (шторы, занавеси типа блекаут)		Полиэфирная портьерная облегченная	Прочность разрывная Отделка ГМВО Светонепроницаемость

В работе исследована зависимость указанных в таблице свойств от природы и характеристик применяемого полимера для дублирования материалов. При этом наибольшее предпочтение отдано акриловым сополимерам, как наиболее доступным, экологически безопасным и способствующим получению прочных, формоустойчивых и мягких материалов.

Ранее показано [2], что препараты серии акриловых сополимеров с различным соотношением известных мономеров в полимере таких, как метилметакрилат, акрилонитрил, стирол, бутилакрилат, акриламид и др. дают результаты по склеиванию материалов совершенно различные – от материалов с низкой адгезией, до прочно склеенных, устойчивых к мокрым обработкам.

В настоящее время теоретические разработки не дают точно предсказать прочность и другие свойства клеевых соединений. Но исследования все время ведутся в этом направлении, при этом большое значение придается выбору метода. Получаемая в ходе испытаний информация может быть представлена как количественными показателями, (например упругости, прочности, адгезионной способности, изменения линейных размеров и т.п.), так и качественными оценками. В соответствии со сказанным контроль процесса получения клеевых соединений проводят как с помощью приборов, так и без них.

Например, отслоение термоклеевых прокладочных материалов от основного материала, относящееся к дефектам внешнего вида, обнаруживается визуально. Адгезив, который может прочно соединяться с одним материалом, может образовывать очень слабые связи с другим. Между этими двумя состояниями существуют разные степени адгезии, усиливаемые параметрами процесса склеивания, в частности температурой.

Основными показателями, определяемыми при этих методах, являются: способность клеевых соединений к растяжению; изменение линейных размеров; жесткость; упругость; пространственная формоустойчивость; дефекты внешнего вида. Однако объем информации, полученный в ходе неразрушающих методов испытаний, не дает представления о прочности клеевых соединений, которая оказывает решающее влияние на условия их эксплуатации.

Разрушающие методы испытаний являются исключительно информативными и важными. При разрушающих методах испытаний определяют прочность клеевых соединений при нормальных условиях влажности и температуры; термомеханическую зависимость прочности клеевого соединения от температуры; прочность после эксплуатационных воздействий (стирки, химические чистки).

При расслаивании клеевых соединений часть усилий затрачивается не на преодоление адгезионного взаимодействия, а на деформацию текстильных материалов (распрямление,

растяжение, выдергивание волокон, нитей и пряжи). Схема приложения нагрузки к концам испытываемой пробы показана на рисунке 1.

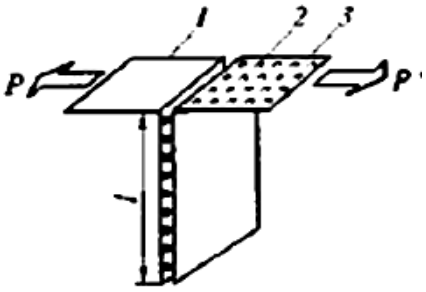


Рисунок 1 – Схема приложения нагрузки к концам испытываемой пробы:
1,3— текстильные материалы;
2 — адгезив (Р — усилие; l — длина зоны адгезионного контакта).

В работе выбран разрушающий метод проверки прочностных свойств склейки дублированных волокнистых материалов. В качестве клея использовали композицию на основе отечественных акриловых и уретановых водных дисперсий полимеров. Температура термосклейки 150^0С, время выдерживания в термопрессе – 5-20 сек. На примере дублирования хлопкополиэфирной костюмной и трикотажной хлопчатобумажной тканей и отечественных пленкообразующих полимеров показаны результаты по прочности склейки дублированных материалов (рис. 2), оцененные по методике [3].

Анализ результатов показывает, что наиболее прочные склейки получены при использовании акриловых полимеров: Рузина-33 и Рузина-14и, Ларуса-33 и ПВА.

При этом, как было показано ранее, с первыми двумя полимерами наблюдали самый мягкий гриф, тогда как Ларус-33 и ПВА дают самый жесткий гриф. Результаты показывают, что максимальная прочность склейки достигается уже при 15 секундной термообработке.

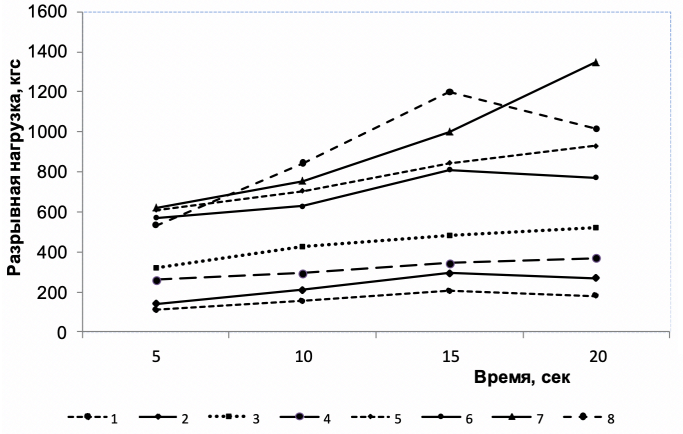


Рисунок 2 – Результаты прочности склеивания материалов при температуре термообработки 150°С и длительности обработки от 5 до 20 сек: 1 - Аквапол-21; 2 – Аквапол-12; 3 – Аквапол-11; 4 – Аквапол-10; 5 – Ларус-33; 6 – ПВА; 7 – Рузин-33; 8 – Рузин-14и.

Оценка влияния температуры термообработки и природы полимера на результаты склейки материалов (рисунок 3.) показала, что практически для всех полимеров сохраняется тенденция незначительного изменения прочности склейки с увеличением температуры выше 140°С.

И только при использовании Рузина-33 при 140°С наблюдается значительное увеличение прочности и дальнейшее её снижение. Последнее можно объяснить особенностями строения Рузина-33 и наличием «мягкого» бутилакрилатного мономера в его составе с низким значением $T_{ст.}$, который придает пленкам чрезвычайно мягкие и эластичные свойства и имеет характерную температурную зависимость при ее формировании и упрочнении.

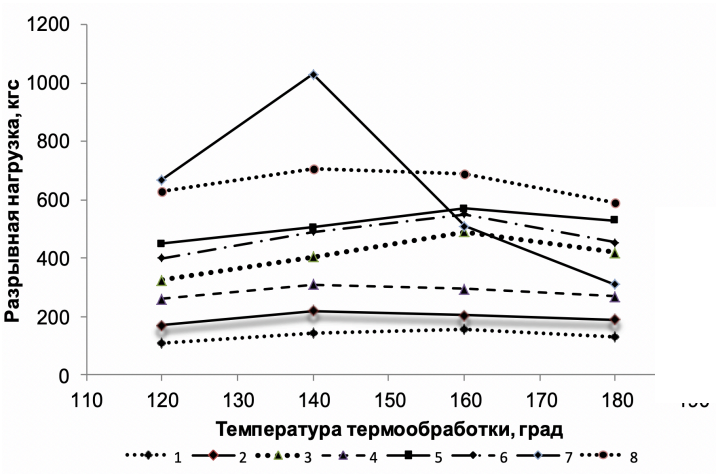


Рисунок 3 – Результаты прочности склеивания материалов при длительности термообработки 15сек и температурах обработки от 120 до 180ºС в присутствии различных полимеров: 1 - Аквапол-21; 2 – Аквапол-12; 3 – Аквапол-11; 4 – Аквапол-10; 5 – Ларус-33; 6 – ПВА; 7 – Рузин-33; 8 – Рузин-14и.

Оптимизация условий формирования прочного склеивания ТМ включает и нахождение рациональных концентрационных параметров. Выпускная форма водных дисперсий полимеров предполагает наличие активного вещества-полимера в количестве около 40%. Нами проверено влияние концентрации полимера и количества слоев, наносимых на ТМ, на результаты склеивания тканей. В качестве объекта испытания выбран полимер, лучшим образом проявивший себя в качестве клея – Рузин-33. Показано, что увеличение количества слоев нанесения и концентрации полимера приводит к повышению прочности склеивания текстильных материалов почти в 2 раза. При этом уже достаточно хорошая прочность склейки без ухудшения грифа ткани обеспечивается при двухслойном нанесении эмульсии полимера.

На основании проведенных исследований выбран полимерный препарат фирмы ООО «Сван» – Рузин-33, который обладает свойствами прочно скреплять текстильные материалы при температуре 140-150ºС в течение 10-15 сек.

Полученные данные легли в основу разработки нескольких видов ДВМ в соответствии с назначением материалов и их потребительскими свойствами, а именно: текстильных обоев с масло-, грязе-, водоотталкивающими свойствами; материалов для одежды повышенной комфортности с паропроницаемыми, ветро-, водонепроницаемыми свойствами [2]; дублированных материалов для штор со светонепроницаемыми свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Притыкин, Л.М. Мономерные клеи / Л.М. Притыкин, Д.А. Кардашов, В.Л. Вакула. – М. : Химия, 1988. – 176 с.

2. Полушин, Е.Г. Изучение паропроницаемости дублированных текстильных материалов. / Е.Г.Полушин, О.В.Козлова, О.И.Одинцова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности.- Иваново, 2019. – №6. – С. 154-158.

3. ГОСТ 28832-90 Материалы прокладочные с термоклеевым покрытием. Метод определения прочности склеивания Электронный фонд правовой и научно-технической документации http://docs.cntd.ru/document/1200018817 (11.04.20)

УДК 66.02 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-263-267

ИЗЛУЧАТЕЛЬ ПОРШНЕВОГО ТИПА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ
PISTON-TYPE RADIATOR FOR THE FORMATION OF HIGH-INTENSITY ULTRASONIC VIBRATIONS IN GAS ENVIRONMENTS

Хмелёв Владимир Николаевич, Шалунов Андрей Викторович, Нестеров Виктор Александрович, Тертишников Павел Павлович , Боченков Александр Сергеевич
Vladimir N. Khmelev, Andrey V. Shalunov, Victor A. Nesterov, Pavel P. Tertishnikov, Alexander S. Bochenkov

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Россия, Бийск
Biysk Institute of Technology (Branch) of the Altai State Technical University named after I. I. Polzunov, Russia, Biysk
(e-mail: vnh@bti.secna.ru; shalunov@bti.secna.ru; nva@bti.secna.ru; tertishnikov.pp@bti.secna.ru; sanya.bochankov@mail.ru)

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы и особенности проектирования, а в дальнейшем и создания новейшего, не имеющих аналогов излучателя поршнеобразного вида, предназначенного для создания высокоинтенсивных акустических полей ультразвуковой частоты в различных газовых средах. Прообразом для проектирования и создания предложенного излучателя является цилиндрическое тело, длиной равной половине длины волны формируемых преобразователем ультразвуковых колебаний в материале излучателя. Далее цилиндрическое тело соединялось с электроакустическим преобразователем. Из-за того, что присоединительная плоскость, предназначенная для возбуждения колебаний с ультразвуковой частотой, выполняется углубленной, относительно торцевой поверхности, удаётся значительно увеличить амплитуду механических колебаний излучающей поверхности. Предложенная и разработанная конструкция излучателя ультразвуковой частоты для воздействия на газовые среды позволяет создавать в озвучиваемой среде интенсивность не менее 155 дБ при потребляемой мощности не более 90 Вт.

Abstract: The article discusses the issues and features of the design, and in the future, the creation of the latest, unparalleled piston-shaped emitter, designed to create high-intensity acoustic fields of ultrasonic frequency in various gas environments. The prototype for the design and creation of the proposed emitter is a cylindrical body with a length equal to half the wavelength of the ultrasonic vibrations formed by the transducer in the material of the emitter. Next, the cylindrical body was connected to an electroacoustic transducer. Due to the fact that the connecting plane, designed to excite vibrations with an ultrasonic frequency, is made deep, relative to the end surface, it is possible to significantly increase the amplitude of mechanical vibrations of the radiating surface. The proposed and developed design of the ultrasonic frequency emitter for exposure to gas environments allows you to create an intensity of at least 155 dB in the voiced environment.

Ключевые слова: ультразвук, газовая среда, ультразвуковой излучатель.
Keywords: ultrasound, gaseous medium, ultrasonic transducer.

Введение

Воздействие ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности позволяет реализовать новые процессы, существенно ускорить известные технологии и получать новые вещества с уникальными свойствами [1]. В частности, известно, что воздействие ультразвуковыми колебаниями через нерезонансные газовые промежутки позволяет повысить эффективность газоочистительного оборудования, реализовать сушку без существенного нагрева высушиваемого материала с большей скоростью, по сравнению с сушкой без ультразвукового воздействия, эффективно разрушать пену без применения химических

реагентов. В настоящее время для интенсификации процессов в газовых средах применяются продольно колеблющиеся резонансные пьезоэлектрические колебательные системы [2]. Однако они не способны создавать в газовых средах ультразвуковые колебания с уровнем звукового давления 130…150 дБ.

Постановка задачи

Однако, несмотря на высокую эффективность и потребность, ультразвуковое интенсифицирующее воздействие в газовых средах пока не находит широкого практического распространения. Это обусловлено тем, что имеющиеся источники ультразвукового воздействия (газоструйные излучатели, динамические сирены, электроакустические преобразователи пьезоэлектрического типа) не обеспечивают требуемый уровень звукового давления, частоту и направленность излучения [3]. Созданные в последние годы ультразвуковые колебательные системы (УЗКС) на основе пьезоэлектрического преобразователя, с излучателями в виде изгибно-колеблющихся дисков не получают широкого распространения из-за их высокой стоимости, сложности изготовления, малой эффективности излучения, высокой вероятности разрушения и невозможности изготовления таких излучателей диаметром более 300…400 мм.

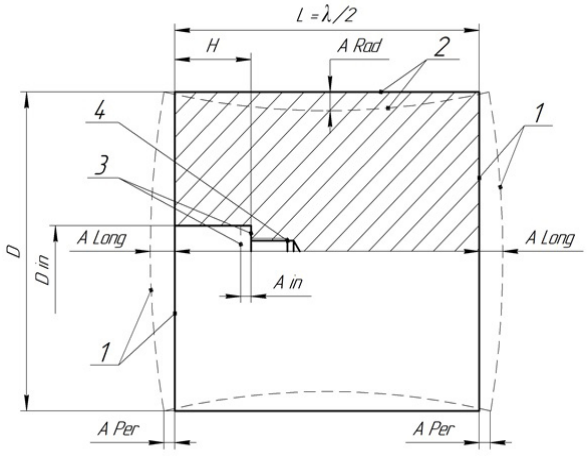
Отсутствие пригодных и эффективных излучателей и высокая потребность в практической реализации технологических процессов в газовых средах обуславливают необходимость создания высокоэффективных ультразвуковых излучателей для газовых сред.

Основная часть

Поскольку при излучении в газовые среды воздействие на излучатель со стороны обрабатываемой среды минимально, необходимо использование излучателей с максимально возможными резонансными свойствами.

Основой конструкции такого излучателя может служить цилиндрическое тело резонансной (полуволновой) длины, соединенное с электроакустическим преобразователем. Эскиз предложенного излучателя представлен на рисунке 1.

Отличительной особенностью предложенного излучателя, позволяющей увеличить амплитуду его резонансных колебаний, является выполнение присоединительной для возбуждения колебаний плоскости (поз.3), углубленной относительно торцевой поверхности (поз.1) на расстояние (Н). При этом, торец концентратора ультразвуковой колебательной системы присоединяется к плоскости отверстия (поз.3).



1 – торцевая излучающая поверхность; 2 – цилиндрическая излучающая поверхность; 3 – присоединительная плоскость; 4 – резьбовое отверстие; D – диаметр цилиндра; D in – диаметр присоединительного отверстия; L – длина цилиндра; A Rad – амплитуда радиальных колебаний; A Long – амплитуда продольных колебаний; A in – амплитуда колебаний на входе; A Per – амплитуда колебаний ребра излучателя; H – глубина отверстия с присоединительной плоскостью.

Рисунок 1 - Эскиз излучателя

При такой конструктивной схеме излучателя коэффициент трансформации определяется как отношение амплитуды колебаний излучающей поверхности (поз.1) к амплитуде колебаний присоединительной плоскости (поз.3):

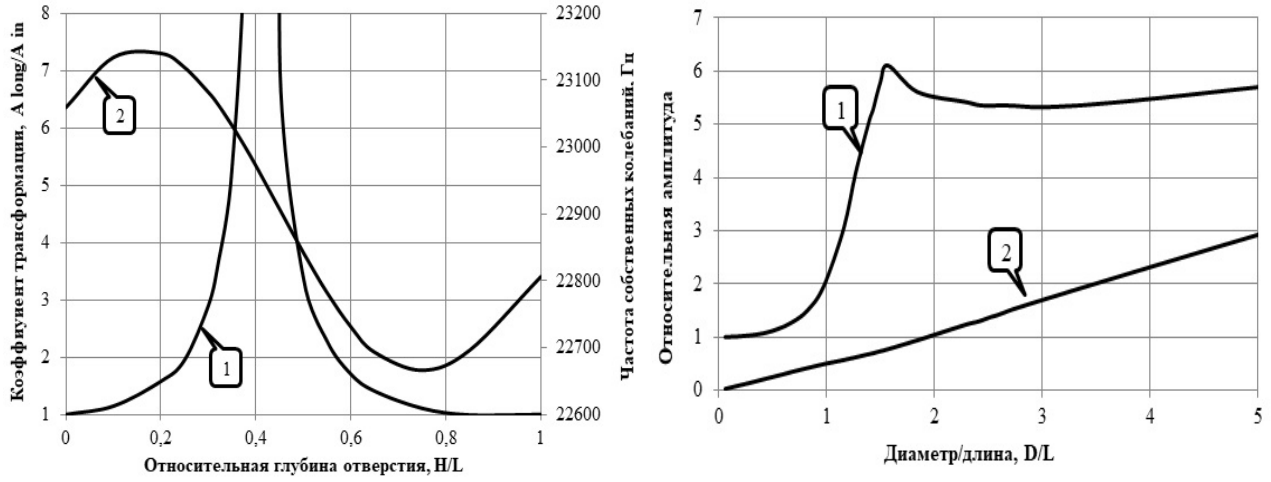
$$K_{Tr} = \frac{A_{Long}}{A_{in}} \quad (1)$$

Исследование предложенного излучателя и оптимизация его параметров проведены с помощью метода конечных элементов.

На рисунке 2а, кривая 1 представлена расчетная зависимость коэффициента трансформации от относительной глубины отверстия (H/L, поз.3, рисунок 1). На кривой 2 рисунка 2а представлена зависимость частоты собственных колебаний от отношения (H/L).

Для получения численных значений равномерности распределения амплитуд колебаний на торцевых поверхностях в зависимости от отношения диаметр/длина (D/L) был проведен ряд модельных расчетов. Для упрощения расчетов в качестве критерия равномерности было использовано отношение амплитуды продольных колебаний в центре к амплитуде колебаний на периферии, (ALong/APer). Это позволило получить зависимости (ARad/ ALong) от отношения диаметр/длина (D/L), представленные на рисунке 2б.

Расчеты были проведены при диаметре излучателя D = 0,1 м; D in = 0.015 м; L = 0.1 м. В качестве материала излучателя использован алюминиевый сплав В95 (E = 7,1*1010 Па; ρ = 2800 кг/м^3; μ = 0,31).



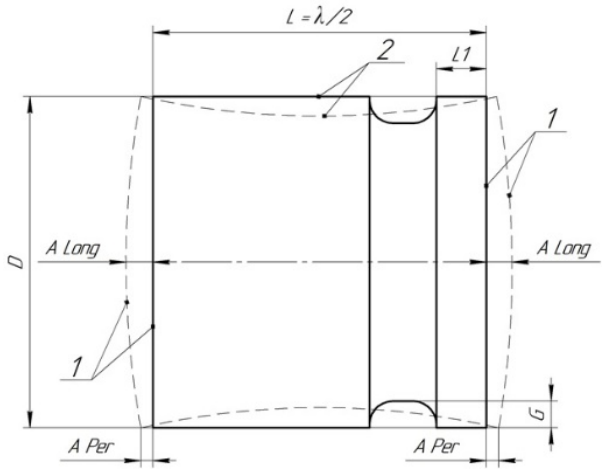
а) б)

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трансформации (кривая 1) и частоты собственных колебаний (кривая 2) от отношения (H/L) (а);
Зависимости ALong/APer (кривая 1) и ARad/ALong (кривая 2) от D/L (б)

Как следует из представленных зависимостей (рисунок 2а, кривая 1), при соотношении H/L=0,4 коэффициент трансформации стремится к бесконечности. Вызвано это тем, что при данном соотношении присоединительная плоскость находится в зоне минимальных продольных колебаний. При этом частота колебаний (рисунок 2а, кривая 2), достигает своего максимального значения при H/L=0,15, а минимального значения при H/L=0,75.

Анализ зависимостей (рисунок 2б, кривая 1) позволил установить, что при соотношении D/L=1,56 соотношение (ALong/APer) достигает своего максимального значения, обеспечивая при этом максимальную неравномерность распределения амплитуды колебаний на торцевой поверхности излучателя. Наряду с этим, анализ зависимости (рисунок 2б кривая 2) показал, что при увеличении (D/L) излучатель начинает колебаться преимущественно в радиальном направлении.

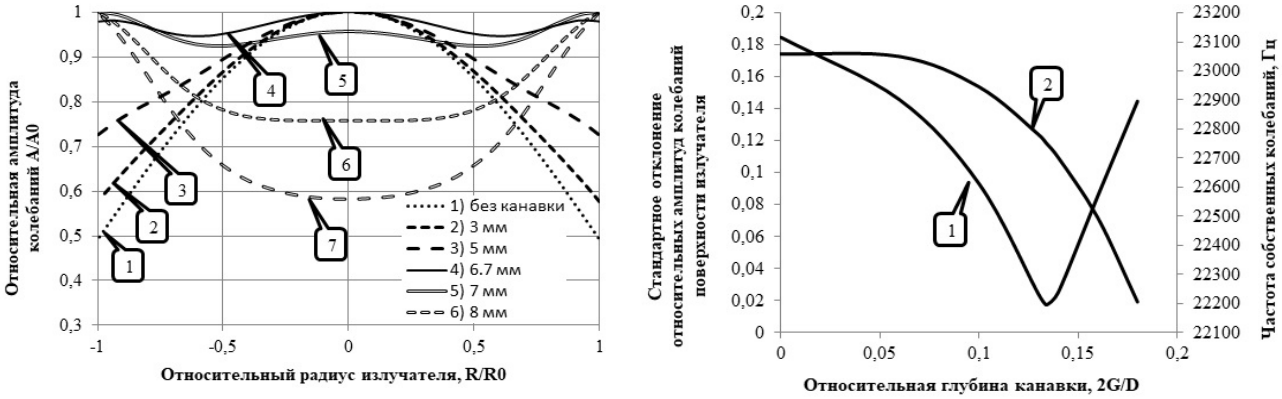
Для обеспечения равномерности амплитуд колебаний торцевой поверхности было предложено выполнить проточку на цилиндрической части излучателя (рисунок 3).



1 – торцевые излучающие поверхности; 2 – цилиндрическая излучающая поверхность; D – диаметр цилиндра; L – длина цилиндра; A Rad – амплитуда радиальных колебаний; Along – амплитуда продольных колебаний; A Per – амплитуда колебаний ребра цилиндра; L1 – расстояние от излучающей торцевой плоскости до проточки; G – глубина проточки

Рисунок 3 - Эскиз излучателя поршневого типа с проточкой

На рисунке 4а приведены формы колебаний поверхности излучателя при разных значениях глубины проточки. На рисунке 4б кривая 1 приведена зависимость стандартного отклонения относительных амплитуд колебаний от относительной глубины канавки и зависимость частоты собственных колебаний (рисунок 4б график 2).



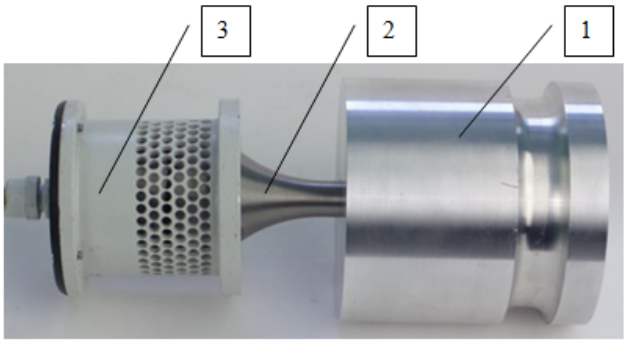
а) б)

Рисунок 4 – а) Распределения колебаний по диаметру излучателя, б) Зависимость стандартного отклонения относительных амплитуд колебаний (график 1) и частоты собственных колебаний (график 2) от относительной глубины канавки (2G/D)

Анализ полученных результатов позволил определить оптимальную глубину (G = 0,13D) кольцевой проточки, при которой обеспечивается максимальная равномерность распределения колебаний поверхности излучателя.

Результаты проведённых экспериментальных исследований

На рисунке 5 приведено фото изготовленной ультразвуковой колебательной системы с излучателем поршневого типа.



1 – ультразвуковой излучатель; 2 – пьезопреобразователь; 3 - корпус

Рисунок 5 – Фото разработанной ультразвуковой колебательной системы

Измерения уровня звукового давления изготовленной практической конструкции показали, УЗ излучатель обеспечивает уровень звукового давления не менее 155 дБ на расстоянии 1м. При этом в фокусе излучатель обеспечивает уровень звукового давления не менее 162 дБ при потребляемой мощности не более 90 Вт.

Заключение

В результате проведенных исследований был создан ультразвуковой излучатель поршневого типа, способный обеспечить воздействия на газовые среды с интенсивностью не менее 155 дБ при потребляемой мощности не более 90 Вт.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 19-19-00121.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг Л.Д. Источники мощного ультразвука. - М.: Наука, 1967. - 265 с.
2. Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Шалунов А.В., Лебедев А.Н., Хмелев С.С., Галахов А.Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. №1. С.148-157.
3. Gallego-Juarez J.A., Riera-Franco de Sarabia E., Rodrigues-Corral G., Hoffman T.L., Galvez-Moraleda G.C., Rodriguez-Maroto J.J., Gomez-Moreno F.J., Bahillo-Ruiz A., Martin-Espigares M., Acha M. Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants // Environmental science and technology. 1999. V. 33. No. 21. P. 3843-3849.

УДК 66.022.389 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-268-270

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТ ПРЕССОВЫХ СУКОН В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВЛАЖНО-ТЕПЛОВЫХ ОБРАБОТОК
INVESTIGATION OF CHANGES IN THE OPERATIONAL PROPERTIES OF PRESS CLOTHS DURING LONG-TERM WET-HEAT TREATMENTS

Хазанов Григорий Игоревич, Апарушкина Маргарита Алексеевна
Grigory I. Khazanov, Margarita A. Aparushkina

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail:hasanov_gr_1957@rambler.ru, paxt@yandex.ru)

Аннотация: Изучена возможность совмещения технологических операций антимикробной отделки и аппретирования прессовых сукон за счет применения полимерной композиции, содержащей оловоорганический латекс и эпоксидную смолу. Показано положительное влияние полимерной композиции эпоксидная смола-оловоорганический латекс на эксплуатационные свойства готового изделия.

Abstract: The possibility of combining the technological operations of antimicrobial finishing and dressing of press cloths through the use of a polymer composition containing organic tin latex and epoxy resin is studied. The positive effect of the polymer composition epoxy resin-tin-organic latex on the performance properties of the finished product is shown.

Ключевые слова: прессовые сукна, кинетические кривые, аппретирование, грибостойкость.

Keywords: press felts, kinetic curves, dressing, fungal resistance.

Представленная работа является продолжением исследований, направленных на изучение возможно совмещения технологических операций антимикробной отделки и аппретирования прессовых сукон [1-2].

Прессовые сукна работают длительное время в условиях активной гидродинамики. Поэтому придаваемые им эксплуатационные свойства должны быть устойчивы к длительным влажно-тепловым обработкам.

Нами изучались изменения эксплуатационных свойств сукон аппретированных полимерной композицией содержащей: компоненты эпоксидной смолы Книтекс EPS и EPX по 5,5 г/л, оловоорганического латекса АБП-40 - 15 г/л при температуре термообработке 105^{o}C. Эксперимент проводился на образцах сукна марки ИКП-13.

Оценка устойчивости эксплуатационных свойств аппретированных сукон и модельных пленок к воздействиям водных сред осуществлялась путем снятия кинетических кривых экстракции дистиллированной водой, растворами уксусной кислоты, кальцинированной соды и неионогенного моющего средства превоцелл W-OFP-100.

Перечисленные воздействия (рисунок 1-2) на образцах, так и на модельных пленках значимого влияния на количество теряемого полимера не оказывают, тем самым свидетельствуя о наличии сильных внутримолекулярных связей в структуре исследуемого полимера.

После экстракции образцы технических сукон исследовались на водопоглощение, воздухопроницаемость, удлинение при разрыве и грибостойкость. Перечисленные свойства как до, так и после влажных обработок имели близкие значения (таблица 1), свидетельствуя тем самым об их устойчивости к длительному воздействию водных сред.

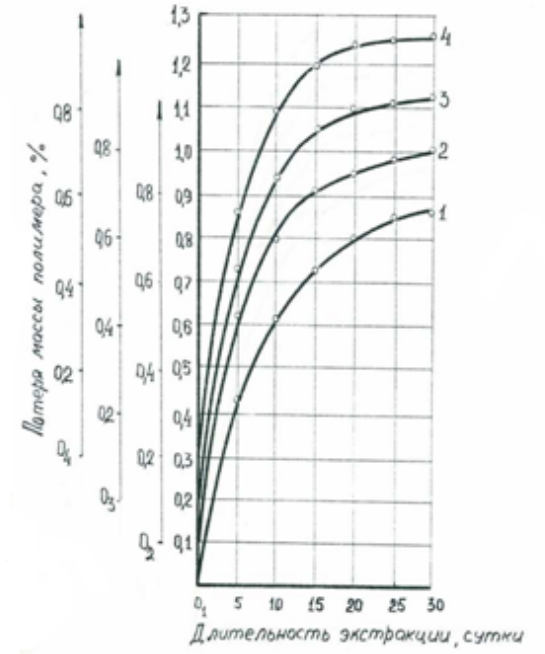


Рисунок 1 – Кинетика вымывания полимера, образованного смолой Книтекс и латексом АБП-40, в процессе экстракции модельных пленок:
1 – дистиллированной водой и растворами;
2-превоцелла WOFP -100;
3 – уксусной кислоты;
4 – кальцинированной соды.

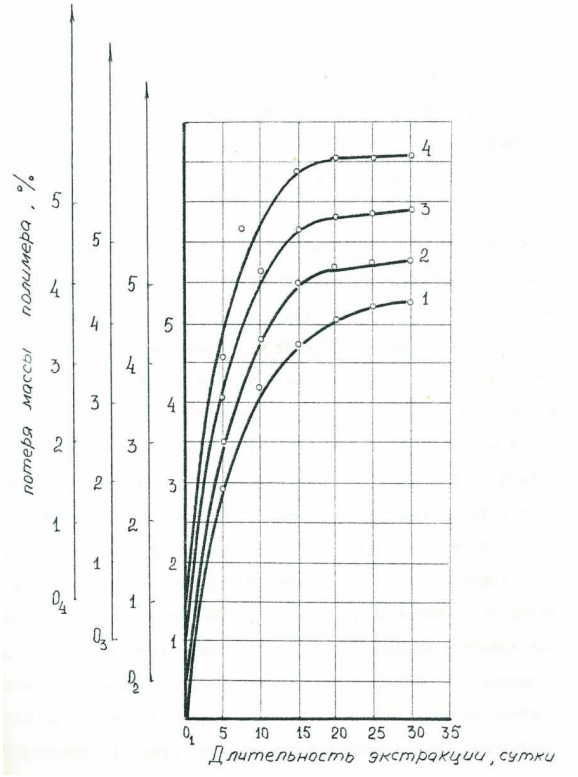


Рисунок 2 – Кинетика вымывания полимера, образованного смолой Книтекс и латексом АБП-40, в процессе экстракции сукон: 1 - дистиллированной водой и растворами
2 – превоцелла WOFP – 100;
3 – уксусной кислоты;
4- кальцинированной соды.

Таблица 1 – Изменение эксплуатационных свойств технических сукон, прошедших совмещенную технологическую операцию после экстракции в течение 30-ти суток.

Условия проведения экстракции	Водопог-лощение, %	Воздухо-проница-емость, дм^3/м^{2}с	Удлинение при разрыве по утку %	Грибо-стойкость, балл (по ГОСТ 9.802-84)
Исходный образец до экстракции	214	411	27,1	0
Вода дистиллированная 70°С	211,7	408,2	26,8	0
Раствор уксусной кислоты, pH 4, 70°С	211,6	408	26,а	0
Раствор кальцинированной соды, pH 9, 70°С	210,8	406,9	26,7	0
Раствор превоцеллаW-OFP-100, 70°С	211,4	407,5	26,9	0

Таким образом, обработка составом: эпоксидная смола-оловоорганический латекс может быть рекомендована для аппретирования технических сукон для прессовой части бумагоделательных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хазанов Г.И. Исследование возможности совмещения антимикробной отделки с аппретированием сукон для прессовой части бумагоделательных машин //сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы промышленности товаров народного потребления» Международного научно-технического Форума «Первые международные Косыгинские чтения» (11-12 октября 2017 года). Том 1. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. – с. 141-143.

2. Хазанов Г.И., Борисов Д.И., Тошходжаев С.Н. Влияние совмещенной отделки на физические, физико-механические и гигроскопические свойства технических сукон // сборник трудов 16 Всероссийской научно-технической конференции «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: проблемы, пути и решения», секция «Техника и технология: опыт, традиции, инновации». Часть 2. Ростов-на-Дону: издательство Южного университета ИУБиП, 2018. – с. 275-277.

3. Математическое описание интенсифицированных процессов экстрагирования технологических загрязнений из плоских волокнистых материалов/ М. К. Кошелева, А. П. Булеков, В. Т. Казуб, М. З. Цинцадзе // Промышленные процессы и технологии. 2021. No 1. С. 28 – 36 DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-28-36

УДК 664.8.047:538.911 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-270-273

КИНЕТИКА ВЛАГОПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПЕРИОДИЧЕСКИМ ВЛАГОПОДВОДОМ
KINETICS OF WATER ADSORPTION FOR HYDROTHERMAL TREATMENT OF DISPERSED MATERIALS WITH PERIODIC WATER SUPPLY

Калашников Геннадий Владиславович, Бунин Евгений Сергеевич, Макеев Сергей Владимирович
Gennady V. Kalashnikov, Evgeny S. Bunin, Sergey V. Makeev

Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, Воронеж
The Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh
(e-mail: kagen5@yandex.ru)

Аннотация: Выполнен анализ кинетики процесса влагопоглощения дисперсными материалами при гидротермической обработке на основе изученных кинетических закономерностей для растительного сырья и периодического влагоподвода. Получены зависимости для интенсивности распыливания жидкости при гидротермической обработке материалов с периодическим влагоподводом и разработано комбинированное оборудование для влагопоглощения и сушки с использованием переменного влаготеплового воздействия.

Abstract: The analysis of the kinetics of the process of moisture adsorption by dispersed materials during hydrothermal treatment is carried out on the basis of the studied kinetic regularities for plant raw materials and periodic moisture supply. Dependences have been obtained for the intensity of liquid spraying during hydrothermal treatment of materials with periodic moisture supply, and combined equipment has been developed for moisture adsorption and drying using variable moisture-thermal action

Ключевые слова: влагопоглощение; увлажнение; оборудование; переменный влагоподвод; дисперсный материал.

Keywords: moisture adsorption; humidification; equipment; variable moisture supply; dispersed material

Совершенствование и создание нового технологического оборудования, реализующего процессы влагонасыщения и влагоудаления при обработке сырья в химической, пищевой,

фармацевтической и смежных с ними отраслях промышленности, требуют дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования кинетики процессов [1-3].

Гидротермическая обработка (гидратация, увлажнение, мойка, бланширование, пропитка, напыление раствора и т.д.) дисперсных материалов отличается высокими удельными расходами энергетических и материальных потоков, трудоемкостью процесса, значительными энергозатратами существующего оборудования и длительностью процесса, определяющей в большой степени качество готового изделия [2-4]. При этом процесс сушки определяет качество готового изделия, продолжительность обработки, рентабельность производства, степень энерго- и ресурсосбережения аппаратурно-технологических линий [2].

Основными требованиями при обеспечении процесса влагопоглощения являются: повышение тепловой эффективности обработки при реализации с взаимосвязанным процессом сушки, снижение энергозатрат, сокращение продолжительности обработки и обеспечение высокого качества готовых изделий.

Одним из направлений интенсификации процесса влагопоглощения при гидротермической обработке дисперсных материалов является использование осциллированного тепловлагоподвода, обеспечивающего получение с заданными свойствами готового изделия высокого качества [1, 2].

Влияние осциллированного тепло- и влагоподвода на процесс гидротермической обработки сырья обуславливается интенсивностью периодического подвода внешних потоков и их взаимодействием с частицами сыпучего материала [1-5].

Целью данной работы является определение кинетических закономерностей процесса влагопоглощения дисперсными материалами при их гидротермической обработке на основе анализа интенсивности периодического влагоподвода для разработки технологического оборудования энергоэффективных процессов влагопоглощения и сушки с использованием переменного периодического влаготеплового воздействия.

Для процесса гидротермической обработки с периодическим распыливанием жидкости считаем, что интенсивность распыливания показывает удельное количество жидкости в единицу времени на единицу площади орошаемой поверхности газораспределительной решетки

$$i = \frac{G_2}{S} = \left(\frac{g}{\tau_0'} \cdot f \cdot \tau_0 \right) \Big/ S, \qquad (1)$$

где G_2 – расход жидкости за время τ_0 гидротермической обработки, кг/с; S – площадь орошаемой поверхности газораспределительной решетки, м^2; g – количество жидкости, распыливаемое в течение периода $\left(\tau_0' + \tau_0''\right)$, кг/период; τ_0', τ_0'' – продолжительности, соответственно, подачи жидкости и теплоносителя, с; f – частота распыливания жидкости, Гц.

Величина интенсивности распыливания жидкости при постоянном ее количестве на единицу массы продукта в процессе гидротермической обработки определяется продолжительностью распыливания подачи жидкости за один период.

Скважность распыливания жидкости при гидротермической обработке составляет $s = \tau_0' / \left(\tau_0' + \tau_0''\right)$, поэтому

$$s = \frac{\tau_0'}{1/f} = f \cdot \tau_0' \qquad (2)$$

Обозначим величину плотности орошения жидкостью единицы площади газораспределительной решетки за время τ_0 гидротермической обработки j. Тогда, с учетом удельной нагрузки на газораспределительную решетку, для интенсивности распыливания жидкости справедлива зависимость

$$i_2 = \left(1/\tau_0'\right) \cdot j = \left(j/s\right) \cdot f \qquad (3)$$

Следовательно, в процессе гидротермической обработки материалов с периодическим влагоподводом интенсивность тонко-дисперсного распыливания жидкости прямо пропорциональна произведению величины плотности орошения единицы площади

газораспределительной решетки и частоты подачи жидкости, и обратно пропорциональна скважности подачи жидкости.

Экспериментальные исследования процесса гидротермической обработки производились при атмосферном давлении с осциллированной подачей потоков теплоносителя и распыливаемой жидкости при различных гидродинамических режимах слоя растительного сырья, которое является капиллярно-пористым коллоидным материалом [2-7].

После периода прогрева последующие стадии обработки сырья и многоступенчатой сушки осуществлялись при пульсационных режимах подачи теплоносителя. Слой сырья пронизывался на газораспределительной решетке восходящим потоком теплоносителя и тепловое воздействие использовалось со ступенчатым характером изменения скорости и температуры [1, 2].

В процессе гидротермической обработки с увеличением интенсивности распыливания воды до $9{,}0\cdot10^{-7}$ кг/(с·м^2) и продолжительности обработки 120 с, например, рисовой крупы, влагосодержание повышается до 0,35 кг/кг и имеет наиболее высокую скорость влагоприращения на начальном этапе при периодическом влагоподводе (рис. 1).

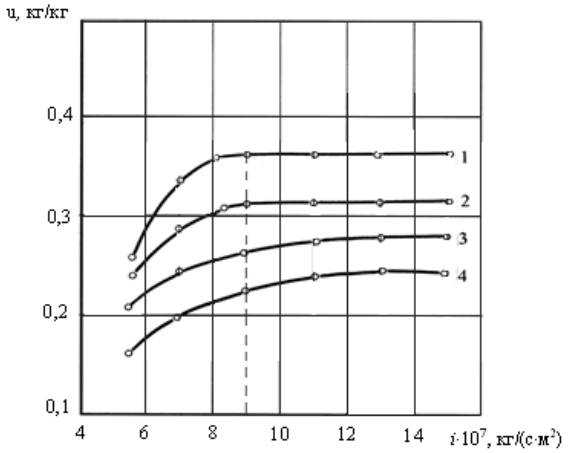


Рисунок 1 – Зависимость влагосодержания от интенсивности распыливания воды при различной продолжительности (τ_0, с): 1 - 120; 2 - 90; 3 - 60; 4 – 30

В начальном периоде гидротермической обработки дисперсного материала происходит впитывание свободной жидкости поверхностными слоями частицы за счет высокого капиллярного потенциала микро- и макрокапилляров, расположенных у поверхности. В порах частиц, после начального их заполнения влагой, образуется защемленный воздух, давление которого постепенно уравновешивает силу капиллярного впитывания жидкости. Происходит замедление скорости влагопоглощения материалом. При этом совместно с капиллярным впитыванием жидкости происходит молекулярная адсорбция влаги на стенках капилляров с образованием мономолекулярных слоев в порах, расположенных ближе к центру частиц.

В процессе обработки частицы происходит вытеснение защемленного воздуха и за счет увеличения адсорбируемой влаги на стенках мономолекулярный слой утолщается с образованием полимолекулярного слоя. В дальнейшем полимолекулярные слои сливаются, обеспечивая заполнение влагой в начале микрокапилляры, а затем макрокапилляры.

Процесс адсорбирования влаги осуществляется за счет жидкости, непосредственно впитываемой капилляром, и сопровождается повышением капиллярного давления и снижением потенциала влагопереноса (рис. 1).

Для обеспечения энергоэффективных процессов влагопоглощения и влагоудаления разработано тороидальное и роторное оборудование непрерывного действия для термолабильных изделий [1, 2].

Основные преимущества по сравнению с отечественными и зарубежными аналогами состоят в снижении потери теплоты и удельных энергозатрат за счет замкнутого цикла

использования теплоносителя (эксергетический КПД составляет до 0,75) при наиболее полной полезной утилизации его тепла на различных технологических стадиях производства [2, 4].

На основе экспериментальных исследований кинетических закономерностей гидротермической обработки дисперсного сырья разработаны комбинированные способы влаготеплового воздействия с переменным тепло - и влагоподводом, предложены конструкции оборудования непрерывного действия для влагопоглощения и сушки, составлены алгоритмы управления технологическими процессами переработки на примере растительного сырья [1, 2, 8-10]

Выводы

Определены закономерности влагопоглощения при осциллированной гидротермической обработке дисперсных материалов с использованием переменного периодического влагоподвода. В результате исследований процесса гидротермической обработки дисперсных материалов отмечено, что переменный пульсационный режим подвода жидкости и теплоносителя с различной их интенсивностью позволяет обеспечить периодическое воздействие влаги и теплоты на частицы, снизить расход теплоносителя и исключить переувлажнение поверхности частиц, что способствует лучшему тепло- и массообмену за счет интенсивного обновления межфазной поверхности, сокращению продолжительности обработки, повышению эффективности использования энергетического потенциала теплоносителя и качества готового изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калашников Г.В., Черняев О.В. Энергоэффективная комбинированная конвективная сушка дисперсных материалов // Химические волокна. 2019. № 4 (51). С. 70-73

doi 10.1007/s10692-020-10098-6

2. Калашников Г.В., Остриков А.Н. Ресурсосберегающие технологии пищевых концентратов. Воронеж: ВГУ, 2001. 355 с.

3. Калашников Г.В. Интенсификация влаготепловой обработки сыпучего пищевого растительного сырья // Агропромышленный комплекс на рубеже веков: материалы международной научно-практ. конф. Воронеж: «ВГАУ им. императора Петра I», 2015. Ч. II. С. 184-192.

4. Калашников Г.В. Эксергетическая оценка явлений тепло и массопереноса при влаготепловой обработке пищевого сырья// Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств: материалыII Международной научно-практ. конф. Воронеж: ФГБОУ ВО«ВГУИТ», 2016. – С. 317-321

5. Калашников Г.В. Интенсивность влаготеплового воздействия при осциллированной влаготепловой обработке сыпучих продуктов// Вестник ВГТА. 2009. № 1. С. 39-44

6. Калашников Г.В., Черняев О.В. Энергоэффективное технологическое оборудование для сушки растительного сырья// Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практ. конф. Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГАУ им. императора Петра I», 2018. – С. 85-89.

7. Остриков А.Н., Калашников Г.В., Шевцов С.А. Основные закономерности тепло- и массообмена в процессе сушки пищевого растительного сырья перегретым паром // Изв. вузов Пищевая технология. 2014. № 4. С. 87–93

8. Калашников Г. В. Способ влаготепловой обработки сыпучих продуктов с пульсационными режимами и устройство для его реализации // Хранение и переработка сельхозсырья. 2003. № 9. С. 47–49

9. Калашников Г.В., Черняев О.В.Ленточная сушилка. Пат. РФ №2702940,МПК-7:F26B F26B 17/04. Опубл. 14.10.2019 // Изобретения. Полезные модели. 2019. № 29

10. Калашников Г.В., Литвинов Е.В., Родионова А.Е., Рябикова С.А. Способ влаготепловой обработкой дисперсных материалов с использованием переменного комбинированного конвективно-СВЧ энергоподвода. Пат. РФ №2640848,МПК-7:F26B 25/22.Опубл. 12.01.2018 // Изобретения. Полезные модели. 2018. № 2

УДК 661.718.5:546.08-31.07 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-274-282

МАЛООТХОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТЫХ ОКСИДОВ И ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
LOW-WASTE TECHNOLOGY FOR PRODUCING HIGH PURITY OXIDES AND OXIDE COMPOSITIONS

Гринберг Евгений Ефимович*, Левин Юрий Исаакович,**
Мошняга Мария Александровна, Рябцева Марина Викторовна**,**
Табунова Наталия Георгиевна**
Evgeny E.*, Grinberg Yuri I. Levin,**
Maria A. Moshnyaga, Marina V. Ryabtseva**,**
Natalia G. Tabunova **

**Международный институт проблем химизации современной экономики*
Россия, Москва
**International Institute for the Problems of Chemicalization of the Modern Economy*
Russia, Moscow
(e-mail: ireon@mail.ru)
***АО «Экос-1», Россия, Москва*
***JSC «Ekos-1»*
(e-mail: jura_levin@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены вопросы технологии получения высокочистых летучих алкоголятов элементов III-IV групп Периодической системы, используемых в процессах наукоемких производств, а также оксидных композиций на основе алкоголятов кремния.

Abstract: Some aspects of technology of high purity volatile alcohol derivatives of III-IV Groups elements of Periodic system producing are observed. This compound are widely used in CVD-processes.

Ключевые слова: алкоголяты элементов, *глубокая очистка*, *примеси, оксиды*
Keywords: alcoholates of elements, *high purification*, *impurities, oxides*

Получение высокочистых оксидов элементов и оксидных композиций на их основе, содержащих кремний, алюминий, германий, сурьму и другие элементы для оптической и волоконно-оптической техники остается актуальной задачей современной химической технологии. «Золь-гель»-технология, основанная на использовании в процессах жидко- или парофазного гидролиза в качестве исходных соединений алкоксиды (алкоголяты) элементов в течение ряда лет является объектом плодотворных исследований и технологических разработок в области экологически чистой химии [1 - 4].

Наиболее широко используемым исходным веществом в этих работах является тетраэтоксисилан (ТЭОС) – промышленно выпускаемый реагент. Необходимо было рассмотреть вопросы расширения сырьевой базы с использованием разнообразных высокочистых (C_1–C_4) – алкоксипроизводных элементов: кремния, бора, алюминия, германия. Исследована возможность очистки алкоголятов с помощью дистилляционно-ректификационных, сорбционных, экстракционных и других методов. Было определено, что ионообменные методы и соосаждение примесей при частичном гидролизе не эффективны. В работе [1] была предложена очистка ТЭОС путем обработки его увлажненным азотом с последующей ректификацией или дистилляционной разгонкой, однако полная характеристика достигнутого эффекта очистки не приведена. Глубокую очистку алкоксисиланов от кислых примесей проводили, например, путем обработки карбонатами щелочных металлов, переводящими «кислые» компоненты в нелетучие соединения [2]. Описан метод очистки ТЭОС с помощью комплексообразователя – диэтилдитиокарбамата натрия, вводившегося в систему в виде тонкодисперсной суспензии или спиртового раствора [1].

Нами были исследованы методы синтеза соединений как стадия выделения примесей металлов. Большинство методов очистки применяли как раздельно, так и в сочетании друг с другом. Применение в более ранних работах разнообразных физико-химических методов очистки [1,2,5,6] позволило создать технологии получения ряда оксидов с содержанием примесей металлов до nx(10^{-5} - 10^{-6})% масс. Однако сейчас требуется дальнейшее повышение их чистоты.

В настоящей работе очистку ТЭОС проводили последовательной обработкой его водно-аммиачным раствором, содержащим комплексообразователь, отделением водного слоя, сорбцией на катионите и ректификацией на насадочной колонне при нормальном или пониженном давлении. Результаты постадийной очистки ТЭОС и качество получаемого продукта представлено на рисунке 1.

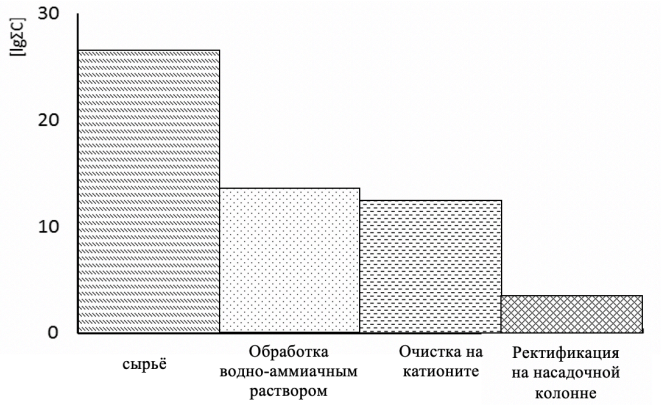


Рисунок 1 – Распределение примесей металлов в ТЭОС на различных стадиях.

В настоящей работе были изучены также процессы соосаждения примесей при частичном гидролизе алкоголятов кремния и германия и очистка на активированных углях БАУ. При этом указанные процессы не показали существенной эффективности, приведенной в литературных источниках [1]. Кроме того, в технологическом плане эти методы значительно усложняют технологический процесс и требуют дополнительного оборудования для высокоэффективной фильтрации или центрифугирования.

(C_3–C_4)-алкоксиды кремния синтезировали взаимодействием тетрахлорида кремния с соответствующими спиртами в присутствии аммиака в качестве акцептора выделяющегося хлористого водорода. Полученные смеси фильтровали и выделяли целевые продукты дистилляцией с последующей ректификацией. Аналогично получали (C_2–C_4)- алкоксипроизводные германия [5]. Выход реакции по германию составлял 95-96%. Образующиеся реакционные смеси фильтровали от хлорида аммония. Хлорид аммония со следами германия передавали на вторичную переработку с целью выделения германия. Жидкую фазу алкоголятов подвергали дистилляции с целью выделения избыточного спирта и растворенного хлорида аммония с последующей ректификацией под пониженным давлением.

(C_2–C_4)-алкоксиды бора синтезировали взаимодействием треххлористого бора со спиртами**.** В ходе реакции образуется расслаивающаяся система, в одном из слоев которой содержится триалкилборат, а в другой – спирт, насыщенный хлористым водородом. Характерная диаграмма состояния такой системы на основе триэтилбората, этанола и хлористого водорода рассмотрена в работе [5]. Аналогичные системы образуются при взаимодействии трихлорида бора с другими спиртами жирного ряда. В таблице 1 представлены коэффициенты распределения примесей металлов между «спиртовой» и «эфирной» фазами. Их значения свидетельствуют об эффективности очистки на стадии синтеза. Подобные коэффициенты обусловлены образованием растворимых в спиртах хлористоводородных комплексов хлоридов металлов. Проведение процесса в условиях существования двухфазной системы позволяет уже на стадии синтеза получить продукт с содержанием примесей металлов на уровне nx(10^{-5} – 10^{-6}) % масс. Отделяемый «эфирный» слой подвергали десорбционной очистке от хлористого водорода и ректификации.

Алкоголяты алюминия синтезировали взаимодействием металлического алюминия со спиртами в присутствии катализатора [7].

Таблица 1 - Коэффициенты распределения примесей между фазами [12]

Примесь	Fe	Ni	Cr	Mn	Co	Cu	Sn	Pb	Al	Mg	V
Коэффициент распределения	1000	267	20	1000	100	1000	400	1,5	6,7	16	40

Образующиеся алкоголяты алюминия подвергали вакуумной дистилляции при остаточном давлении 1-3 мм рт. ст. Основной примесью, лимитирующей очистку, является кремний. Он является «генетической» примесью, т.е. содержащейся в значительном количестве в исходном алюминии. Следует отметить, что в результате синтеза значительная часть кремния образует смешанный алкоголят кремния-алюминия, содержащий фрагменты типа Si-O-Al [8]. Соединения, содержащие подобные фрагменты, обладают летучестью, близкой к летучести димеров трехзамещенных алкоголятов алюминия, что затрудняет очистку алкоголятов алюминия от кремния.

Тетрабутоксититан технической квалификации очищали вакуумной дистилляцией при остаточном давлении 0,5-2 мм рт. ст. с предварительной термообработкой [7].

Алкоголяты редкоземельных металлов (Y, Eu и др.) синтезировали взаимодействием их хлоридов в спиртовом растворе с металлическим натрием с последующим выделением хлорида натрия фильтрацией или центрифугированием образующейся смеси.

Были проведены эксперименты по определению возможности кристаллизационной очистки алкоголятов [9]. Однако этот метод также оказался недостаточно эффективным, поскольку многие алкоголяты, в особенности соединения РЗЭ и алюминия, не имеют четкую температуру плавления, а коэффициенты распределения примесей в системе «жидкость-твердое» для других близки к 1.

Гидролиз очищенных алкоголятов проводили в кварцевых реакторах высокочистой водой или водно-аммиачными растворами.

Термообработку высушенных продуктов гидролиза алкоголятов кремния, алюминия, смесевых композиций проводили в печи резистивного нагрева с регулируемой скоростью подъёма температуры в кислородсодержащей атмосфере с контролируемым содержанием в ней гетерогенных частиц. Для выбора условий термообработки был проведен ДТА полученных продуктов. На основании этого анализа были выбраны режимы термообработки полученных продуктов гидролиза. При последовательном отщеплении летучих компонентов гидролизатов микрочастицы спекаются в крупные агломераты. Для предотвращения этого проводили виброперемешивание, что позволило избежать спекания и получать продукт с грануляционным составом на уровне 5-10 мкм.

Разработана схема получения высокочистых оксидов и оксидных композиций, представленная на рисунке 2. Она включает модули синтеза, химической, сорбционной и дистилляционно-ректификационной очистки алкоголятов, узлов смешения, гидролиза алкоголятов и выделения твердой фазы, сушки и термообработки и регенерации спиртов. Полученные на стадии регенерации спирты были использованы для повторного синтеза алкоголятов, что существенно удешевляет производство в целом. Однако, в случае использования алкоголятов, имеющих различные углеводородные радикалы, целесообразно не проводить регенерацию спиртов, а использовать образующиеся водно-спиртовые смеси в качестве растворителей или стеклоомывающих жидкостей. С использованием предложенной схемы были получены партии продуктов особой чистоты, качество которых представлено в таблице 2.

Исследование влияния стойкости конструкционных материалов на чистоту продуктов показало достаточно сильную зависимость от условий проведения процессов, в особенности высокотемпературных, на конечных стадиях.

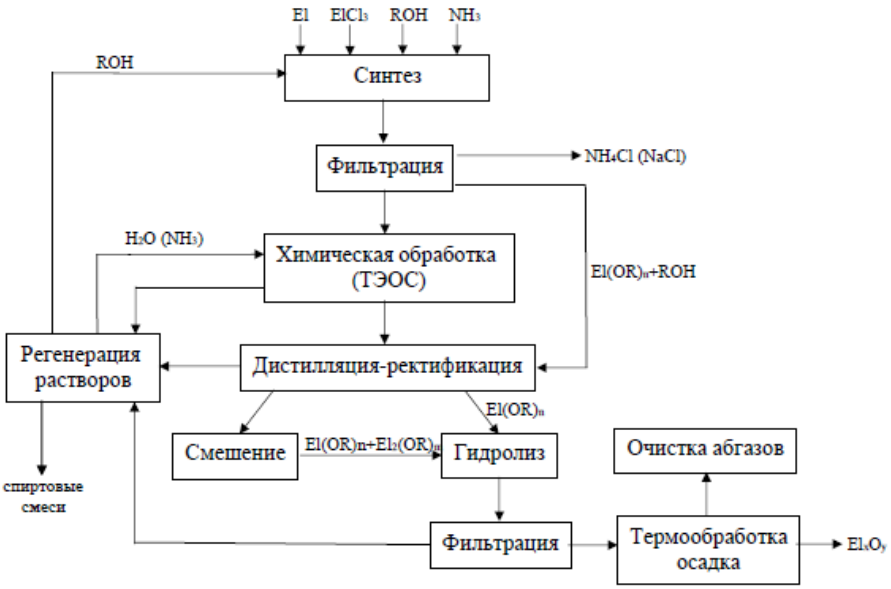


Рисунок 2 – Схема получения высокочистых оксидов и оксидных композиций.

Таблица 2 – Содержание примесей в оксидах и оксидных композициях.

Вещество	Содержание примесей, % масс. x 10^{-7}							
	Fe	Cr	Ni	Mg	Ca	Mn	Si	Al
SiO_2	5	0,1	0,1	3	1	1	-	5
Al_2O_3	7	1	1	4	2	1	10	-
SiO_2 -Al_2O_3(1:1)	6	2	3	5	10	2	-	-
SiO_2 –GeO_2(1:1)	5	3	3	5	8	1	-	5

Ранее в технологии веществ высокой чистоты преобладало мнение о преимуществе «гибких» схем получения индивидуальных веществ с использованием одной и той же аппаратуры для глубокой очистки различных веществ. [10]. Для веществ, получаемых на одном и том же оборудовании в различных технологических циклах текущие технологические затраты времени подготовки аппаратуры, в особенности на конечной стадии глубокой очистки, и потери вещества при отмывке аппаратуры сводят преимущества подобных схем на нет. При этом зачастую невозможно достичь требуемого уровня примесного «фона» за счет сорбции предыдущего продукта на поверхности аппаратуры. Поэтому на финишной стадии глубокой очистки веществ должен применяться принцип «одно вещество– одна установка».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябенко Е.А., Технология диоксида кремния высокой чистоты Дисс. докт. техн. наук, ГНИИХТЭОС, М., 1983 г., 312 с.

2. Кузнецов А.И., Рябенко Е.А., Расторгуев Ю.И. и др., Методы получения оксида алюминия особой чистоты. М.: НИИТЭХИМ, 40 с.

3. Беляков А.В., Лемешев Д.О., Лукин Е.С. и др., Оптически прозрачная керамика на основе оксида иттрия с использованием карбонатных и алкоксидных прекурсоров // Стекло и керамика. 2006. № 8. с. 17 – 19.

4. Гринберг Е.Е., Сараджев В.В., Левин Ю.И., Рябенко Е.А. Получение тонкодисперсного оксида алюминия гидролизом изопропилата алюминия// ЖПХ, 2002. №2. с.153 -155.

5. Черная Н.Г., Технология особо чистых алкоксидов бора и германия, Дисс. канд. хим. наук, ИРЕА, М., 1990 г., 157 с.

6. Беляев Е.А., Рябенко Е.А., Очистка тетраэтоксисилана водным раствором аммиака // Химическая промышленность сегодня. 2012. №10. с. 18 - 20.

7. Стрельникова И.Е., Особо чистые алкоголяты металлов для получения оксидных систем. Дисс. канд. хим. наук, ИРЕА, М., 2005 г., 99 с.

8. Ретивов В.М., Совершенствование технологии неорганических веществ особой чистоты на основе исследований химических форм примесных компонентов, Дисс. канд. хим. наук, ИРЕА, М., 2013г. 188с.

9. Новожилов В.А., Аллахвердов Г.Р., Ефремов А.А., Гринберг Е.Е., О возможности кристаллизационной очистки элементоорганических соединений// Труды ИРЕА, 1985. №47. с. 36 – 39.

10. Рябенко Е.А., Блюм Г.З., Ефремов А.А.и др. Принципы создания гибких технологий особо чистых веществ на основе блочно-модульных установок // Высокочистые вещества. 1990. №6. с. 12-28.

УДК 681.121.89; 533.6.08 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-278-286

НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ РАСХОДА ГАЗА В ГТД
NEW APPROACH TO GAS FLOW MEASUREMENT IN GTE

Сухинец Жанна Артуровна*, Гулин Артур Игоревич,**
Валямова Ольга Олеговна**
Zhanna A. Sukhinets*, Artur I. Gulin, Olga O. Valiamova****

**Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, Уфа*
Ufa State Aviation Technical University, Russia, Ufa
(e-mail: sukhinets@ mail.ru)
***Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Уфа*
Ufa State Petroleum Technological University, Russia, Ufa
(e-mail: gulin1940@gmail.com)

Аннотация: Представлены разработанные быстродействующие устройства: измерения температуры, обладающее высоким быстродействием, на два - три порядка выше термопар, что позволяет измерять мгновенные значения температур в камерах сгорания газотурбинных двигателей, и расходомера газа на акустических мультивибраторах, что позволит инструментальным способом выявлять предпомпажные явления.

Abstract: The developed high-speed devices: temperature measurement with high performance two to three orders of magnitude higher thermocouple allows to measure the instantaneous temperatures in the combustion chambers of gas turbine engines, and gas flow meter acoustic multivibrators, which will allow an instrumental method to identify precompany phenomenon.

Ключевые слова: температура, расход газа, быстродействие, акустический мультивибратор, пьезоэлемент, помпаж

Keywords: temperature, gas consumption, speed, acoustic multivibrator, piezoelectric element, surge.

Камера сгорания – один из важнейших элементов ГТД, от совершенства которой в значительной мере зависят его надежность и экономичность. Основное назначение камеры сгорания – преобразование химической энергии топлива в тепловую энергию. КПД и мощность ГТД увеличиваются с ростом температуры газа в камере сгорания.

Наиболее распространенной формой газодинамической неустойчивости является помпаж. При помпаже возникают периодические колебания давления и расхода воздуха [1] или топливной смеси в продольном направлении, характеризующиеся малой частотой и большой амплитудой. Согласно испытаниям на стендах, помпаж развивается за время порядка 0,2 с. Практически все существующие алгоритмы защиты осевого компрессора от помпажа [2] рассчитаны не на предупреждение возникновения неустойчивости в камере сгорания и

компрессоре, а на устранение и уменьшение вредного воздействия уже начавшегося помпажа. Работа двигателя в режиме помпажа быстро приводит к его разрушению из-за недопустимого повышения температуры газов перед турбиной. Рост температуры газов может достигать нескольких сот градусов в секунду, и время принятия решения экипажем ограничено. Он может возникнуть на больших сверхзвуковых скоростях полета при значительном увеличении количества воздуха, подводимого к двигателю, по сравнению с расходом воздуха через двигатель, то есть когда пропускная способность диффузора значительно превышает потребности двигателя в расходе воздуха. Создание систем для динамических измерений температуры и расходов газов ГТД позволит устранит этот пробел.

Основное требование к системе управления ГТД является высокая точность поддержания заданной температуры на установившихся и переходных режимах [3] для получения требуемых характеристик и сохранения ресурса двигателя. Величина неравномерности поля температур ГТД, как перед турбиной, так и за турбиной по радиусу и по окружности [4] может составлять порядка 250 °С и изменяется в зависимости от режима работы двигателя. Наблюдается также нерегулярность поля температур газа, т.е. в одной и той же точке измерения при неизменном режиме работы двигателя температура газа во времени изменяется по произвольному закону. Все это вызывает существенные трудности построении измерителей с компенсацией инерционности средства измерения температурного поля на входе и выходе ГТД [5]. Вызвано это дискретностью при подаче топлива в ГТД и высокой турбулентностью воздушного потока. Следовательно, это исключает возможность абсолютно точного измерения температуры газа ГТД существующими средствами. Именно поэтому при измерении температуры рассматриваются не точные, а среднемассовые и усредненные показатели. Распределение температур в сечении двигателя представлено на Рис. 1.

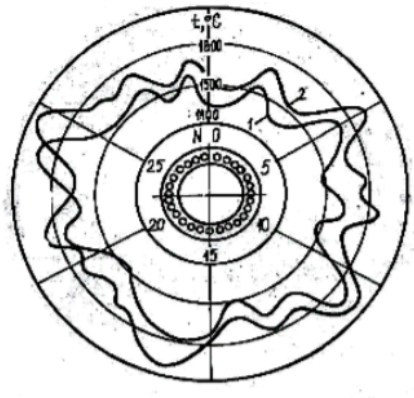


Рисунок 1 – Распределение температур в сечении двигателя

Можно констатировать, что в настоящее время нет прямых быстродействующих методов измерения температуры газов ГТД, позволяющих. создавать системы управления вблизи функциональных, прочностных и **температурных** ограничений [6,7] с предотвращением выхода параметров работы двигателя за пределы допустимых значений за десятые доли секунд. Таким образом, работы, посвященные исследованию и созданию систем для динамических измерений температуры и расхода газов ГТД являются весьма актуальными.

Струйные системы измерения температуры и расхода имеют большие перспективы [8], т.к. обладают высоким быстродействием, нечувствительностью к электромагнитным и радиационным полям, простотой конструкции и высокой надежностью. В [9] представлены результаты формирования регрессионной модели для вычисления расхода воздуха через газотурбинный двигатель лишь на стендовых испытаниях, что говорит об отсутствии прямых методов измерения расхода на борту.

Для решения задач оптимального управления авиационным двигателем начали активно применять цифровые системы с принципиально новыми методами управления и диагностики ГТД, в которых используются алгоритмы расчета в реальном масштабе времени основных параметров ГТД в том числе расхода воздуха.

Предлагаемое устройство измерения расхода газа Q состоит (Рис. 2) из первичного преобразователя BK (акустического мультивибратора), устанавливаемого в газовый поток, в котором, возбуждаются акустические колебания с частотой nf_A, преобразуемые с помощью вторичного пьезоэлектрического преобразователя BP в соответствующие электрические колебания с частотой nf, которые в свою очередь поступают на функциональный преобразователь частота-код ADC. Функциональный преобразователь [9] представляет собой адаптивный селектор, выделяющий первую гармонику полигармонического сигнала, одновременно функционально преобразующий частоту в код, соответствующий измеряемой температуре. Блок обработки информации (БОИ) содержит микроконтроллер (МК) для вычисления расхода газа.

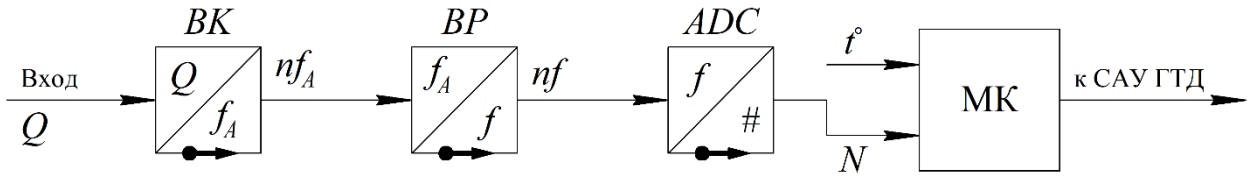
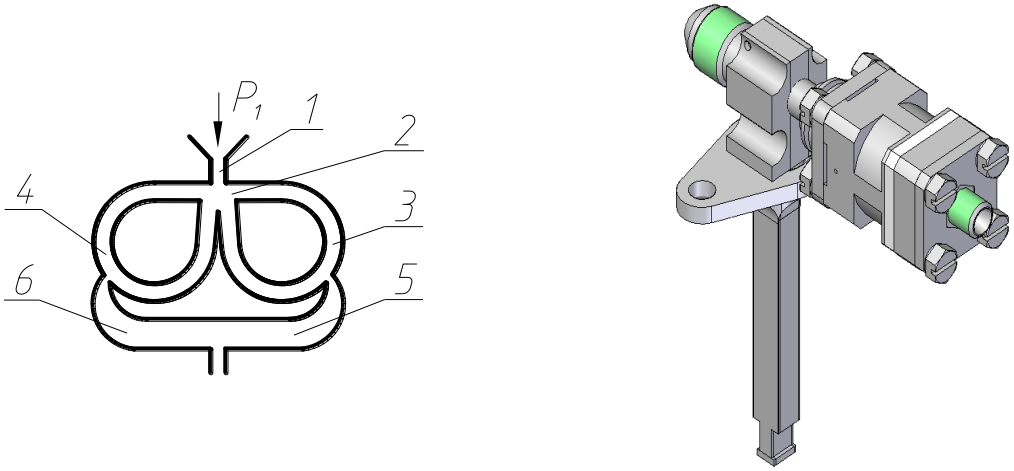


Рисунок 2 – Структурная схема измерения расхода газов

Использование акустического мультивибратора (АМ) в качестве первичного преобразователя имеют ряд преимуществ, таких, как выходной частотный сигнал, отсутствие подвижных частей, относительная простота конструкции, нечувствительность к пневмоударам. По типу обратной связи (ОС), обуславливающей автоколебательный режим работы АМ, выбирают [10] с внешней ОС (Рис. 3) и рассмотрим процесс автоколебаний. Поток, вытекающий из сопла питания 1, первоначально (вследствие имеющейся естественной не симметрии конструкции) отклоняется к одной из боковых стенок рабочей камеры 2, при этом повышается давление на входе, например, в канал ОС 3.



а) б)

Рисунок 3 – Акустический мультивибратор с внешней обратной связью (а)и его внешний вид (б)

Взаимодействие основного потока, вытекающего из сопла питания 1, с управляющим потоком, вытекающим из канала ОС 3, приводит к оттеснению основного потока от данной стенки и примыканию его к противоположной стенке и так далее. Таким образом, в каналах

ОС 3, 4 и в выходных каналах 5, 6 создаются колебания давлений с частотой, определяемой временными задержками развития процессов в рабочей камере 2 и каналах ОС 3 и 4.

Экспериментальные исследования различных АМ, устанавливаемые на посадочные места термопар, показали [11], что частота колебаний f в них, при прочих неизменных условиях, пропорциональна скорости распространения возмущений в газе, заполняющем рабочую полость и каналы ОС, то есть

$$f = \frac{\sqrt{kRT}}{\lambda}, \quad (1)$$

где: T–абсолютная температура торможения газа на входе в АМ;

R – газовая постоянная (для воздуха R= 287.14Д ж/(кг °K));

k– показатель адиабаты (для воздуха k = 1,4);

λ–длина волны акустических колебаний АМ, равная суммарной длине каналов обратной связи 3 и 4 датчика.

Динамическая погрешность датчика определяется как сложными тепловыми взаимодействиями (внутри и снаружи), так и внутренними газодинамическими и акустическими процессами.

Таким образом, в струйных расходомерах используется принцип создания аэродинамического генератора колебаний с частотой, пропорциональной расходу газа. Измеряется частота АМ, пропорциональная скорости (расходу) газа через устройство:

$$f = S_h \frac{Q}{V},$$

где S_h – число Струхаля, определяемое экспериментально;

Q – измеряемый расход;

V – объем резонансной камеры и каналов ОС.

В соответствии с [12], частота колебаний потока пропорциональна расходу через сопло АМ

$$Q = \mu S \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

где μ — коэффициент расхода; S — площадь поперечного сечения сопла; Δp — перепад давления; ρ — плотность измеряемой среды.

Для формирования установившегося течения, характеризующегося устойчивым режимом с акустическим числом Рейнольдса Re_a в линейной области, необходимы прямые участки определенной длины, исключающие наличие местных возмущений потока

$$Re_a = \frac{\rho c_0 A}{2\pi f b},$$

где c_0 – скорость звука в среде; A – амплитуда колебательной скорости; b – параметр диссипации, т.е. переход части энергии упорядоченных процессов в энергию неупорядоченных процессов, в конечном счёте — теплоту.

Несмотря на то, что ПЭП не является основным элементом определяющим технические и точностные характеристики ИД, к нему предъявляются ряд требований по чувствительности, необходимой полосе пропускания и выполнение условия - собственная частота резонанса должна находиться вне рабочего диапазона. Выполнение последнего условия необходимо [13] для предотвращения чрезмерного усиления второй и третьей гармоник, «заглушающих» информативный сигнал.

Вывод

Обнаружить предпомпажные явления, приближение частот колебаний газа к собственной резонансной частоте камеры, возможно контролируя температуру и расход внутри камер, устанавливая акустические мультивибраторы на два посадочных места штатных термопар

Новый подход по выявлению причин возникновения помпажа позволит создать САУ его предотвращения.

Разработанное устройство может быть использовано и для исследования теплообменных процессов в камерах сгорания вновь создаваемых ГТД, в том числе и под различные виды топлива, а также для выявления предпомпажных явлений.

Температура использования акустических мультивибраторов ограничивается материалом изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хадиев М.Б., Зиннатуллин Н.Х., Нафиков И.М. Механизм помпажа в центробежных компрессорах // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №8 – С. 262–266.

2. Кампсти Н. Аэродинамика компрессоров / Н. Кампсти – М.: Мир, 2000. – 664 с.

3. http://avia.pro/blog/regulirovanie-temperatury-gaza-v-gtd

4. https://studfiles.net/preview/731035/page:5/

5. Добрянский, Г.В., Мартьянова Г.С. Динамика авиационных ГТД – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.

6. Юнаков Л.П. Основы теории авиационных газотурбинных двигателей. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2013. 90 с.

7. Иноземцев, А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей энергетических установок. Т. 1. М.: Машиностроение, 2008. 208 с.

8. Сухинец Ж.А., Галиев А.Л., Гулин А.И. Дифференциальный способ измерения температуры газовых потоков с использованием струйно-акустических датчиков // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 10. С. 4–11.

9. Мельникова Н. С. Определение расхода воздуха через двигатель в полете в реальном масштабе времени для использования в перспективных законах управления / Вестник УГАТУ Уфа 2010 т.10, № 4 (39), С. 36-41.

10. Гулин А.И., Сухинец Ж.А. Функциональный частотомер номинальных значений синусоидальных сигналов для частотных датчиков // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2012. – № 9 – С. 33–37.

11. Залманзон Л.А. Теория элементов пневмоники. М.: Наука, 1969. – 508 с.

12. Золотаревский С.А. О применимости различных методов измерения расхода для коммерческого учета газа //Энергоанализ и энергоэффективность, № 2 (15), 2006.

14. Митько В.Н., Крамаров Ю.А., Панич А.А. Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении: Монография. – Ростов – на – Дону: изд–во ЮФУ. - 2009. – 240 с.

УДК 66.021.3 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-283-286

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАССООТДАЧИ ПРИ ДЕСОРБЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА
DETERMINATION OF MASS RATING COEFFICIENTS AT DESORPTION OF CARBON DIOXIDE

Моргунова Елена Павловна, Давидханова Мария Григорьевна
Elena P. Morgunova, Maria G. Davidkhanova

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Россия, Москва
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: morgun@muctr.ru, maria@muctr.ru)

Аннотация: Экспериментально определены коэффициенты массоотдачи в жидкой фазе при десорбции диоксида углерода из водного раствора. Проведено сравнение значений коэффициентов массоотдачи, рассчитанных различными способами, с величинами, полученными экспериментально.

Abstract: The coefficients of mass transfer in the liquid phase during the desorption of carbon dioxide from an aqueous solution are experimentally determined. A comparison is made of the values of the mass transfer coefficients calculated by various methods with the values obtained experimentally.

Ключевые слова: массоотдача, десорбция, пленочное течение, критерии подобия.
Keywords: mass transfer, desorption, film flow, similarity criteria.

Пленочное течение жидкостей под действием силы тяжести является перспективным для многих химико-технологических процессов. Создание устойчивых стекающих пленок жидкости на твердых поверхностях является эффективным и широко распространенным способом интенсификации массообменных процессов в системах «газ – жидкость». При использовании стекающих пленок высокие значения межфазных поверхностей можно получить при очень низком гидравлическом сопротивлении и высокой пропускной способности контактного устройства. Кроме того, благодаря малой толщине пленки жидкость занимает малый объем, что существенно при проведении процессов с большим тепловым эффектом, а также при работе со взрывоопасными веществами, т.к. лучше отводится тепло при меньшем единовременном объеме реакционной смеси. Именно поэтому пленочные массообменные аппараты широко используются в процессах абсорбции и десорбции, выпарки и ректификации.

В работе было проведено сравнение различных методов расчета коэффициента массоотдачи при пленочном течении жидкости для слаборастворимого газа на примере десорбции диоксида углерода из водного раствора. Ранее было получено аналитическое решение для пленки жидкости, стекающей по вертикальной поверхности длиной l [1]. Рассматривался стационарный процесс в отсутствии химической реакции для слаборастворимого газа при неглубоком проникновении в пленку жидкости. В результате решения уравнения конвективной диффузии была определена средняя плотность потока по длине пластины l.

$$N_{\text{ср}}=2c_0\sqrt{\frac{Dv_{max}}{\pi l}},$$

где $N_{\text{ср}}$- средняя плотность потока на длине пластины l; c_0 - начальная концентрация CO_2 в жидкой фазе; D – коэффициент диффузии распределяемого компонента в жидкости (для CO_2 в воде при 20°C $D = 1{,}8 \cdot 10^{-9}$ м^2/с); v_{max}- максимальная скорость стекания пленки.

Плотность потока, отнесенная к концентрации CO_2, представляет собой средний коэффициент массоотдачи $\beta_{\text{ср}}$:

$$\beta_{\text{ср}} = 2\sqrt{\frac{Dv_{max}}{\pi l}}$$

Это уравнение использовалось в работе для расчета коэффициента массоотдачи в жидкой фазе для системы «CO_2 – вода». Данные были получены при различных скоростях течения пленки. Проведено сравнение полученных значений с рассчитанными по критериальным уравнениям, полученным в работе [2] для колонн пленочного типа в интервале значений критерия Рейнольдса $300 < Re < 1600$. Критерий Рейнольдса для пленки

$$Re = \frac{4V_x\rho_{\text{ж}}}{\Pi\mu_{\text{ж}}},$$

Π – смоченный периметр равный: $\Pi = \pi\, d$.

Коэффициент массоотдачи может быть рассчитан по критериальным уравнениям через диффузионный критерий Шервуда:

$$\beta_x = \frac{Sh \cdot D}{\delta_{\text{пр}}}$$

$Sh -$ диффузионный критерий Шервуда; $\delta_{\text{пр}}$ – приведенная толщина пленки:

$$\delta_{\text{пр}} = \sqrt[3]{\frac{\mu_{\text{ж}}^2}{g\rho_{\text{ж}}^2}}$$

$$Sh = B \cdot Re^m \cdot Sc^{0,5} \cdot (\frac{\delta_{\text{пр}}}{l})^n$$

$Sc -$ диффузионный критерий Шмидта:

$$Sc = \frac{\mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} \cdot D}$$

Скорость процесса десорбции равна скорости абсорбции диоксида углерода водой из воздушно – газовой смеси, т.к. эти процессы протекают при одинаковых условиях (температуре, давлении, геометрических параметрах аппарата).

Количество компонента, переносимого из газовой фазы в жидкую, или наоборот:

$$J_m = \text{К}_x \cdot A \cdot \Delta X_{\text{ср}},$$

J_m – количество компонента, переходящего из одной фазы в другую, кг/с; $\text{К}_x -$ коэффициент массопередачи в жидкой фазе, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кг}/\text{м}^3}$ или м/с ; $A -$ поверхность контакта фаз, участвующих в процессе массообмена, м^2 ; $\Delta X_{\text{ср}}$ – средняя движущая сила процесса массопередачи, выраженная через концентрации в жидкой фазе, кг/м^3.

Данное уравнение использовали для определения поверхности контакта фаз в массообменном аппарате. Количество переносимого компонента J_m определяли по уравнению материального баланса:

$$J_m = V_x(x_{\text{н}} - x_{\text{к}})$$

$V_x -$ объемный расход жидкой фазы (воды), $\text{м}^3/\text{с}$; $x_{\text{н}}$, $x_{\text{к}}$ - содержание двуокиси углерода в воде в начале и в конце процесса десорбции, кг/м^3.

Равновесная концентрация двуокиси углерода на входе и выходе из колонны определялась по равновесной зависимости $x^* = f(y)$, где y - содержание двуокиси углерода в воздухе, кг/м^3. Для плохо растворимого газа $\text{К}_x \approx \beta_x$, который может быть рассчитан по основному уравнению массопередачи:

$$\beta_x = \frac{V_x}{A \cdot \Delta x_{\text{ср}}}$$

Эксперименты проводились на установке, включающей пленочную колонну и напорную емкость, в которой проводилось насыщение воды диоксидом углерода. Через распределитель, обеспечивающий равномерное распределение жидкости в виде тонкой пленки по периметру колонки, раствор подавался в колонну. Противотоком к жидкости в колонку подавался воздух с помощью воздуходувки. Трубчатая стеклянная колонка имела внутренний диаметр d= 20 мм и высоту l =750 мм, поверхность контакта:

$$A=\pi\cdot d\cdot l$$

где d внутренний диаметр и l длина трубки, м.

Отбиралось последовательно несколько проб жидкости для определения содержания диоксида углерода до десорбции и после. При допущении, что концентрация диоксида в воздухе раствора его пренебрежимо мала, т. е $x_н^* = 0$ и $x_к^* = 0$.

Средняя движущая сила $\Delta x_{ср} = \frac{x_н - x_к}{ln\frac{x_н}{x_к}}$.

Подставляя полученные величины в основное уравнение массопередачи

$$\beta_x = \frac{V_x(x_н - x_к)}{\pi\cdot d\cdot l\cdot \frac{x_н - x_к}{ln\frac{x_н}{x_к}}},$$

получаем выражение для расчета коэффициента массоотдачи :

$$\beta_x = \frac{V_x(x_н - x_к)}{\pi\cdot d\cdot l\cdot \frac{x_н - x_к}{ln\frac{x_н}{x_к}}} = \frac{V_x}{\pi\cdot d\cdot l}\cdot ln\frac{x_н}{x_к}$$

Диоксид углерода взаимодействует с водой с образованием слабо диссоциирующей угольной кислоты:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow 2H^+ + CO_3^-$$

Допускаем, что концентрация образующейся угольной кислоты, пропорциональна концентрации ионов водорода, а следовательно, и pH раствора. Тогда:

$$\beta_x = \frac{V_x}{\pi\cdot d\cdot l}\cdot 2{,}3\Delta\text{pH}$$

Сравнение данных, рассчитанных по теоретичеким и критериальным уравнениям, с экспериментальными представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных.

№ п/п	Vx $\cdot 10^6$ м^3/с	pH$_н$	pH$_к$	β_x экспер $\cdot 10^4$, м/с	$\delta_{пр}$ $\cdot 10^5$, м	Sc	Re	Sh	β_x $\cdot 10^4$, м/с (по кр. ур.)	β_x $\cdot 10^4$, м/с (теор)
1	2.78	5,8	5,4	0,43	4,67	556	177	2,19	0,84	0,47
2	5,56	5,8	5,5	0,65	4,67	556	354	2,34	0,91	0,68
3	8.33	5,8	5,5	0,97	4,67	556	530	2,79	1,08	0,83
4	11.1	5,8	5,55	1,08	4,67	556	707	2,85	1,12	0,96
5	12.2	5,8	5,6	1,15	4,67	556	776	3,13	1,18	1,10

Выводы

Метод расчета коэффициента массоотдачи по теоретическим уравнениям может быть рекомендован для практического использования, как более точный и простой. Данное исследование было положено в основу методической разработки «Лабораторная работа «Массоотдача в жидкой фазе», используемой в лабораторном практикуме по курсу «Процессы и аппараты химической технологии», для студентов Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Берд Стьюарт В, Лайтфут* Е. Явления переноса, М.: «Химия»,1974, 701 с.

2. *Дытнерский Ю.И., Борисов Г.С.* Исследование массообмена в жидкой фазе. Процессы химической технологии: Гидродинамика, тепло- и массопередача. М. Наука,1965 – с. 266 – 278.

УДК 677.023.756 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-286-288

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ШЛИХТОВАНИЯ ЛЬНЯНОЙ ПРЯЖИ
OPTIMIZATION OF THE SIZING PROCESS FOR LINEN YARN

Базыленко Екатерина Николаевна*, Лобацкая Екатерина Михайловна**
Ekaterina N. Bazylenko*, Ekaterina M. Lobatskaya**

**Витебский государственный технологический университет,*
Республика Беларусь, Витебск
** Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus, Vitebsk*
(e-mail: bazylenko2019@bk.ru)
***Витебский государственный технологический университет,*
Республика Беларусь, Витебск
*** Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus, Vitebsk*
(e-mail: lem76@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены вопросы оптимизации процесса шлихтования льняной пряжи в производственных условиях ткацкого предприятия, определены оптимальные параметры концентрации шлихтующего препарата.

Abstract: The issues of optimization of the process of sizing of linen yarn in the production conditions of a weaving enterprise are considered, the optimal parameters of the concentration of the sizing preparation are determined.

Ключевые слова: шлихтование нитей основы, концентрация, обрывность нитей.

Keywords: sizing of warp threads, concentration, thread breakage.

Увеличение объемов выпуска ассортимента востребованных на рынке тканей связано, в том числе, с эффективностью процессов подготовки нитей основы и утка к ткачеству. Для проведения эксперимента по оптимизации процесса шлихтования льняной основы в производственных условиях предприятия РУПТП «Оршанский льнокомбинат» использовалась шлихтовальная машина SMR-SP-10-1800/800 фирмы «Karl Mayer. Для эксперимента был выбран образец 78, в основе и в утке которого используется чистольняная пряжа линейной плотности 30 текс, в кромках – хлопчатобумажная пряжа 25 текс×2. Этот образец относится к продукции, почти полностью предназначенной для зарубежного потребителя, и поэтому снижение себестоимости и улучшение качества основ является актуальной задачей. [1]

Известно, что процесс шлихтования предназначен для увеличения сопротивляемости нитей основы истиранию и многократному растяжению нитей в процессе ткачества. В утвержденном рецепте шлихты РУПТП «Оршанский льнокомбинат» применяются следующие шлихтующие препараты:

Инекс 773AS – 3 кг,

Авирол NW94 – 2,5 кг,

Вода – 600 л.

Нити основы прошедшие шлихтование с использованием этого рецепта шлихты отличаются достаточно хорошей износостойкостью и невысокой обрывностью в процессе ткачества. Так же, для шлихтования основ в настоящее время применяется препарат Аркофил PPL. [2]

Основной целью исследования было проведение эксперимента по шлихтованию основ с использованием шлихты содержащей препарат Аркофил PPL разной концентрации и оценка изменения обрывности после шлихтования, а так же разработка рекомендаций по использованию обновленного рецепта шлихты.

В таблице 1 предоставлен сравнительный анализ основных свойства препаратов Инекс 773AS и Аркофил PPL, отметим, что стоимость этих препаратов на рынке практически одинаковая.

Таблица 1 – Основные свойства препаратов Инекс 773AS и Аркофил PPL.

Основные свойства	Инекс 773AS	Аркофил PPL
Внешний вид	желто-белый гранулят	порошок от белого до слегка желтоватого
Химическая структура	поливиниловый спирт с добавкой пеногасителя	винил полимеризат
Объемная плотность	приблизительно 600 кг/м³	приблизительно 650 кг/м³
Вязкость (при температуре 20º С)	3,5% раствор ок. 15мПа	4% раствор ок. 15мПа
Совместимость	может быть смешан со всеми обычными шлихтами	может быть смешан со всеми обычными шлихтами
pH	5 – 7 (50 г/л в воде)	5 – 7 (50 г/л в воде)

Было предложено для эксперимента использовать три варианта состава шлихты с использованием препарата Аркофил PPL разной концентрации и сравнение этих составов с базовым составом, содержащим Инекс 773AS (вариант №1). Препарат Аркофил PPL был использован при приготовлении шлихты в следующих концентрациях 2,5 кг (вариант 2), 3 кг (вариант 3) и 3,5 кг (вариант 4) на 600 литров воды. Качество ошлихтованных основ оценивалось по величине обрывности в процессе шлихтования и по внешнему виду ошлихтованных нитей. [3, 4] Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Как видно из данных таблицы 2 при использовании препарата Аркофил PPL в вариантах шлихты №3 и №4 увеличивается разрывная нагрузка нитей основы. При использовании в шлихте препарата Инекс 773AS максимальная обрывность в процессе шлихтования составила 2,4 обрыва на 10^6 метров пряжи. В варианте №2 обрывность нитей основы в процессе шлихтования увеличилось по сравнению с базовым рецептом шлихты, и составила 3 обрыва на 10^6 метров пряжи, это говорит о том, что концентрация клеящего препарата 2,5 кг на 600 литров воды недостаточная для качественного шлихтования. При использовании препарата Аркофил PPL в концентрации 3,5 кг на 600 литров воды (вариант 4) обрывность так же увеличилась по сравнению с базовым вариантом и составила 3,1 обрыва на 10^6 метра пряжи. Это связано с тем, что нити основы слеивались, а обрывность в основном происходила на ценовом поле шлихтовальной машины.

Таблица 2 – Результаты проведения пробы препарата Аркофил PPL разной концентрации на шлихтовальной машине.

Показатели	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3	Вариант №4
Состав шлихты	Инекс 773AS – 3 кг; Авирол NW94-2,5 кг; Вода – 600 л.	Аркофил PPL-2,5 кг; Авирол NW94-2,5 кг; Вода – 600 л.	Аркофил PPL - 3 кг; Авирол NW94 – 2,5 кг; Вода – 600 л.	Аркофил PPL - 3,5 кг; Авирол NW94 – 2,5 кг; Вода – 600 л.
Фактическая вытяжка, %	0,4	0,4	0,4	0,4
Истинный приклей, %	2,6	2,6	2,7	2,8
Разрывная нагрузка до шлихтования, сН	493,8	493,8	493,8	493,8
Разрывная нагрузка после шлихтования, сН	568,6	558,4	575,4	588,3
Прирост разрывной нагрузки, %	15,15	13,08	16,52	19,14
Обрывность на 10^6 метра пряжи	2,4	3	2,2	3,1

В заключении следует отметить, что замена клеящего препарата Инекс 773AS на препарат Аркофил PPL в концентрации 3 кг на 600 литров воды (вариант 3) является технологически целесообразной, так как позволяет снизить обрывность нитей основы в процессе шлихтования, и, как следствие увеличить производительность за счет уменьшения простоев оборудования.

Выводы

Проведено экспериментальное исследование влияния концентрации шлихтующего препарата Аркофил PPL на обрывность льняной пряжи в процессе шлихтования; определена оптимальная концентрация клеящего препарата, которая составила 3 кг на 600 литров воды; обоснована целесообразность замены препарата Инекс 773AS на Аркофил PPL.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришанова С. С., Коган А.Г. Производство пряж из короткого льняного волокна // Экологические и ресурсосберегающие технологии промышленного производства: сборник статей межд. научно-технической конференции. / Витебск: УО «ВГТУ», 2006. - С. 80-81.

2. Лапехо С.А., Лобацкая Е.М. Влияние оптимизации процесса шлихтования на качество льняной ткани // Техническое регулирование: базовая основа качества материалов, товаров и услуг: сб. науч. тр.: науч. электрон. изд. Шахты: ИСОиП (филиал) ДГТУ, 2018. С. 60-63.

3. Башметов, В.С., Невских В.В., Бондарева Т.Н, Башметов А.В., Акиндинова Н.С. Оборудование для ткацкого производства: учебное пособие. Витебск: УО «ВГТУ», 2013. 322 с.

4. Лобацкая О.В., Лобацкая Е.М. Материаловедение: учебное пособие для студентов спец. "Конструирование и технология швейных изделий" учреждений, обеспечивающих получение высшего образования. Витебск: УО "ВГТУ", 2012. 323 с.

УДК 67.05 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-289-292

ОСОБЕННОСТИ РАСКРОЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕХАНИЧЕСКИМ ТОЧЕЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ
FEATURES OF CUTTING SPECIAL COMPOSITE MATERIALS WITH A MECHANICAL POINT TOOL

Канатов Алексей Владимирович, Зайцев Дмитрий Александрович, Запорожан Дмитрий Юрьевич
Aleksey V. Kanatov, Dmitry A. Zaytsev, Dmitry Y. Zaporozhan

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: zaytsevdima1996@yandex.ru, zaporochan.dima9@mail.ru, kanatov.aleksey@yandex.ru)

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности раскроя композитных материалов, механическим точечным инструментом, определены зависимости механических свойств композита от ориентации армирующих волокон.

Abstract: Some features of the cutting of composite materials with a mechanical point tool are considered, and the dependences of the mechanical properties of the composite on the orientation of the reinforcing fibers are determined.

Ключевые слова: волокнистые полимерные материалы, механический режущий инструмент.

Keywords: fibrous polymer materials, mechanical cutting tools.

Композитный материал (компози́т) — искусственно созданный неоднородный сплошной материал, состоящий из нескольких компонентов (с различными физическими и химическими свойствами) с чёткой границей раздела между ними. Композиционные материалы обладают рядом специфических особенностей, отличающих их от металлов. К таким особенностям относятся низкие прочностные свойства на смятие, срез и межслоевой сдвиг, хрупкий характер разрушения.

Наиболее обширную и разнообразную по своему составу группу составляют композиционные материалы, армированные волокнами. Это объясняется тем, что в композитах данного типа удается реализовать наиболее высокие прочностные и термические характеристики, так как именно использование волокон дает наибольший упрочняющий эффект [1].

Свойства волокнистых полимерных композитов, особенно их механические свойства, определяются, прежде всего, армирующими волокнами и нитями — их видом и свойствами, размерами и расположением, то есть строением армирующего волокнистого наполнителя.

В качестве армирующих волокнистых наполнителей используются волокна (различной природы и длины резки), нити, жгуты и ровинги (жгутики), ленты, шнуры, ткани, плетеные полотна, трикотажные полотна, нетканые полотна, бумаги и другие [4].

По расположению структурных элементов (волокон, нитей) АВН могут быть условно разделены на следующие виды:

- 1D — однонаправленные (нити, ленты, жгуты и др.);
- 2D — двунаправленные (тканые, вязаные или плетеные полотна);
- 3D — трехмерно ориентированные (трехмерные ткани и др.);
- с хаотическим расположением волокон или нитей в плоскости (волокнистыеслои, холсты, большинство нетканых материалов, бумаги);
- с хаотическим расположением волокон в трехмерном пространстве (специальные текстильные структуры).

Основные варианты расположения волокон в армирующих наполнителях и, соответственно, в полученных на их основе композитах приведены на рис. 1.



Рисунок 1 – Основные схемы расположения дисперсных наполнителей/волокон/нитей в различных видах АВН и армированных полимерных материалах

С увеличением степени армирования механические свойства пропорционально возрастают. Однако эта зависимость выдерживается только в определенных пределах, так как на нее влияют при малых степенях армирования особенности свойств волокон — их модуль упругости и хрупкость. Так, например, для углеродных волокон (с высоким модулем упругости и малой деформацией до разрыва и поэтому хрупких) прямая пропорциональность не выдерживается при малых степенях армирования, поскольку матрица (связующее) во время деформирования, увлекая волокна за собой, приводит к их разрушению (см. рис. 2 справа). При больших степенях армирования недостаток связующего для заполнения межволоконного пространства выше критического значения (67—70%) приводит к нарушению монолитности композита и, соответственно, появлению в нем неравномерности напряжений, а поэтому к разрушению при меньших значениях механических напряжений, чем для монолитных образцов [2].

Особенностью раскроя композитных материалов при помощи точечного режущего инструмента заключается в том, что режущий инструмент должен обладать следующим комплексом свойств: он должен быть значительно тверже обрабатываемой поверхности, препятствовать появлению трещин, рисок и большой шероховатости на поверхности композитных материалов.

Большое значение для раскроя композитных материалов имеет скорость и сила резания. Сведения о силах резания необходимы при выборе режимов резания для обеспечения заданной точности формы и размеров обрабатываемой заготовки.

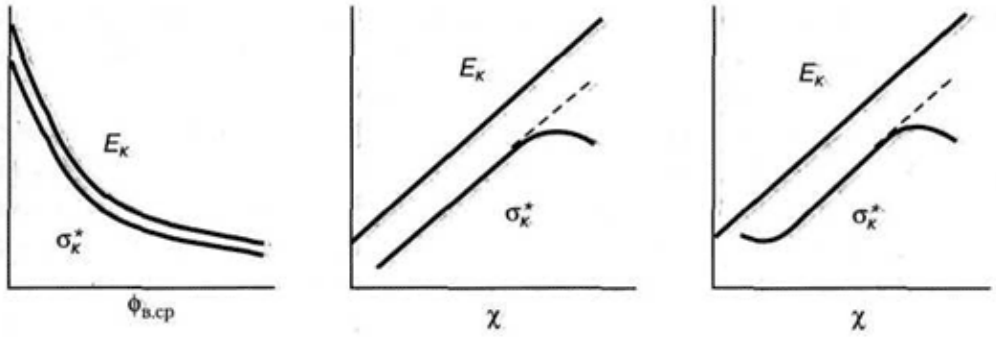


Рисунок 2 – Зависимости механических свойств композита от ориентации армирующих волокон $\varphi_{вср}$ и объемной степени армирования χ. Правый рисунок характерен для особо хрупких, например углеродных волокон

При решении задачи требуется, прежде всего, сформировать функционал интенсивности изнашивании координационного состояния, в данном случае скорость и перемещения, а затем разработка процедуры вычисляется минимизирующей этот функционал. Помимо оптимизации раскладки заготовок программа раскроя материалов должна иметь ряд дополнительных возможностей: разделение остатков материалов, образующихся в процессе раскроя, на обрезки, которые предполагается использовать в будущем, и отходы, повторно [6, 7].

Качество поверхности играет исключительно важную роль в обеспечении высокого эксплуатационного раскроя изделий. Качество обработанной поверхности композитных материалов характеризуется большим количеством различных параметров, которые можно разделить на две группы: физико-химические и геометрические параметры, причем в зависимости от свойств материала и методов раскроя наиболее существенное влияние на эксплуатационные характеристики изделий оказывают те или иные из них. В процессе раскроя и последующей эксплуатации изделия на его поверхности возникают неровности: в слое материала, прилегающем к ней, изменяются структура, химический состав. Неровности на поверхности, структура и химический состав поверхностного изменяют физико-химические и эксплуатационные свойства изделий. Поверхностный слой оказывает существенное влияние на многие эксплуатационные свойства изделий: прочность, трение и износ, диэлектрические показатели и т.д.

При резке композитов происходит нарушение целостности поверхности как за счет снятия имеющегося на поверхности отформованного изделия слоя полимеризованного связующего, выполняющего защитную функцию от воздействия внешних факторов (например, влаги), так и за счет перерезания композита [3].

Порядок работы с композитными материалами, в зависимости от формы и размеров готовых изделий, строго индивидуален. В качестве инструмента для резки композитов используются фрезы с различным углом заточки. Осуществляют различные резки при помощи станка с ЧПУ, обеспечивающего высочайшую точность.

Преимущество технологии фрезеровки композитов в отсутствии острых заусенцев, нагара и возможности для дальнейшей шлифовки, создания фактуры и гравировки.

Чтобы минимизировать дефекты на готовых изделиях, в процессе раскроя применяется лазерная резка композитных изделий. Лазерные технологии позволяют проводить большой список технологических операций по обработке углепластиков и других композитных материалов по сложным контурам. С помощью лазерного программно-управляемого луча в месте разреза концентрируется высокая энергия, способная сделать разрез материала практически любой толщины, независимо от состава. Поэтому данная технология раскроя является наиболее прогрессивной, особенно когда речь идет о серийном производстве [7].

Технология ультразвуковой резки применяется к целому ряду специфических материалов, придавая им сложные формы с точными срезами и практически без сколов или

других дефектов. Такому типу резки подвергаются как твердые, так и очень хрупкие детали, включая такие труднообрабатываемые, как композитные материалы [5].

Также технология не создает шума, не оставляет стружки и оплавленных краев, не сопровождается выделением дыма или ядовитого газа, а также не связана с влагой, что бывает принципиально при резке карбона. А по стоимости данный метод составляет неплохую альтернативу гидроабразивной и лазерной резке.

Резка происходит под воздействием ультразвуковых вибраций на режущий наконечник, что до минимума снижает силу трения. Но в зависимости от рабочей частоты может возникнуть необходимость в оборудовании звукоизоляции.

Преимущества метода заключаются в точности обработки, малых показателях шероховатости и расслоения.

К недостаткам относят малую производительность и быстрый износ режущего инструмента.

Суть технологии в воздействии посредством струи воды, смешанной с абразивным материалом, которая подается под высоким давлением с большой скоростью. Применяется метод, как правило, для прочных, трудно разрезаемых материалов, например композитных. Данный метод не вызывает повышение температуры в зоне реза, поэтому не приводит к оплавлению краев [3].

Технология дает возможность производить детали сложных форм из многослойных композитов и является безопасной для здоровья человека и окружающей среды.

Преимущества гидроабразивной резки — в большой производительности и возможностях резки материала большой толщины до 20–30 см в зависимости от плотности. Кроме этого, технология не приводит к повышению температуры и деструкции матрицы.

Недостатки связаны с высоким водопоглощением, что ведет к удорожанию технологического процесса, поскольку требуется сушка деталей. Кроме этого, метод характерен большой шероховатостью поверхности.

Выводы

Проанализированы основные варианты расположения волокон в армирующих наполнителях и в полученных на их основе композитах, определены зависимости механических свойств композита от ориентации армирующих волокон, изучены основные особенности раскроя волокнистых полимерных композитов механическим режущим инструментом, преимущества и недостатки различных технологий резания композитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перепелкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. – Санкт-Петербург: Науч. основы и технологии, 2009.

2. Криони Н. К., Мигранов М. Ш., Шехтман С. Р. Инновационные технологии обработки металлов в авиадвигателестроении: учебное пособие. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 163 с.

3. Эффективная трибология при лезвийной и иной обработке заготовок/ деталей / Трибология, Т. под ред. К.Н. Войнова. - Санкт-Петербург: Нестор-История, 2015.

4. Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов/ под ред.: К. В. Фролова:.2003, Москва.

5. Латышев П. Н. Каталог САПР. Программы и производители. – Москва: СОЛОН-Пресс, 2014.

6. http://viam-works.ru; А. Е. Раскутин, А. В. Хрульков, Р. И. Гирш: Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций.

7. http://www.detalmach.ru; Механическая обработка изделий из композитов. Применение композитных материалов.

УДК 519.812.3: 665.622.43 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-293-296

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ ЭТАНОЛА В БЕЗМЕМБРАННЫХ ТОПЛИВНЫХ ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ
STUDY OF ETHANOL OXIDATION PROCESSES IN MEMBRANELESS FUEL ALKALINE CELLS

Таранцева Клара Рустемовна*, Таранцев Константин Валентинович**
Klara R. Tarantseva*, Konstantin V. Tarantsev**

**Пензенский государственный технологический университет, Россия, Пенза*
**Penza State Technological University, Russia, Penza*
(e-mail: krtar@bk.ru)
***Пензенский государственный университет, Россия, Пенза*
***Penza State University, Russia, Penza*
(e-mail: kvtar@bk.ru)

Аннотация: Исследовано влияние различных факторов на эффективность процессов окисления этанола в безмембранных щелочных топливных элементах. Показано, что с увеличением концентрации воды и pH, эдс системы увеличивалась. В то же время, увеличение концентрации этанола в системе на одних катализаторах приводило к увеличению эдс, на других, напротив, к уменьшению.

Abstract: The influence of various factors on the efficiency of ethanol oxidation processes in membraneless alkaline fuel cells has been investigated. It was shown that with an increase in the concentration of water and pH, the emf of the system increased. At the same time, an increase in the ethanol concentration in the system on some catalysts led to an increase in the emf, on others, on the contrary, to a decrease.

Ключевые слова: процессы, окисление этанола, щелочные топливные элементы, безмембранные, факторы.

Keywords: processes, ethanol oxidation, alkaline fuel cells, membraneless, factors.

Медленная кинетика реакции окисления этанола в настоящее время во всем мире является основным препятствием для разработки топливных элементов на этаноле. Не смотря на имеющиеся теоретические исследования и экспериментальные данные, полученные с использованием различных методов, механизм окисления этанола все еще остается неясным, а в ряде случаев и противоречивым. Известно, что окисление этанола протекает через серию сложных реакций, включающих ряд последовательных и параллельных стадий реакции, что приводит к образованию более чем 40 возможных летучих и адсорбированных промежуточных продуктов, и их окислительных производных [1]. Однако, мнения расходятся относительно адсорбированных состояний промежуточных продуктов, и по вопросу лимитирующей стадии процесса.

В целом, на сегодняшний день лишь в общем согласован так называемый механизм двойного пути (C1 и C2) окисления этанола [2].

$$CH3CH2OH + 12OH- \rightarrow 2CO2 + 9H2O + 12e- \quad (1)$$

$$CH3CH2OH + 5OH- \rightarrow CH3COO- + 4H2O + 4e- \quad (2)$$

Согласно пути C1 освобождается 12 электронов и генерируется напряжение элемента 1,14 В. Считается, что путь C1 проходит с разрывом связи C-C через адсорбированные CO и CH_X, которые могут быть дополнительно окислены до CO2 (или карбоната в щелочном растворе) [3]:

$$CH3CH2OH \rightarrow CH3CH2OH(ad) \rightarrow CO(ad), CHx(ad) \rightarrow CO2 \quad (3)$$

Путь С2 в основном приводит к образованию уксусной кислоты (или ацетата в щелочных растворах) за счет доставки четырех электронов и/или ацетальдегида посредством доставки двух электронов.

$$CH3CH2OH \rightarrow CH3CH2OH(ad) \rightarrow CH3CHO \rightarrow CH3COOH \quad (4)$$

Обычно в процессе окисления этанола преобладает путь С2, поэтому усилия во всем мире сосредоточены на поиске эффективных селективных катализаторов и условий проведения процесса по пути С1, позволяющем достигнуть полного окисления этанола и, соответственно, большей производительности топливного элемента [4].

Процесс окисления этанола и получаемые при этом продукты реакции сильно зависят от состава электролита, прежде всего, концентрации этанола, содержания воды, pH, природы аниона [5].

Известно, что в щелочной среде, диссоциативная адсорбция этанола протекает довольно быстро, и лимитирующим этапом является удаление адсорбированных частиц, адсорбированным гидроксилом. Однако, возможности повышения эффективности окисления этанола в щелочных условиях все еще раскрыты не до конца, так как подробная информация о продуктах реакции приведена в очень ограниченном числе исследований [2].

Выбор оптимального состава и условий проведения процесса окисления этанола имеет решающее значение для получения высокой плотности тока и предотвращения потерь топлива из-за неполного прохождения реакции. Слишком высокая концентрация этанола на аноде приводит к уменьшению покрытия его OH-, и соответственно, к уменьшению скорости окисления CO до CO2 и отравлению анода. Напротив, слишком низкая концентрация этанола может способствовать уменьшению тока в системе.

Помимо выбора концентрации этанола, необходим также выбор оптимального pH, содержания воды и соответствующего буферного раствора. Необходимо учитывать, что образующийся в ходе реакции CO2 будет реагировать с OH- с образованием карбоната (CO_2^{3-}). Это может повлиять на производительность элемента из-за снижения pH, а также на кинетику окислительно-восстановительной реакции, сопротивление элемента и др. Кроме того KOH реагирует с CO2, образующимся на аноде с образованием карбоната, который осаждается и блокирует поверхность электродов. На катоде KOH может снизить гидрофобность газодиффузионного слоя, тем самым нарушая баланс массопереноса между водой и кислородом [2]. Поэтому необходимо избегать KOH в составе электролитов.

Выбор оптимального содержания воды в электролите также является важной задачей. Вода образуется на аноде и расходуется на катоде, что способствует переходу воды от анода к катоду. Это приводит к увеличению ионной проводимости электролита. Однако, слишком большое количество воды может привести к затоплению катода и затруднить перенос кислорода. Напротив, малое количество воды может способствовать переносу кислорода, но может привести к большим потерям при активации катода. Поэтому для электролитов необходимо использовать буферные растворы, чтобы снизить эффект изменения pH на границах раздела электролит/электрод.

Следующим критическим фактором является водородный показатель среды pH, который оказывает значительное влияние на кинетику реакции. Локальные изменения pH в межфазном слое могут существенно повлиять на скорость и механизм протекания электродной реакции. Во время окисления этанола в щелочной среде расходуются частицы OH-, это изменяет локальный pH в приповерхностном слое электрода и снижает скорость реакции. Авторы [6] исследовали влияние локального изменения pH в процессе оксления этанола на платиновых электродах в щелочной среде. Выявлено, что скорость окисления значительно возрастала, когда pH электролита был выше 10.

Ранее нами были предложены [7-10], безмембранные топливные щелочные элементы на основе двух несмешивающихся жидкостей в системе «этанол–электролит–вода»: EtOH + K2CO3 + H2O, EtOH + K3PO4 + H2O, EtOH + KOH + H2O. Показано, что во всех исследованных системах сохранялось устойчивое расслоение фаз в течении длительного

периода (более 16000 часов) с формированием виртуальной мембраны, роль которой выполняла граница раздела фаз. В качестве анодов и катодов использовали платинированный титановый электрод, титановый электрод с оксидно-рутениевым покрытием, металлическую медь марки М0, нержавеющую сталь 12Х18Н10Т, низкоуглеродистую сталь.

Исследование влияния pH, концентрации этанола и воды на эффективность окисления этанола в системе EtOH + K3PO4 + H2O показало следующее. С увеличением содержания воды в системе и pH (рисунок 1) эдс топливного элемента увеличивается. Наибольшая разность потенциалов наблюдается, когда в качества катода используется сталь 10, а в качестве анода платинированный титановый электрод и титановый электрод, покрытый оксидом рутения. Интересно отметить, что эдс у этих пар уменьшается с увеличением pH, что связано, по-видимому с поляризацией электродов, вызванной образованием оксидных и гидроксидных пленок, согласно диаграммам Пурбэ.

Примерно одинаковая эдс системы наблюдается, когда в качестве анодов применяется нержавеющая сталь и медь. Однако характер изменения потенциала разомкнутой цепи для пар медь/сталь 10 и 12Х18Н10Т/сталь 10 отличается. При использовании анода из меди, потенциал разомкнутой цепи увеличивается с ростом pH. В случае применения стали 12Х18Н10Т в качестве анода, с увеличением pH потенциал уменьшается.

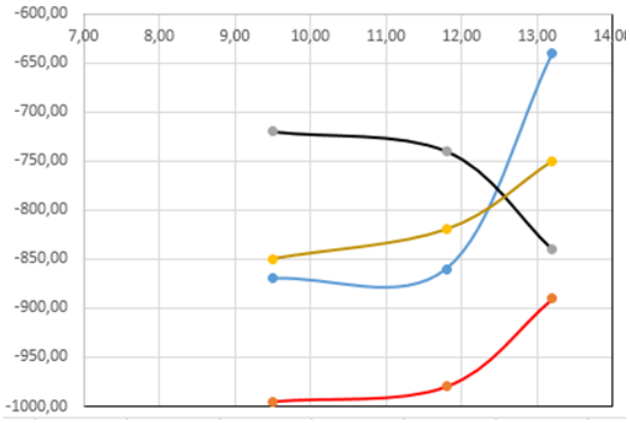


Рисунок 1 – Изменение эдс топливного элемента в зависимости от pH для пар анод/катод: Pt/Ti/сталь10 (красный); Ru2O/Ti/сталь10 (синий); Cu/сталь10 (черный); 12Х18Н10Т/сталь 10 (желтый). По оси X –водородный показатель, pH; по оси Y- значение потенциала разомкнутой цепи (эдс), мВ

Аналогичная тенденция наблюдается с увеличением содержания этанола в электролите для исследованных пар электродов. Эдс пар Pt/Ti/сталь10; Ru2O/Ti/сталь10; 12Х18Н10Т/сталь 10 увеличивается, а пары Cu/сталь10 уменьшается.

Интересно отметить, что эдс различных пар металлов в исследуемой системе, в ряде случаев, сильно отличается от прогнозируемой, по-видимому, вследствие прохождения реакции окисления спирта, приводящей к изменению состояния поверхности электродов и их поляризации. Известно, что спирты не являются коррозионно-активными средами по отношению к углеродистым, хромоникелевым сталям и меди, поэтому эти материалы применяются для изготовления оборудования в производстве спиртов. В то же время водные растворы этилового спирта отличаются повышенной коррозионной активностью по отношению к металлам, особенно малоуглеродистым сталям. Это объясняет наблюдаемые установившиеся потенциалы стали 10, 12Х18Н10Т и меди в исследованных средах

Таким образом, предложенные безмембранные топливные элементы на основе двух несмешивающихся жидкостей «этанол-электролит-вода» являются работоспособными и обеспечивают эдс на уровне известных мембранных спиртовых топливных элементов. При этом они не имеют мембраны, что является их неоспоримым преимуществом, просты в эксплуатации, безопасны, конкурентны и не имеют аналогов в мире. Анализ хроматограмм, полученных после зарядки и разрядки топливных элементов показывает наличие в них

продуктов окисления этанола в виде ацетальдегида, что свидетельствует о механизме С2 окисления спирта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-58-60002 ЮАР_т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang H.F., Liu Z.P. Comprehensive mechanism and structure-sensitivity of ethanol oxidation on platinum: New transition-state searching method for resolving the complex reaction network// Journal of the American Chemical Society. 2008. 130. P. 10996-11004.

2. Evans A. Monyoncho, Tom K. Woo, Elena A. Baranova, Ethanol electrooxidation reaction in alkaline media for direct ethanol fuel cells// Electrochemistry. 2018. 15. P. 1-57.

3. Junsong Guo, Rongrong Chen, Fu-Chun Zhue ets. New understandings of ethanol oxidation reaction mechanism on Pd/C and Pd2Ru/C catalysts in alkaline direct ethanol fuel cells// Applied Catalysis B: Environmental. 2018. 224. P. 602-611.

4. Ye Wang, Shouzhong Zou, Wen-Bin Cai. Recent Advances on Electro-Oxidation of Ethanol on Pt- and Pd-Bascd Catalysts: From Reaction Mechanisms to Catalytic Materials// Catalysts. 2015. 5. P. 1507-1534.

5. Lai S.C.S., Kleijn S.E.F., Ozturk F.T.Z. ets. Effects of electrolyte pH and composition on the ethanol electro-oxidation reaction//Catalysis Today. 2010.154. P. 92-104.

6. M. C. Figueiredo, R. M. Arán-Ais, V. Clement, T. Kallio and J. M. Feliu, Evidence of Local pH Changes during Ethanol Oxidation at Pt Electrodes in Alkaline Media// ChemElectroChem. 2015. 2. P. 1254-1258.

7. Tarantseva K., Yakhkind M., Mishra A. ets. Systems of two immiscible liquids for a new type of membraneless fuel cells using renewable fuel//ICEPP-2020. E3S Web of Conferences, 2020. 161. 01062.

8. Tarantseva K., Yakhind M. Two-layer immiscible methanol/ethanol-electrolyte-water systems for fuel cells // IAPE '20, Second Edition of the International Conference on Innovative Applied Energy. Cambridge. United Kingdom. 15-16 Sept 2020. ISBN: 978-1-912532-18-6

9. Tarantseva K., Yakhkind M., Korosteleva A. ets. Study of electromotive force of a new type of membraneless fuel cell operating on renewable fuel //ICEPP-2020. E3S Web of Conferences 161. 2020. 01069.

10. Tarantseva K., Yakhkind M., Politaeva N. ets. Selection of electrode materials for membrane less fuel cells based on immiscible liquids //CONMECHYDRO – 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 883. 2020. 012136.

УДК 677.494.745.32; 677.044.226; 678 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-297-300

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПАН-ТЖ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В ТЕХНОЛОГИИ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF OBTAINING MODIFIED PAN-TJ USED IN THE TECHNOLOGY OF EPOXY COMPOSITES

Зубова Наталья Геннадьевна*, Устинова Татьяна Петровна**
Natalia G. Zubova *, Tatiana P. Ustinova **

** Балаковский инженерно-технологический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, Балаково*
** Balakovo Institute of Engineering and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Russia, Balakovo*
(e-mail: Zubova APTECH@mail.ru)
*** Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., Россия, Энгельс*
*** Engels Institute of Technology (branch) of the Saratov State Technical University Gagarin Y.A., Russia, Engels*
(e-mail: ustinovatp@mail.ru)

Аннотация: Проведено комплексное исследование влияния модификаторов на свойства полиакрилонитрильного технического жгутика. Приведены результаты прочностных испытаний, термогравиметрического анализа, оптической микроскопии поверхности, смачиваемости и термовлажностной обработки нитей.

Abstract: A comprehensive study of the effect of modifiers on the properties of polyacrylonitrile technical flagellum was carried out. The results of strength tests, thermogravimetric analysis, optical microscopy of the surface, wettability and thermal moisture treatment of threads are presented.

Ключевые слова: полиакрилонитрильные нити, модификаторы, оценка свойств.
Keywords: polyacrylonitrile filaments, modifiers, property evaluation.

Полиакрилонитрильные волокна и нити, обладающие особыми свойствами, представляют собой один из наиболее распространенных видов промышленно освоенных карбоцепных синтетических волокон [1]. Данный вид волокон относится к перспективным армирующим системам, что определяется реакционной активностью их функциональных групп [2, 3].

Целью работы являлось комплексное исследование свойств модифицированных полиакрилонитрильных нитей, которые могут быть применены в качестве армирующих наполнителей при получении композитов на основе эпоксидного связующего.

Объектами исследования служили: полиакрилонитрильный технический жгутик (ПАН-ТЖ), 3-аминопропилтриэтоксисилан (АГМ-9), 3-глицидоксипропилтриметоксисилан (Silquest A-187), 3-метакрилоксипропилтриметоксисилан (Silquest A-174), Duron OS 3151 – комбинация из гликолевых эфиров жирной кислоты.

Модификацию как промышленного, так и свежесформованного ПАН-ТЖ проводили обработкой растворами исследуемых аппретов при модуле ванны – 5±0.5 и температуре 20±5ºС. Концентрация аппретов в модифицирующей ванне составляла 2.0; 5.0; 10%, продолжительность обработки – 60 с. Для перевода силанов в водорастворимую форму pH водной ванны доводили до 4.5, используя для этого уксусную кислоту.

После завершения процесса пропитки и сушки при 50ºС образцов ПАН-ТЖ проводили их термообработку при температуре 100±2ºС в течение 15±1 мин для осуществления процесса поликонденсации силанов.

Эффективность модификации ПАН-ТЖ оценивали по изменению армирующих свойств (рисунок 1) нитей.

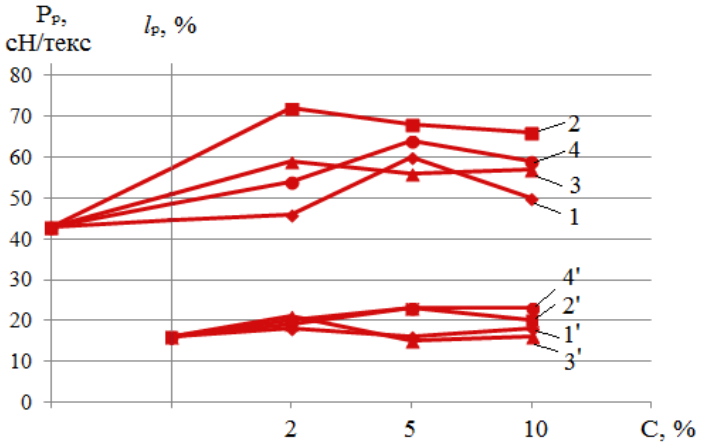


Рисунок 1 – Зависимость относительной разрывной нагрузки $P_р$, сН/текс и относительного разрывного удлинения $l_р$, % от концентрации модификатора в ванне С, %:
1, 1'– АГМ-9; 2, 2' - А-187; 3, 3' - А-174; 4, 4' - Duron OS 3151.

Приведенные на рисунке 1 данные свидетельствуют о том, что обработка полиакрилонитрильного технического жгутика исследуемыми аппретами существенно повышает прочность нитей при концентрации растворов модификаторов 5%. Значения относительной разрывной нагрузки модифицированных нитей увеличиваются на 49–58% по сравнению с исходным ПАН-ТЖ. Это, очевидно, связано с изменением поверхностных свойств нитей.

В связи с этим, исследован характер распределения модифицирующих аппретов АГМ-9, А-187, А-174 и Duron OS 3151 на поверхности полиакрилонитрильных нитей с помощью оптической микроскопии (рисунок 2).

Анализ микрофотографий образцов модифицированных нитей показывает, что обработка аппретами способствует формированию пленочного покрытия, повышает компактность и снижает дефектность ПАН-ТЖ, что приводит к увеличению его прочностных показателей.

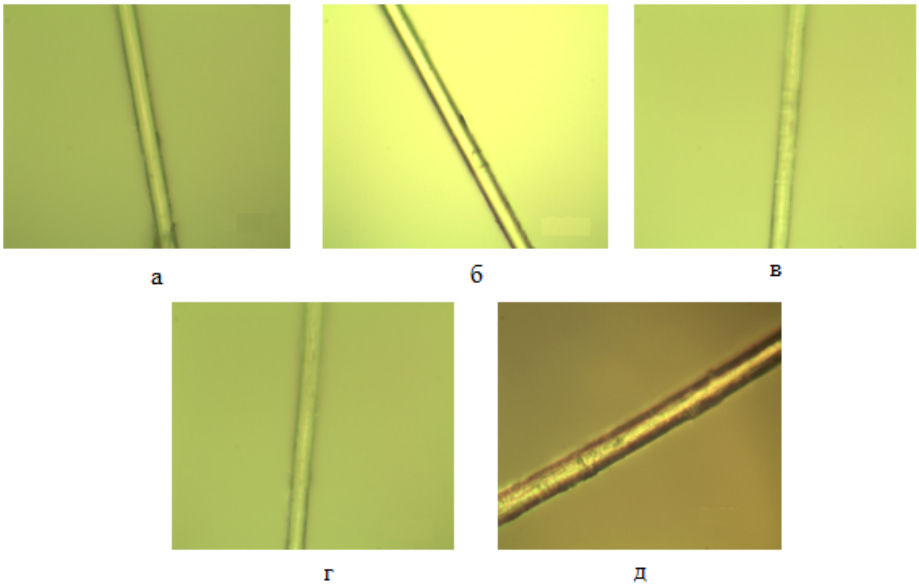


Рисунок 2 – Микрофотографии образцов элементарных нитей (n=800):
а - ПАН-ТЖ; б - ПАН-ТЖ+АГМ-9; в - ПАН-ТЖ+А-187; г - ПАН-ТЖ+А-174;
д – ПАН-ТЖ+ Duron OS 3151.

Оценка кинетики смачиваемости исследованных нитей проводилась по высоте капиллярного поднятия раствора эпоксидного олигомера в зависимости от времени достижения равновесия (таблица 1). Наибольшая высота капиллярного поднятия соответствует жгутику, модифицированному органосиланом А-174 и составляет 66 мм. Аппретирование нитей другими марками модификаторов не влияет на изменение смачиваемости по сравнению с исходным ПАН-ТЖ.

Таблица 1 – Данные кинетики смачивания полиакрилонитрильного жгутика эпоксидным олигомером.

Образец	Время достижения равновесия, с	Высота капиллярного поднятия, мм
ПАН-ТЖ	210	54
ПАН-ТЖ+АГМ-9	180	52
ПАН-ТЖ+А-187	210	50
ПАН-ТЖ+А-174	240	66
ПАН-ТЖ+Duron OS3151	330	50

Изучение поведения модифицированного ПАН-ТЖ в условиях повышенных температур методом термогравиметрического анализа (таблица 2) показало, что модифицирование поверхности ПАН-ТЖ не оказывает существенного влияния на изменение термоустойчивости нитей.

Таблица 2 – Данные термогравиметрического анализа модифицированного ПАН-ТЖ.

Образец	Температурный интервал пиролиза, ^{0}C	Остаток, %, при температурах, ^{0}C							
		100	200	300	400	500	600	700	800
ПАН-ТЖ	245-279 588-639	100	95	86	76	36	17	7	7
ПАН-ТЖ+АГМ-9	240-280 580-620	100	92	79	59	48	33	15	7
ПАН-ТЖ+А-187	240-280 580-675	100	93	87	78	61	40	17	9
ПАН-ТЖ+А-174	232-276 575-658	100	91	80	71	57	25	5	4
ПАН-ТЖ+Duron OS3151	238-276 570-650	100	92	77	62	55	31	10	6

При аппретировании полиакрилонитрильного жгутика органосиланами: АГМ-9, А-187, А-174, и Duron OS 3151, приводящими к улучшению армирующих свойств нитей, достигается устойчивый эффект модификации, что подтверждается данными изменения массы нитей при многократной термовлажностной обработке (рисунок 3). Наименьшее изменение массы после 5-кратной обработки горячей водой, характерное для нитей, модифицированных А-187 и А-174, составляет 0,4–0,7% соответственно.

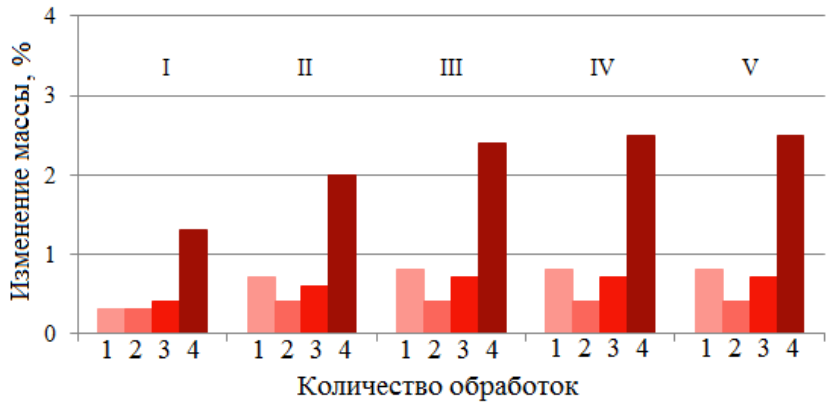


Рисунок 3 – Изменение массы модифицированного ПАН-ТЖ после термовлажностной обработки:
1 – ПАН-ТЖ+АГМ-9;
2 – ПАН-ТЖ+А-187;
3 – ПАН-ТЖ+А-174;
4 – ПАН-ТЖ+ Duron OS 3151.

Выводы

Проведена комплексная оценка армирующих свойств, характера поверхности и термоустойчивости модифицированных полиакрилонитрильных нитей. Установлено, что наиболее эффективными модификаторами ПАН-ТЖ являются органосилановые аппреты А-187 и А-174 при их концентрации в ванне 5%. Модифицированные нити могут быть рекомендованы для армирования эпоксидного композита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беркович А. К., Сергеев В. Г., Медведев В. А., Малахо А. П.* Синтез полимеров на основе акрилонитрила. Технология получения ПАН и углеродных волокон. М. : Изд-во МГУ, 2010. 63 с.

2. *Geller B. E.* Status and Prospects for Development of Polyacrylonitrile Fibre Production. A Review // Fibre Chemistry. 2002. V. 34. P. 151-161.

3. *Перепелкин К.Е.* Волокна из окисленного (циклизованного) полиакрилонитрила – оксипан //Химические волокна. 2003. № 6. С. 3–8.

УДК 661.152 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-300-302

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ МЕТОДОМ КАПСУЛИРОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ

THE EFFICIENCY OF APPLICATION OF MINERAL FERTILIZERS BY THE METHOD OF CAPSULATION WITH THE PURPOSE OF ACHIEVING THE LONGER ACTION

Таран Юлия Александровна, Фуфаева Валентина Михайловна, Разин Сергей Андреевич
Yliya A. Taran, Valentina M. Fufaeva, Sergei A. Razin

МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, Москва
MIREA - Russian Technological University, Russia, Moscow
(e-mail: taran_yu@mirea.ru)

Аннотация: Проведено сравнение известных методик определения скорости выщелачивания карбамида из капсулированной гранулы. На основе экспериментальных данных построены кривые растворения для гранул с различными составами покрытий. Сделан вывод о сопоставимости результатов, полученных с использованием данных методик.

Abstract: A comparison of known methods for determining the rate of urea leaching from an encapsulated granule is made. On the basis of experimental data, the dissolution curves for granules with different coating compositions were plotted. The conclusion is made about the comparability of the results obtained using these methods.

Ключевые слова: капсулирование, удобрения пролонгированного действия, выщелачивание.

Key words: encapsulation, long-acting fertilizers, leaching.

Минеральные удобрения широко используются в сельском хозяйстве как недорогой и эффективный источник питательных веществ для сельскохозяйственных культур, который приводят к интенсивному росту урожайности. Азот – один из важнейших питательных элементов, необходимых растениям для роста. Увеличение использования азотных удобрений для повышения сельскохозяйственного производства рассматривается уже более 50 лет. За последние полвека рост урожайности сельскохозяйственных культур связан с семикратным ростом использования удобрений во всем мире.

Однако чрезмерное применение удобрений приводит к низкой эффективности использования азота растениями и, по сути, не дает никаких преимуществ. Это обусловлено тем, что для большинства видов растений усвоение азота колеблется от 30 до 50%, в то время

как оставшиеся 50-70% разлагаются почвенными микроорганизмами, теряются при выщелачивании или преобразуются в оксиды азота и испаряются, что приводит к загрязнению поверхностных и грунтовых вод, их заболачиванию, выбросу парниковых газов и разрушению озонового слоя [1].

Для удовлетворения потребностей повышения урожайности без негативного влияния на окружающую среду были разработаны экологически чистые удобрения (EFFs). EFFs – это удобрения, которые позволяют сократить загрязнение окружающей среды, связанное с потерями питательных веществ, замедляя или даже контролируя высвобождение питательных веществ в почву. Большинство EFFs представляют собой гранулы с покрытием, регулирующим высвобождение питательных элементов из гранулы в почву (CRF). Такие удобрения формулируются таким образом, что ядро, содержащие питательные вещества покрываются экологически безопасными материалами, которые могут разлагаться в почве, например, полилактид, поликапронлактон, производные целлюлозы, хитозан [2].

Удобрения с контролируемым высвобождением должны удовлетворять потребность культур в питательных веществах в течение всего сезона за одно применение, в то время как обычные удобрения необходимо вносить 2-3 раза за сезон. Применение CRF не только помогает снизить потери азота в окружающую среду, но и снижает трудо- и экономические затраты, уменьшает количество выбросов газов и отходов при производстве удобрений, сокращает затраты на транспортировку. Также отмечается повышение урожайности сельскохозяйственных культур.

Одним из основных показателей качества CRF является скорость растворения их питательных веществ воде в сравнении с аналогичным удобрением без покрытия. Стандартной методики для определения скорости растворения для таких удобрений на сегодняшний момент не существует, однако большинство исследователей применяют широко известные методы аналитического анализа, связанные, в конечном итоге с определением концентрации удобрения в воде в конкретный момент времени. Это рефрактометрический, кондуктометрический, спектрометрический методы анализа, а также определение плотности раствора с помощью лабораторных ареометров.

Для определения плотности растворов используют методы растворения навески удобрения, как в чистой дистиллированной воде, так и растворение в 40 %-м растворе того же удобрения без покрытия, для моделирования среды, наиболее близкой по содержанию воды к почве [3].

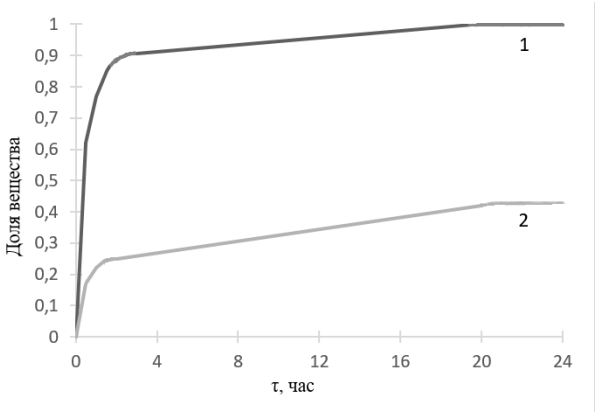


Рисунок 1 – Зависимость растворения гранул карбамида, с покрытием состава 1 в дистиллированной воде (кривая 1) и в 40%-ом растворе карбамида (кривая 2).

В нашей работе, проделанной на кафедре ПАХТ имени Гельперина Н.И. РТУ МИРЕА, мы сравниваем эти две методики для капсулированных гранул карбамида с покрытиями трех различных составов.

В данной работе была выбрана методика определения доли растворившегося карбамида, основанная на определении плотности раствора.

Методика проведения эксперимента: в колбу на 100 мл. наливалась дистиллированная вода или 40%-ый раствор карбамида. Затем в колбу загружалась навеска карбамида. Через определенные промежутки времени раствор из колбы сливали в мерный цилиндр и с помощью ареометра определяли плотность раствора. С помощью градуировочного графика зависимости плотности раствора от концентрации карбамида в нем, определяли концентрацию растворившегося карбамида в растворе. Ниже представлены результаты

опытов растворения карбамида в дистиллированной воде и в 40%-ом растворе карбамида с различными типами покрытия в течение суток.

На рисунке 1 приведена кривая растворимости карбамида, с покрытием состава 1.

На рисунках 2 и 3 приведены кривые растворимости для гранул карбамида с разными типами покрытий в дистиллированной воде и в 40%-ом растворе карбамида.

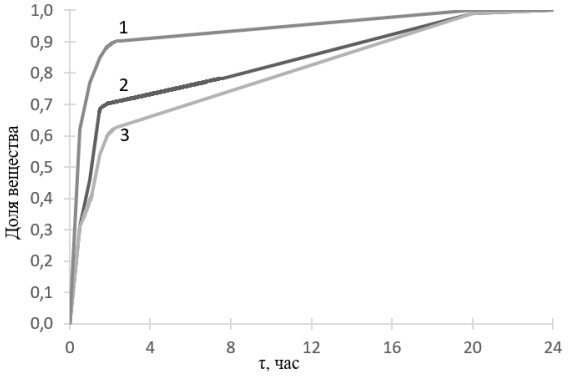


Рисунок 2 – Зависимость растворения гранул карбамида с различными типами покрытия в дистиллированной воде. Покрытие состава 1 (кривая 1), покрытие состава 2 (кривая 2), покрытие состава 3 (кривая 3).

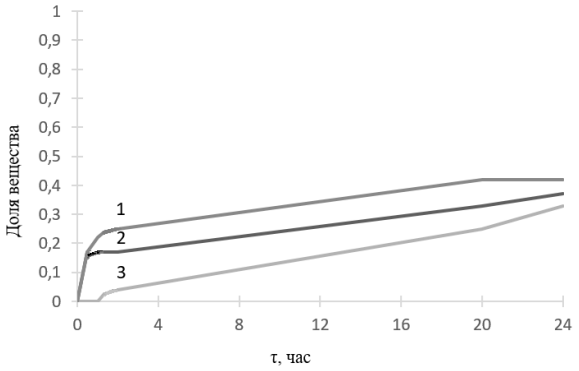


Рисунок 3 – Зависимость растворения гранул карбамида с различными типами покрытия в 40%-ом растворе карбамида. Покрытие состава 1 (кривая 1), покрытие состава 2 (кривая 2), покрытие состава 3 (кривая 3).

Выводы

Проведено экспериментальное исследование скорости выщелачивания карбамида двумя известными из литературы способами. Стоит отметить, что растворение гранул в дистиллированной воде происходит существенно быстрее, чем в 40%-ом растворе карбамида. Принимая во внимание то, что наличие высокой концентрации карбамида в растворителе замедляет его диффузию из ядра гранулы в объем растворителя, такой экспериментальной методики позволяет получить больше экспериментальных данных, а значит и более точно построить начальные участки кривой растворения. Это весьма полезно при необходимости экстраполяции экспериментальных данных на длительные временные интервалы.

В дальнейшем авторы планируют провести аналогичные эксперименты по растворению, используя в качестве среды почву и песок, и сопоставить с полученными ранее данными. Поскольку в реальных условиях состав почв, а также температурные режимы существенно варьируются, данные по растворению в воде, по сути, позволяют лишь сопоставить эффективность различных покрытий между собой. Проведение эксперимента с использованием в качестве среды почвы или песка и сопоставление полученных результатов представляет интерес, так как является шагом, позволяющим более точно прогнозировать скорость растворения при внесении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmed M., Rauf M., Mukhtar Z., Saeed N. Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing serious threats to environment and human health // Environmental science and pollution research. 2017. V. 24. P. 26983-26987.

2. Chen J., Lü S., Zhang Z., Zhao X., Li X., Ning P., Liu M. Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment // Science of the total environment. 2018. V. 613-614. P. 829–839.

3. Небукин В.О. Капсулирование дисперсных материалов в аппаратах с псевдоожиженным слоем. Дис. ... канд. техн. наук. И.: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2019. 132 с.

УДК 67.05 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-303-307

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ СТЕКЛОПЛАВИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
THE USE OF NEW COMPOSITE MATERIALS IN OPTIMIZING THE DESIGN OF GLASS-MELTING EQUIPMENT

Канатов Алексей Владимирович, Виноградов Никита Александрович, Федоров Эдуард Владимирович
Alexey V. Kanatov, Nikita A. Vinogradov, Edward .V. Fedorov

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: nik.vin2012@yandex.ru, kanatov.aleksey@yandex.ru, eduard_fedorov_1995@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности работы стеклоплавильного оборудования, проведены исследования по механическим свойствам фильерного питателя и была предложена конструкция фильерного питателя с минимизированными недостатками.

Abstract: Some features of the operation of steelmaking equipment are considered, studies on the mechanical properties of the die feeder are carried out, and the design of the die feeder with minimized disadvantages is proposed.

Ключевые слова: Стеклоплавильный агрегат фильерный питатель, фильерная пластина, фильера, аэрогель.

Keywords: Glass melting unit die feeder, die plate, die, aerogel.

Стеклянным называют химическое неорганическое волокно, изготовленное различными способами из расплавленного стекла. Стеклянное волокно обладает редким сочетанием свойств высокой прочностью на изгиб, растяжение и сжатие, негорючестью, температуроустойчивостью, низкой гигроскопичностью, стойкостью к химическому и биологическому воздействию, сравнительно низкой плотностью. Из него изготавливают материалы с отличными электро, тепло и звукоизоляционными свойствами. Стеклянное волокно способно пропускать свет, обладает полупроводниковыми свойствами, прозрачно для радиоволн и поглощает рентгеновские и более коротковолновые лучи. На основе стекловолокнистых материалов изготавливают тысячи различных видов изделий, которые не только заменяют с высокой эффективностью традиционные материалы (натуральные и искусственные волокна, лучшие марки стали и цветные металлы, строительные материалы и т. д.), но и имеют самостоятельное значение и области применения.

Стеклянные волокна получают путем плавления стекла и его формования в стеклоплавильных сосудах (фильерных питателях). Фильерный питатель представляет собой малогабаритную электрическую печь сопротивления, изготовленных из сплава драгоценных металлов, основным образом из платины и родия.

Использование драгоценных металлов характеризует данное оборудование как дорогостоящее, а взаимодействие с высокими тепловыми нагрузками как недолговечное. Поэтому проблема совершенствования стеклоплавильного оборудования в легкой промышленности является востребованной и актуальной.

Основной целью теоретического исследования является: оптимизации процесса изготовления непрерывного стеклянного волокна , разработка научно–технических решений модернизации корпуса фильерного питателя с использованием композитных материалов, минимизация недостатков существующего оборудования.

Основные задачи, поставленные перед исследованием:

1.Увеличение срока службы стеклоплавильного агрегата (фильерного питателя).

2.Минимизация недостатков фильерного питателя.

3.Повышение энергоэффективности стеклоплавильного агрегата.

Одним из возможных решений данной задачи была предложена новая конструкция фильерного питателя. Данная конструкция (рис. 1) включает в себя платино-родиевый фильерный питатель 1, теплоизолятор на основе тканных кварцевых аэрогелей 2, стальной корпус 3 закрепленный на платино-родиевом фильерном питателе 1 с помощью крепежного механизма состоящего из: штанги 5, защелки 6, крепления 7 и пружины 8, закрепленного с помощью винтов в стальном корпусе 3, а для повышения теплоотведения используется подфильерный холодильник 4.

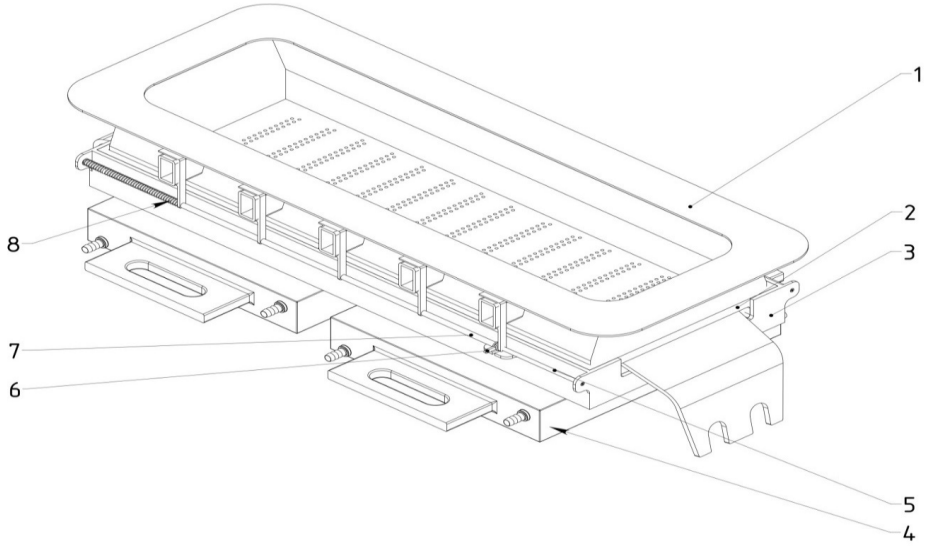


Рисунок 1 – Стеклоплавильный агрегат, состоящий из: (1) фильерный питатель ,(2) теплоизолятор, (3) стальной корпус, (4) подфильерный холодильник, (5) штанга, (6) защелка, (7) крепление , (8) пружина.

Объектом исследования является конструкция стеклоплавильного оборудования включающая в себя: фильерный питатель, теплоизолятор на основе тканного кварцевого аэрогеля и стальной корпус обеспечивающий механическую прочность. Проведено исследование по влиянию теплоизолятора на энергоэффективности и нахождению оптимальных параметров его толщины.

Для определения потерь тепловой энергии (рисунок 2) использовалось уравнение Ньютона-Рихмена.

Удельный тепловой поток q $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right]$ который получает стенка определяется как

$$q = a_1 * (T_{e1} - T_1) \quad (1)$$

где a_1 $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * K}\right]$-коэффициент теплоотдачи внутри, T_{e1} $[K]$-температура внутри.

Из условия непрерывности он должен равняется потоку тепла отводимому теплопроводность в глубь стенки. Этот поток тепла может быть записан в виде

$$q = \frac{\lambda}{\delta} * (T_1 - T_2) \quad (2)$$

где -коэффициент теплопроводности, δ [м] - толщина стенки, T_1, T_2 $[K]$ - температуры на границе 2-х сред.

Тепловой поток, отводимый тепловоспринимающей средой, в соответствии с тем же законом Ньютона-Рихмена, представлен в виде

$$q = a_2 * (T_2 - T_{e2}) \quad (3)$$

где a_2 $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * K}\right]$-коэффициент теплоотдачи снаружи, T_{e2} $[K]$-температура снаружи .

Поскольку в данном случае расчетная поверхность является многослойной, то уравнение примет вид

$$q = K * (T_{e1} - T_{e2}) \quad (4.1)$$

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_2} \quad (4.2)$$

где R $\left[\frac{м^2 * K}{Вт}\right]$ -термическое сопротивление, n - количество слоев, K $\left[\frac{Вт}{м^2 * K}\right]$ - коэффициент теплоотдачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_2}} \quad (4.3)$$

$$T_{i+1} = T_i - q * \left(\frac{1}{a_1} + \sum_{k=1}^{i} \left(\frac{\delta_k}{\lambda_k}\right)\right) \quad (4.4)$$

Следовательно, количество выделяемого тепла Q [Вт] равно

$$Q = S * q = S * K * (T_{e1} - T_{e2}) \quad (5)$$

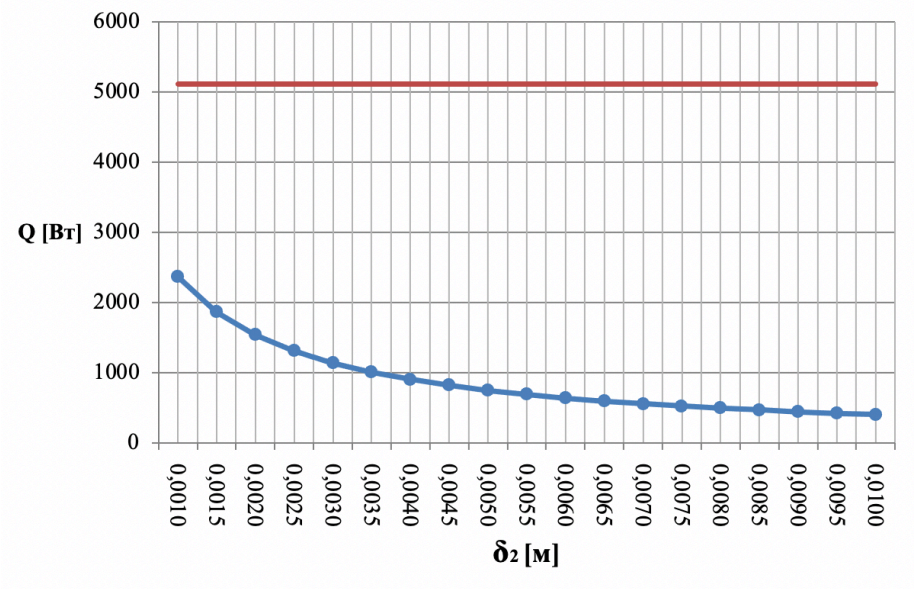


Рисунок 2 – График потерь тепловой энергии в зависимости от толщины теплоизолятора. Красным отмечено тепловые потери без использования теплоизолятора, синим с использованием в качестве теплоизолятора тканные кварцевые аэрогели.

Одним из наиболее ответственным элементом стеклоплавильного агрегата при производстве непрерывного волокна является фильера, отвечающая за качество непрерывного волокна. Отклонение фильер от горизонтальной плоскости является часто встречающимся дефектом, связанный с провисанием фильерной пластины, приводящий к обрыву нити и выходу оборудования из строя.

Отклонение фильер (рисунок 3 вариант b.) можно посчитать как:

$$a' = arct(\frac{\lambda_1}{l_1}) \quad (6)$$

где a' -угол отклонения фильер от горизонтальной плоскости, λ_1 -величина смещения фильерной пластины в результате провисания.

Данная конструкция позволяет добавить еще одно граничное условия отклонение фильер (рис. 3 вариант а.), вызванное опорными гранями материалов теплоизолятора и стального корпуса. Граничное условие отклонение выражено как:

$$a = arct(\frac{l}{\delta_1+\delta_2+\delta_3}) \quad (7)$$

где a- угол отклонения фильеры, -расстояние от фильеры до граней материалов, $\delta_1, \delta_2, \delta_3$- толщины материалов фильерной пластины (1), теплоизолятора (2), стального корпуса (3).

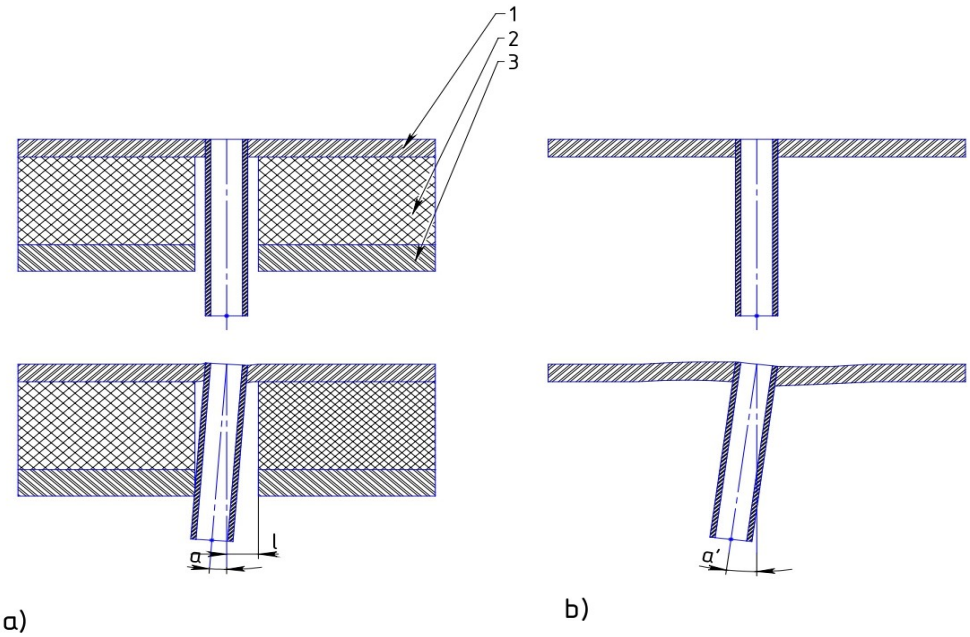


Рисунок 3 – Отклонение положения фильер по координате Х,У
1 - фильерная пластина, 2- теплоизолятор, 3 - стальной корпус.

Данная конструкция за счет многослойности позволяет уменьшить продольные напряжения в 3-4 раза, а смешения в результате деформации в 3-6 раз.

Выводы

Проведено исследование элементов конструкции стеклоплавильного агрегата, выявлены основные недостатки существующих конструкций; определена зависимость теплопотерь в зависимости от толщины слоя теплоизолятора на основе тканных кварцевых аэрогелей; установлено, что данная конструкция позволяет уменьшить отклонение фильер, что позволяет уменьшить недостаток в виде обрыва нити; определено, что данная конструкция за счет многослойности позволяет уменьшить продольные напряжения и смешения в результате деформации фильерной пластины, что позволит увеличить срок эксплуатации оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артеменко С. Е., Кадыкова Ю.А. Физико-химические основы технологии базальтопластиков. Структура и свойства. Саратов: СГТУ, 2012..

2.. Базальтоволокистые материалы: Сб. статей / Под ред. В.И. Костикова и Л.Н. Смирнова. М.: ООО «Информконверсия», 2001.

3. БелкинаС.Б., Чернышева Г.М., КурденковаА.В. Особенности строения и свойства волокон и нитей. М.: МГТУ им. А.Н.Косыгина, 2010.

4 Брут-Бруляко А.Б. и др. Оборудование ткацких предприятий: Учеб, пособие. Кострома: КГТУ, 2011.

5. Васвкин В.В., Перельман С.Л., Улыбышев В. В. Опыт разработки конструкций щелевых фильерных питателей в технологиях производства базальтовых волокон // Драгоценные металлы. Драгоценные камни. М.: МАИ, 2008. №6. С. 167-170.

6. Васекин В. В., Перельман С.Л., Улыбышев В. В., Ястребов В.А. Фильерные питатели с объемной фильерной пластиной // Материалы I Международной конф. «Производство оборудования из благородных металлов и его применение в химической и силикатной промышленности. Берлин, 2005». М.: АСМИ, 2005. С. 199—206.

7. Гаврилова А.А., Винокуров Г. Г., КычкинА.К, ОрешкоС.М. Технологические характеристики формования базальтовых непрерывных волокон при филверном способе их получения // Изв. Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 4 (2). С. 448—450.

8. Волокна и нити специального назначения: получение, структура, свойства, применение: Сб. научных трудов ООО «ЛИРСОТ» / Под ред. М.М. Полевой. М.: Спутник, 2010.

УДК 66.02 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-307-309

РАЗРАБОТКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО СТЕНДА ПО ИЗМЕРЕНИЮ РАСХОДА ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД С УЧЕТОМ КОРРЕКЦИИ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ И ДАВЛЕНИЮ

DEVELOPMENT OF A DEMONSTRATION STAND FOR MEASURING THE FLOW OF GASEOUS MEDIA TAKING INTO ACCOUNT THE CORRECTION FOR TEMPERATURE AND PRESSURE

Шулаева Екатерина Анатольевна, Хабибнасов Динис Рустемович
Ekaterina A. Shulaeva, Dinis R. Khabibnasov

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Филиал, г. Стерлитамак, Республика Башкортостан
Ufa State Petroleum Technological University, Branch, Sterlitamak, Russian Federation
(e-mail: khabibnasov19980131@gmail.com)

Аннотация: В данной статье рассматривается разработка демонстрационного стенда для контроля и управления измерением расхода газообразных сред с корректировкой по температуре и давлению. Применение демонстрационного стенда позволит моделировать процесс транспортировки газа в реальных условиях в процессе работы.

Abstract: This article discusses the development of a demonstration stand for monitoring and controlling the flow measurement of gaseous media with temperature and pressure adjustments. The use of a demonstration stand will allow you to simulate the process of gas transportation in real conditions during operation.

Ключевые слова: газ, транспортировка, зависимость, расход, давление, температура.

Keywords: gas, transportation, dependence, flow, pressure, temperature.

При транспортировке газообразного продукта под различными температурами и давлениями в цехах отправителя и получателя происходит физическое сжатие или расширения этого продукта. Вследствие чего полученный или отправленный объем газа будет отличаться от нужного, что, в свою очередь, приводит к коммерческому пересчёту.

Стенд предназначен для моделирования процесса транспортировки газообразного вещества из одного цеха с данной температурой и давлением в другой со своими соответствующими температурой и давлением. Использование внедренных средств автоматизации позволит добиться оптимальных параметров энергозатрат при протекании технологического процесса. На данной установке размещены датчик давления ЭЛЕМЕР АИР-30 с диапазоном измерения 0 – 2,5 кПа, датчик температуры ЭЛЕМЕР ТСПУ 0104 с пределами

измерения 0 – 100 ˚С, расходомер KROHNE OPTISWIRL 4070, диапазон измерения которого составляет 5 – 100000 м3/ч, блок питания ЭЛЕМЕР БП906/24-4 и видеографический регистратор СЕНСОРИКА Ш932.9А. В качестве нагнетателя воздуха используется воздуходувка с максимальным создаваемым давлением 1,25 кПа.

Внешний вид стенда представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Стенд по измерению расхода газа с учётом коррекции по температуре и давлению

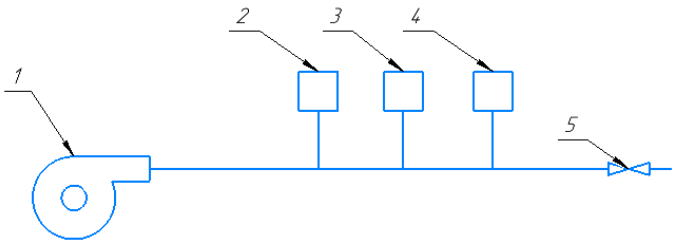


Рисунок 2 – Схема стенда: 1 – нагнетатель газа; 2 – расходомер; 3 – датчик давления; 4 – датчик температуры; 5 – запорная арматура

С помощью нагнетателя *1* воздух проходит по металлопластиковой трубе DN50 через расходомер *2*. Далее происходит измерение давления датчиком давления *3* и температуры датчиком температуры *4*. Регулирование температуры происходит путем изменения степени накала нагревательного элемента нагнетателя *1*. Регулирование давления осуществляется за счет изменения положения ручки клапана *5*.

Информация показаний физических величин поступает на вход в АЦП видеорегистратора, который отображает измеряемые текущие и архивные величины в аналоговом виде на встроенном видеографическом цветном

С помощью встроенных функций регистратор может осуществлять математическую обработку измерений. За эту функцию отвечает математические каналы. Значения математических каналов вычисляются в конце цикла после завершения опроса всех каналов. Ввод формул и значений осуществляется с помощью клавиш на передней стороне экранной панели.

Отсутствие измерения температуры и давления газа и соответственно учета поправки объема газа от температуры и давления приводит к большим погрешностям при приведении объема газа к стандартным условиям, поскольку в отличие от давления температура газа в различное время года в зависимости от положения трубопровода меняется в широких пределах.

Объемный расход определяется по следующей формуле:

$$Q_v = 3600 \times \upsilon \times S = \frac{\upsilon \times D}{354},$$

где Q_v – объемный расход при рабочих условиях, м^3/ч; D – внутренний диаметр, мм; S – площадь сечения, м^2; υ – скорость потока, $\frac{м}{с}$.

Число Рейнольдса Re характеризует смену режимов течения от ламинарного к турбулентному.

$$\mathrm{Re} = \frac{354 \times 10^3 \times \mathrm{Q_v}}{\upsilon \times \mathrm{D}};$$

где $\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \times 10^3$; $\upsilon = 5 \times \frac{\mathrm{v}}{\mathrm{D}}$ (число Рейнольдса 5000); $\upsilon = 20 \times \frac{\mathrm{v}}{\mathrm{D}}$ (число Рейнольдса 20000); $\upsilon = 40 \times \frac{\mathrm{v}}{\mathrm{D}}$ (число Рейнольдса 40000); Re – число Рейнольдса; ρ – плотность при рабочих условиях, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; μ – вязкость при рабочих условиях, кг/м × с; v – кинематическая вязкость при рабочих условиях, $\mathrm{v} = 10^{-6}$ м^2/с.

Исходя из газового закона:

$$\frac{p_\mathrm{p} V_\mathrm{p}}{T_\mathrm{p}} = \frac{p_\mathrm{c} V_\mathrm{c}}{T_\mathrm{c}},$$

где p_p – давление газа при рабочих условиях, кПа; $\mathrm{T_p}$ – температура газа при рабочих условиях, ˚С; V_p – расход газа при рабочих условиях, $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$; p_c – давление газа при стандартных условиях, кПа; $\mathrm{T_c}$ – температура газа при стандартных условиях, ˚С; V_c – расход газа при стандартных условиях, $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$.

Происходит расчет объемного расхода газа по формулам с использованием значений давления и температуры при помощи регистратора, сравниваемый с измеренным расходом по показаниям расходомера, так как при транспортировке газ должен приводиться к стандартным условиям, а именно: температура газа 20 ºС, давление 760 мм рт. ст., влажность 0 %.

Также, в процессе подсчета расхода учитываются поправочные коэффициенты, выражающие отношение действительного (практического) значения физического параметра к заданному (теоретическому), что позволяет добиться максимальной точности в вычислениях.

В качестве примера рассмотрим расчет поправочного коэффициента сжимаемости:

$$K = \frac{Z}{Z_c} = 1,$$

где z – фактор сжимаемости при рабочих условиях ($z = \frac{10^3 Mp}{RT\rho}$); R – газовая постоянная транспортируемого газа, Дж/(кг×К); M – молярная масса газа, М = 28,98 г/моль; р – давление газа, МПа; Т – температура газа, ˚С; p – плотность газа, кг/м^3. z_c – фактор сжимаемости при стандартных условиях; $p_c = 0{,}101325$ МПа; $\mathrm{T}_c = 293{,}15$ К.

Таким образом, расходомер измеряет и показывает расход среды в нормальных кубометрах. А с использованием датчиков давления и температуры производится ручной расчёт объемного расхода с использованием поправочных коэффициентов.

Исследования ведутся при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям (УМНИК))

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабибнасов Д.Р. Исследование работы стенда по учёту расхода промышленного воздуха с приведением к стандартным условиям на отечественной приборной базе и его энергоэффективность // Достижения вузовской науки: от теории к практике: III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (Кумертау, 24 апреля 2020 года) – Мелеуз: ГУП Мелеузовская городская типография, 2020. – с. 301-303.

2. Хабибнасов Д.Р. Разработка демонстрационного стенда учета газообразных сред с учетом коррекции по температуре и давлению и его имитационной модели // Современные технологии: достижения и инновации-2020: II Всероссийская научно-практическая конференция – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2020. – с. 441-443.

УДК 66.081.6 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-310-314

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННЫХ АППАРАТОВ
DEVELOPMENT OF ADVANCED DESIGNS OF ELECTRIC BARO-MEMBRANE DEVICES

Сергей Иванович Лазарев, Сергей Владимирович Ковалев, Дмитрий Николаевич Коновалов, Пепе Луа, Владимир Юрьевич Рыжкин
Sergey I. Lazarev, Sergey V. Kovalev, Dmitry N. Konovalov, Pepe Lua, Vladimir Yu. Ryzhkin

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(e-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru, sseedd@mail.ru, kdn1979dom@mail.ru, alploua@gmail.com, volodya.rijkin@yandex.ru)

Аннотация: В работе представлены перспективные конструкции электробаромембранных аппаратов плоскокамерного, трубчатого и рулонного типов для очистки и разделения технологических растворов и сточных вод различных производств. Приведены их технические результаты.

Abstract: The paper presents promising designs of flat-chamber, tubular and roll-type electrobaromembrane devices for purification and separation of technological solutions and waste water from various industries. Their technical results are presented.

Ключевые слова: аппарат, разделение, раствор, мембрана.
Keywords: apparatus, separation, solution, membrane.

Разделение и очистка технологических растворов и сточных вод химических, машиностроительных (гальванических), агрохимических и других производств является перспективной технологией, которая способствует экономить ресурсы промышленных предприятий и возвращать ценные компоненты (сырье) обратно на стадию производства продукции. В основу конструкций электробаромембранных аппаратов заложен ионный механизм разделения растворенных веществ [1-6], который является актуальной задачей для производственных предприятий.

Перспективная конструкция электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа (рисунок 1) состоит из двух фланцев 9, каналов ввода, вывода разделяемого раствора 24, 6 и отвода прикатодного, прианодного пермеата 33, 15, штуцеров ввода, вывода разделяемого раствора 23, 5, штуцеров для отвода прикатодного и прианодного пермеата 32, 14, устройства для подвода постоянного электрического тока 8, диэлектрических камер корпуса 16, двусторонних отверстий для подвода электрических проводов 11, прикатодных, прианодных дренажных сеток 28, 37, монополярно-пористых пластин электрода-катода, электрода-анода 27, 38, малых монополярно-пористых пластин электрод-катод, электрод-анод 29, 36, прикатодной, прианодной пористых подложек из ватмана 26, 39, малой прикатодной, прианодной пористых подложек из ватмана 30, 35 прикатодных, прианодных мембран 25, 40, малой прикатодной, прианодной мембран 31, 34, металлических пластин 1, болтов 2, шайб 3 и гаек 4, переточных каналов 13 и 19, соединяющих основные (большие) камеры разделения 21 и вспомогательные (малые) камеры разделения 22 соответственно, полимерной композиции 7, камерных штуцеров ввода разделяемого раствора и вывода ретентата 41, 42, полимерного компаунда 10, прокладок 12, прокладок 18 с отверстиями под переточной канал 13, малых прокладок 17 прямоугольной формы, уплотняющих периметр малой прикатодной и прианодной мембран 31, 34 соответственно, горизонтальных и вертикальных цилиндрических отверстий 43, 44, сетки-турбулизатора 20, все узлы которой, в местах касания катионообменных и анионообменных мембран, имеют скрутки на угол сто восемьдесят градусов.

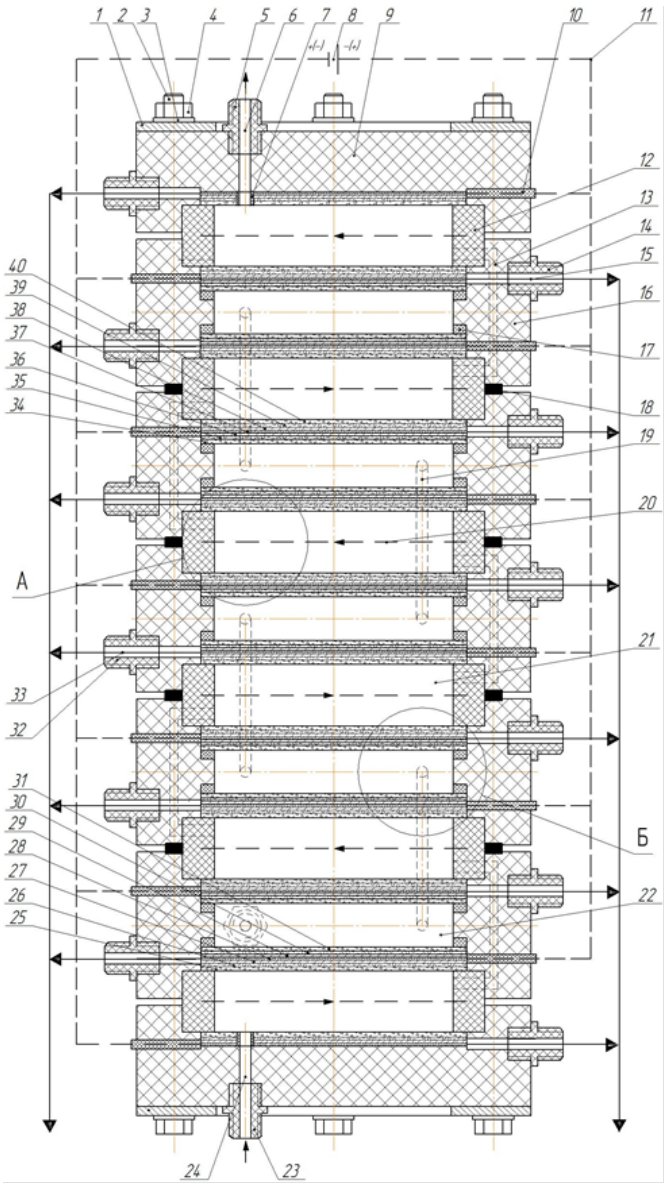


Рисунок 1 – Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа

Снижение гидравлического сопротивления в каналах для отвода прикатодного, прианодного пермеата достигается за счет того, что каналы для отвода прикатодного, прианодного пермеата расположены горизонтально и выведены в разные стороны, таким образом пермеат сливается с одной дренажной сетки в один канал, при этом отсутствует эффект застойных зон при слиянии двух потоков и изменения направления течения пермеата. Повышение унификации узлов и элементов аппарата, уменьшение степени сложности изготовления и замены элементов аппарата достигается за счет того, что диэлектрические камеры корпуса выполнены одинаковыми, при этом нет необходимости перенастраивать оборудование для изготовления диэлектрических камер корпуса.

Электробаромембранный аппарат трубчатого типа (рисунок 2) состоит из корпуса с торцевыми и ответными фланцами 2, 1, трубных решеток 3, прижимных решеток 5, 6, являющихся монополярными электродами - анодом и катодом, прианодных и прикатодных мембран 27, 28 и 29, 30 соответственно, сборников прианодного и прикатодного пермеата 7, 8, клемм устройства для подвода электрического тока 9, штуцеров ввода исходного раствора 10, 21 и вывода ретентата 11, 22, прианодного и прикатодного пермеата 12, 13 соответственно, прокладок 14, болтов, гаек и шайб 16, 17, 18, кольцевых прокладок 19, сетки-турбулизатора 20, трубок 25, 26.

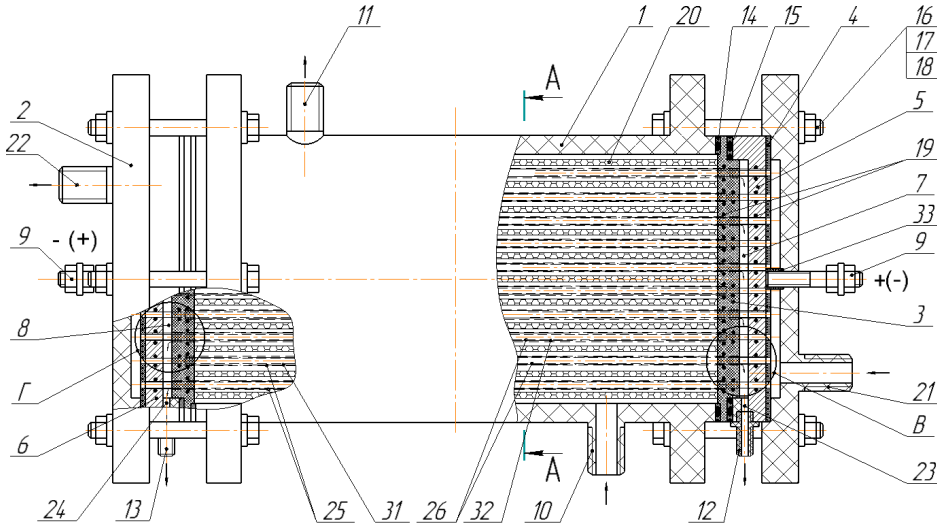


Рисунок 2 – Электробаромембранный аппарат трубчатого типа

Увеличение площади разделения растворов достигается за счет того, что прианодные и прикатодные мембраны размещенные на трубках 25 дополнительно размещены и на трубках 26 соответственно, что, как следствие, увеличивает производительность и качество разделения растворов по сравнению с аппаратом прототипом.

Снижение материалоемкости на единицу объема аппарата по сравнению с аппаратом прототипом достигается за счет того, что вместо щупов правых и левых цилиндрических, выполненных из целиковых прутков, прианодные и прикатодные дренажные сетки 32, 31 выполнены мешьшей массой.

Электробаромембранный аппарат рулонного типа (рисунок 3) состоит из корпуса аппарата, изготовленного в виде цилиндрической обечайки 1, одна из торцевых поверхностей которого глухая и с внутренней ее стороны в ней имеются несквозные проточки в центре под перфорированную трубку 14 и под расположенные от горизонтальной оси под углами $\pi/2$ и $3\pi/2$ соответственно внешние трубки 25, а вторая выполнена разъемной являющаяся крышкой 39, имеющей уплотнение с корпусом аппарата в виде шипа-паза, где расположена уплотнительная прокладка 8, при этом с внутренней ее стороны имеются сквозные проточки в центре под перфорированную трубку 14 и расположенные от горизонтальной оси под углами $\pi/2$ и $3\pi/2$ соответственно внешние трубки 25.

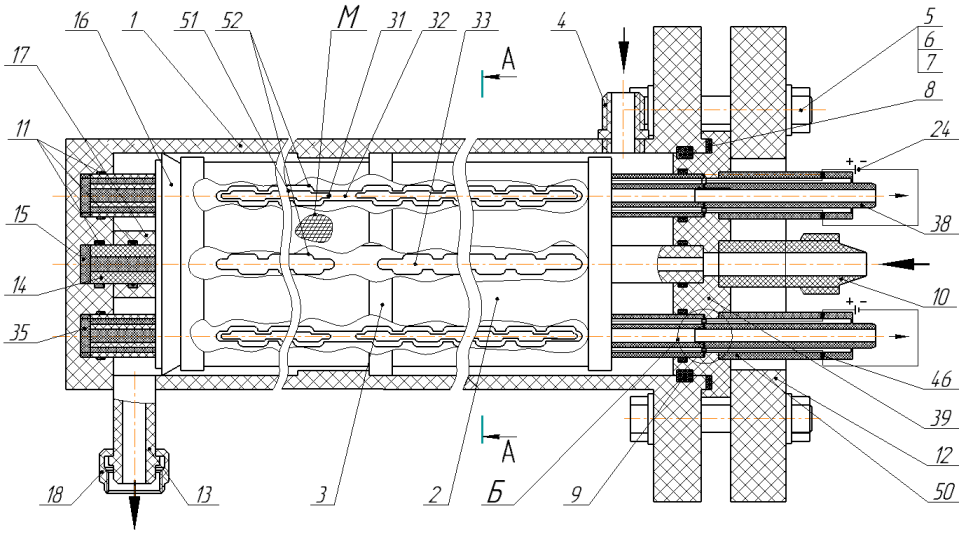


Рисунок 3 – Электробаромембранный аппарат рулонного типа

Снижение гидравлического сопротивления в канале для отвода ретентата и прианодного, прикатодного пермеата и увеличение производительности и качества разделения растворов, увеличение площади прикатодных и прианодных мембран для разделения растворов, снижение эффекта концентрационной поляризации при конструктивном исполнении электробаромембранного аппарата рулонного типа, по сравнению с аппаратом прототипом достигается, за счет исполнения перфорированной трубки 14 с перфорацией в виде эллиптических проточек 33 по периметру которых расположены полуэллипсы 52, выполненные на расстоянии 5 мм друг от друга, толщина стенок трубки 14 уменьшена в два раза, на внутренней поверхности трубки 14 имеется восемь полуокружностей-проточек 53, проходящих по всей длине образующих и распределенных от горизонтальной оси под углами $\pi/6$, $\pi/3$, $2\pi/3$, $5\pi/6$, $7\pi/6$, $4\pi/3$, $5\pi/3$, $11\pi/6$ соответственно, отверстия 41 в фиксирующей прокладке 40 исполнены в виде двух полумесяцев с закругленными краями 41, на внутренней поверхности внутренней трубки 27 имеется восемь полуокружностей-проточек 54, проходящих по всей длине образующих и распределенных от горизонтальной оси под углами $\pi/6$, $\pi/3$, $2\pi/3$, $5\pi/6$, $7\pi/6$, $4\pi/3$, $5\pi/3$, $11\pi/6$ соответственно, внешняя и внутренняя трубки 25, 27 перфорированы эллиптической щелью 31, 32 соответственно, по периметру которых расположены полуэллипсы 52, 51, выполненные на расстоянии 5 мм и 10 мм друг от друга соответственно, пленки 19, имеющие насечки углубленные в половину от ее толщины, составляют по форме параллелограммы, толщина сетки-турбулизатора 20 увеличена в три раза за счет уменьшения в два раза толщины дренажных сеток, являющимися анодом и катодом 48, 23 соответственно, штуцер для ввода охлаждающей воды 4 смещен к разъемной торцевой поверхности корпуса аппарата 1 на 25 мм, штуцер для вывода охлаждающей воды 13 смещен к глухой торцевой поверхности корпуса аппарата 1 на 25 мм, высота втулки 17 уменьшена на 15 мм, а ширина набора пленок 19, сетки-турбулизатора охлаждающей воды 47, сетки-турбулизатора 20, прианодных, прикатодных мембран 49, 22, подложек мембран 21, дренажных сеток являющихся анодом и катодом 48, 23 увеличена на 50 мм.

Увеличение межмембранного канала в три раза на пути потока разделяемого раствора, приводит к снижению гидравлического сопротивления в канале для отвода ретентата и прианодного, прикатодного пермеата и увеличению производительности и качества разделения растворов, а также приводит к увеличению общей площади мембран в аппарате и площади прикатодных и прианодных мембран для разделения растворов и снижается эффект концентрационной поляризации.

На разработанных конструкциях электробаромембранных аппаратов плоскокамерного, трубчатого и рулонного типов без наложения электрического поля можно проводить баромембранные процессы (обратный осмос, ультрафильтрация, нанофильтрация, микрофильтрация), например, при разделении растворов химических, машиностроительных и агрохимических производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалева О.А., Лазарев С.И., Коновалов Д.Н., Ковалев С.В. Сравнительное исследование методов разделения технологических растворов и сточных вод гальванических производств // Вестник Технологического университета. 2018. № 5. С.58-63.

2. Абоносимов О.А., Кузнецов М.А., Ковалева О.А., Поликарпов В.М., Дмитриев В.М. Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на предприятиях // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. № 4. С.641-655.

3. Ковалев С.В., Лазарев С.И., Абоносимов О.А., Соломина О.А., Лазарев К.С. Электробаромембранный аппарат рулонного типа // Патент на изобретение RU 2522882 C1. Кл. МПК - B01D61/42. 20.07.2014.

4. Ковалева О.А., Лазарев С.И., Осипова И.А., Ковалев С.В., Полянский К.К. Анализ морфологии поверхности микрофильтрационных мембран МФФК, МПС методом атомной силовой микроскопии // Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. № 4. С.608-615.

5. Ковалева О.А., Ковалев С.В. Разделение послеспиртовой мелассной барды на пористых мембранах УФМ-50, УПМ-50М, ОПМН-П и ОФАМ-К // Мембраны и мембранные технологии. 2017. № 3. С.213-224.

6. Ковалева О.А. Лазарев С.И., Ковалев С.В. Влияние трансмембранного давления на микрофильтрационное концентрирование дрожжевой биомассы // Мембраны и мембранные технологии. 2017. № 5. С.358-368.

УДК 621.791.052:539.4 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-314-318

ОСНОВЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ УТОРНЫХ УЗЛОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ
BASICS OF ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR VERTICAL STEEL TANKS T-JOINT CONNECTIONS WELDING

Игнатьев Андрей Геннадьевич[*], Ерофеев Валерий Владимирович[,***], Шарафиев Роберт Гарафиевич[**], Гильманшин Рустем Альбертович[**], Сагадеев Ильдар Рифович[*], Гребенщикова Ольга Александровна[***,****]**
Andrey G. Ignatiev[*], Valery V. Erofeev[,***], Robert G. Sharafiev[**], Rustem A. Gilmanshin[**], Ildar R. Sagadeev[*], Olga A. Grebenshchikova[***,****]**

**Южно-Уральский государственный университет, Россия, Челябинск*
** South Ural State University, Russia, Chelyabinsk*
(e-mail: ignat74@bk.ru)
***Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Уфа*
***Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa*
(e-mail: ervv52@mail.ru)
****Южно-Уральский государственный аграрный университет, Россия, Троицк*
****South Ural State Agrarian University, Russia, Troitsk*
(e-mail: ervv52@mail.ru)
*****Филиал ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Челябинск*
*****Air Force Military Educational and Scientific Centre, Air Force Academy N.a. Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Russia, Chelyabinsk*
(e-mail: ervv52@mail.ru)

Аннотация: Для стальных вертикальных резервуаров разработана энергоэффективная технология изготовления уторных узлов. В основу технологии положен переход на сварку тавровых соединений с применением неравнокатетных угловых швов.

Abstract: An energy efficient T-joint unit manufacturing technology has been developed for vertical steel tanks. This technology is based on the T-joint welding using unequal weld seams.

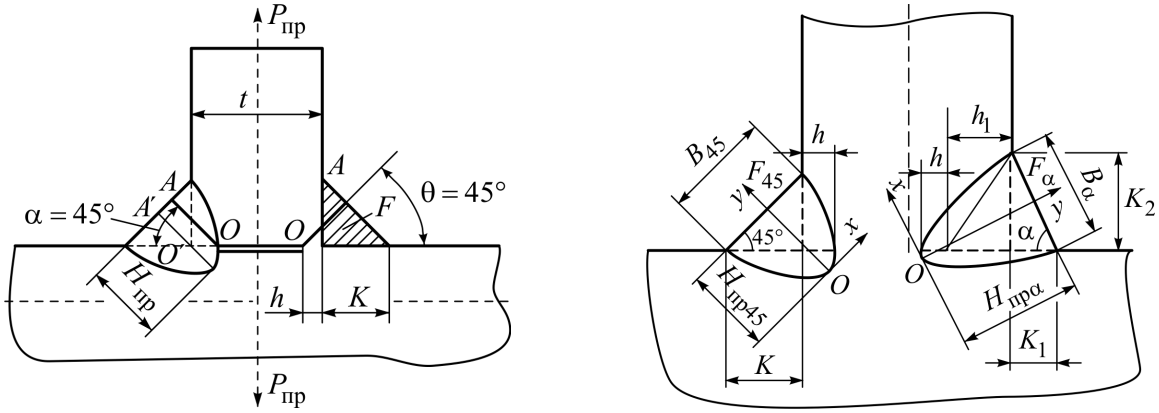
Ключевые слова: стальной вертикальный резервуар, сварка, технология, тавровое соединение, неравнокатетный угловой шов.

Keywords: steel vertical tank, welding, technology, T-welded joint, unequal welds seam.

В нормативных документах [1, 2 и др.] регламентированы требования к механическим свойствам сварных соединений вертикальных резервуаров, приведены типы соединений и способы их изготовления. В частности, уторные узлы (соединения корпуса с днищем), представляют собой сварные тавровые соединения, выполненные равнокатетными угловыми швами. Однако многочисленные исследования [3–5 и др.] показали, что переход на сварку неравнокатетными швами при сохранении объема наплавленного металла способствует повышению прочности рассматриваемых сварных соединений. Данное обстоятельство не учитывается в расчетах на прочность рассматриваемых соединений, положенных в основу

нормативных документов, которые не актуализированы до сих пор с учетом новых требований по ресурсосбережению и использованию наукоемких ресурсосберегающих технологий.

Следует отметить, что положенный в основу нормативных документов метод расчета на прочность сварных соединений с равнокатетными угловыми швами является в значительной степени условным. В нем, в частности, принимается, что разрушение угловых швов происходит на сдвиг под действием касательных напряжений по сечению, совпадающему с биссектрисой прямого угла, расположенного у основания шва, а глубина проплавления учитывается путем введения параметра $\beta_{45} = H_{\text{пр}} / K$, зависящего от режимов и способа сварки (рисунок 1, *а*).



а б

Рисунок 1 – Общий вид таврового соединения с равнокатетными швами, принятая расчетная схема с учетом проплавления стенки *h* (*а*) и сравнение геометрических параметров соединений при переходе на сварку с неравнокатетными швами (*б*)

С учетом данных допущений величина предельной нагрузки $P_{\text{пр}}$ для тавровых соединений, выполненных равнокатетными угловыми швами, определяется из следующего соотношения [6]:

$$P_{\text{пр}} = n[\tau']\beta_{45}Kl, \qquad (1)$$

где $[\tau']$ – допускаемое напряжение металла шва при чистом сдвиге, $[\tau'] = (0,6...0,65)[\sigma']$; $[\sigma'] = \sigma_{\text{в}} / k_{\text{в}}$ или $[\sigma'] = \sigma_{\text{т}} / k_{\text{т}}$ – допускаемое напряжение металла шва при растяжении, $\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{\text{т}}$ – предел прочности и предел текучести металла шва, $k_{\text{в}}$ и $k_{\text{т}}$ – коэффициенты запаса прочности по пределу прочности и текучести; *K*, *l* – соответственно катет и длина углового шва; *n* – количество угловых швов (*n* = 1 – соединение типа Т1, *n* = 2 – соединение типа Т3); $\beta_{45} = H_{\text{пр}} / K$ – коэффициент эффективности проплавления, определяющий относительную глубину проплавления в направлении сварочной дуги при сварке равнокатетными швами, $H_{\text{пр}}$ – глубина проплавления.

В соответствии с рекомендациями работы [6] для расчета сварных тавровых соединений, выполненных на оптимальных режимах с применением различных способов сварки, следует принимать:

β_{45} = 0,7 – для ручной дуговой сварки (РДС), многопроходной автоматической (АДС) и механизированной (МДС) сварки;

β_{45} = 0,8 – для двух и трехпроходной МДС;

β_{45} = 0,9 – для однопроходной МДС и двух- и трехпроходной АДС;

β_{45} = 1,1 – для однопроходной АДС.

В работе [7] была установлена связь между параметром β_{45}, характеризующим относительную глубину проплавления углового шва, и относительным параметром

проплавления вертикальной стенки h/K, которая была проверена путем сравнения с экспериментальными данными, приведенными в работе [8]:

$$\beta_{45} = 0,7\left(1+\frac{h}{K}\right). \quad (2)$$

Приведенное соотношение (2) позволяет оценить относительную глубину проплавления вертикальной стенки h/K для тавровых соединений с равнокатетными швами при использовании рассматриваемых способов сварки:

$$\frac{h}{K} = \frac{\beta_{45}}{0,7} - 1. \quad (3)$$

Не менее важной задачей является корректировка метода расчета, положенного в основу нормативных документов [1, 2 и др.], позволяющая учесть переход технологии изготовления тавровых соединений металлоконструкций на сварку неравнокатетными швами.

Для решения поставленной задачи принимали, что геометрия неравнокатетных угловых швов, представляет собой правильный треугольник с катетами K_1 и K_2 и углом наклона лобовой грани $\alpha > 45°$ (рисунок 1, *б*). Кроме того, предполагали, что переход на неравнокатетный шов при углах $\alpha > 45°$ способствует обеспечению глубины проплавления $h_1 > 0$, а изменение угла наклона шва $\alpha > 45°$ производили при условии обеспечения постоянной площади наплавленного металла F, т.е. при $F_\alpha = F_{45}$.

В соответствии с принятыми допущениями путем несложных геометрических преобразований было получено следующее расчетное соотношение для определения глубины проплавления вертикальной стенки h_1 при переходе на технологию изготовления металлоконструкций с применением неравнокатетных швов:

$$\frac{h_1}{K} = \frac{\mathrm{tg}^2\alpha - 1}{2\sqrt{\mathrm{tg}\alpha}}. \quad (4)$$

Используя соотношения (3) и (4), по аналогии с работой [7] было получено окончательное выражение для определения параметра β_α, характеризующего несущую способность тавровых соединений при переходе на технологию изготовления с применением неравнокатетных швов ($\alpha > 45°$) и использованием рассматриваемых способов сварки (РДС, МДС и АДС):

$$\beta_\alpha = 0,7\left(\frac{\beta_{45}}{0,7} + \frac{\mathrm{tg}^2\alpha - 1}{2\sqrt{\mathrm{tg}\alpha}}\right). \quad (5)$$

Анализ зависимости $\beta_\alpha = \beta\left(\beta_{45}, \alpha\right)$ для рассматриваемых способов сварки свидетельствует о существенном повышении несущей способности сварных тавровых соединений при переходе на сварку неравнокатетными швами. В частности, для рассматриваемых сварных соединений с ростом угла наклона лобовой грани шва $\alpha > 45°$ диапазон значений β_{45} смещается от значений [0,7; 1,1], принятых для равнокатетных швов, до значений β_α [1,23; 1,56] при $\alpha = 60°$ и выше.

Следует отметить, что полное проплавление вертикальной стенки рамной металлоконструкции ($h_1 + h_2 = t/2$), гарантирующее максимальную несущую способность рассматриваемых соединений, происходит при следующем сочетании геометрических параметров угловых швов α, K/t при различных способах дуговой сварки (РДС, МДС и АДС), характеризующихся относительной глубиной проплавления β_{45} ($\beta_{45} = 0,7\ldots1,1$):

$$\frac{\mathrm{tg}^2\alpha - 1}{\sqrt{\mathrm{tg}\alpha}} = \frac{1 - \frac{K}{t}\left[2\sqrt{2}\left(\beta_{45} - 0,7\right)\right]}{K/t}. \quad (6)$$

Полученное выражение (6) является итерационным и не решается в замкнутом виде относительно параметра α.

С учетом того, что в нормативных документах [2 и др.] рекомендуются диапазон относительных катетов $(K/t)_{опт}$ или относительных площадей наплавленного металла $(F/t)_{опт}$ в пределах их значений [1,0; 0,5], используя выражение (6) расчетным путем был определен оптимальный диапазон изменения углов наклона неравнокатетных швов $[\alpha]_{опт}$ при использовании различных способов дуговой сварки (РДС, МДС и АДС), обеспечивающих относительную глубину проплавления $h_{об} = h_1 + h$. Полученная расчетная зависимость $\alpha_{опт} = \alpha_{опт}(K/t, \beta_{45})$ может быть представлена линейными аппроксимированными выражениями в виде

$$\begin{aligned} (K/t)_{опт} &= 0,5; \quad \alpha_{опт} = 63,25° - 26,85°\left(\beta_{45} - 0,7\right); \\ (K/t)_{опт} &= 1,0; \quad \alpha_{опт} = 56,25° - 33,15°\left(\beta_{45} - 0,7\right). \end{aligned} \tag{7}$$

Важным моментом при сварке тавровых соединений с применением технологии их изготовления неравнокатетными швами является установление координаты смещения электрода (или сварочной проволоки) z по отношению к вершине прямого угла у основания углового шва (рисунок 2).

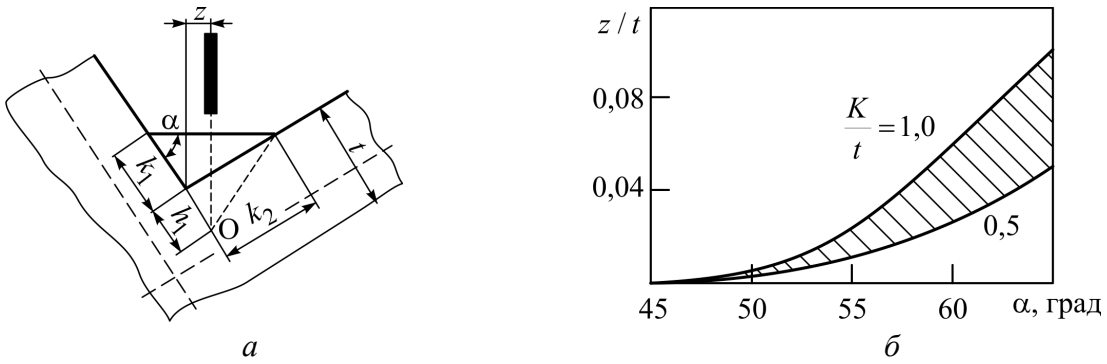


Рисунок 2 – Зависимость относительного смещения электрода (проволоки) z/t от величины наклона лобовой грани шва α в диапазоне значений K/t [0,5; 1,0]

Как показал анализ геометрической формы тавровых соединений, выполненных равнокатетными и неравнокатетными швами, смещение оси x при переходе на сварку неравнокатетными швами z не зависит от величины проплавления h и определяется только углом наклона лобовой грани шва α:

$$\frac{z}{t} = \frac{K}{t}\left[\frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{1+\mathrm{tg}^2\alpha}{\mathrm{tg}\alpha}} - \sqrt{2}\right)\right]. \tag{8}$$

Таким образом, на основании теоретического анализа установлены оптимальные конструктивно-геометрические параметры сварных тавровых соединений $\alpha_{опт}$, позволяющие обеспечить их максимальную несущую способность при условии сохранения относительного объема (площади) наплавленного металла K/t при использовании различных способов дуговой сварки (РДС, МДС и АДС), а также установить относительный параметр, характеризующий смещение оси сварочной дуги z/t и угол наклона электрода $\theta = 90 - \alpha_{опт}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия (с Поправками). М. : Стандартинформ, 2016.

2. СНиП-II-23-81*. Стальные конструкции (с Изменениями, с Поправкой). М. : ЦИТП, 1990.

3. *Барышев В.М.*, *Новиков Ю.А.* Сокращение объема наплавленного металла в расчетных угловых швах стальных конструкций // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1980. № 8. С. 20-21.

4. О возможности уменьшения размеров катетов в сварных соединениях с угловыми швами / О.А. Бакши [и др.] // Прогрессивная технология сварки и резки металлов. Иркутск, 1979. С. 4-14.

5. *Когут Н.С.*, *Шахматов М.В.*, *Ерофеев В.В.* Несущая способность сварных соединений. Львов : Свит, 1991. 184 с.

6. *Николаев Г.А.*, *Винокуров В.А.* Сварные конструкции. Расчет и проектирование : учебник для вузов. М. : Высш. шк., 1990. 446 с.

7. Решение вопросов ресурсосбережения на стадии конструктивно-технологического проектирования сварных соединений с угловыми швами / В.В. Ерофеев [и др.] // Первые международные Косыгинские чтения – 2017: труды междунар. науч.-техн. форума / РГУ. М., 2017. Т. 1. С. 54-58.

8. Сварка. Резка. Контроль : справочник / Н.П. Алешин [и др.]. М. : Машиностроение, 2004. 480 с.

УДК 66.096.5 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-318-321

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ ГРАНУЛИРОВАННОГО КОМПОЗИТНОГО ТОПЛИВА
CALCULATED AND EXPERIMENTAL STUDY OF DRYING OF GRANULAR COMPOSITE FUEL

Овчинников Лев Николаевич, Овчинников Николай Львович
Lev N.Ovchinnikov, Nikolay L.Ovchinnikov

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail: ovchinnikov_l40@mail.ru, ovchinnikovnl_1972@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены расчётно-экспериментальные исследования по определению рациональных условий гранулирования и сушки композитного топлива на основе торфа, опилок, целлюлозы и модификатора. Представлены результаты исследований тепло- и массообменных процессов, протекающих при сушке гранул топлива в сушилке с фильтрующим слоем.

Abstract: Calculated and experimental studies to determine the rational conditions for granulating and drying composite fuel based on peat, sawdust, cellulose and modifier are considered. The results of studies of heat and mass transfer processes occurring during drying of fuel pellets in a dryer with a filter layer are presented.

Ключевые слова: гранулы, топливо, сушка, фильтрующий слой
Keywords: pellets, fuel, drying, filter layer

Гранулированное композитное топливо применяют в топливно - энергетическом комплексе как сырьё для получения тепловой и электрической энергии. Гранулы можно получать из торфа, отходов сельского хозяйства и лесопильных производств, угольной промышленности с небольшой добавкой связующих модификаторов.

Одной из основных стадий получения гранулированного биотоплива является их сушка, в частности, в конвективном потоке теплоносителя через фильтрующий слой материала.

В работе рассмотрены расчётно-экспериментальные исследования по разработке рациональных технологических условий гранулирования и сушки частиц готового продукта с заданным массовым соотношением композитных компонентов, удовлетворяющих

требованиям стандартов ЕС (прочность, влажность, зольность, теплота сгорания, содержание вредных веществ).

Экспериментальное исследование проводилось на лабораторной установке, включающей газодувку, электрокалорифер, "Z"-образный смеситель, шнековый гранулятор, приборы КИП и А.

Исходные измельчённые компоненты (торф, целлюлоза, опилки, КМЦ) и вода подавались в заданном соотношении в смеситель и после их смешивания, сформированная паста, поступала в экструдер для получения гранул заданного размера. Приготовленная навеска гранул загружалась в кювету и помещалась на газораспределительную решетку конвективной сушилки. Через определенные интервалы времени фиксировались значения температур воздуха под решеткой, в слое, в кювете и над слоем. Убыль влаги в гранулах слоя измерялась периодически с помощью электронных весов.

Для нахождения рациональных технологических условий получения качественных гранул биотоплива был выбран метод математического планирования экстремальных экспериментов (ПФЭ) с размерностью $N=2^k=2^3=8$, где N число опытов (число возможных комбинаций из трех факторов на двух уровнях) [1].

В качестве исследуемых параметров были выбраны:Y_1 – конечная относительная влажность гранул, масс. %; Y_2 – прочность гранул, МПа. Независимые переменные: X_1– температура воздуха под решеткой, $^{\circ}$C; X_2 – содержание модификатора в смеси, гр.; X_3 – время сушки, мин; X_4 – масса слоя, гр.; X_5 – расход воздуха, м^3/час. Интервалы и уровни варьирования независимых переменных : ΔX_1=70-90 ^{0}C; ΔX_2= 1-3 масс %; ΔX_3 =25-35мин. ; ΔX_4 = 17-27гр.; ΔX_5 = 40-50 м^3/час.

После математической обработки результатов эксперимента, проверки коэффициентов регрессионных уравнений по критерию Стьюдента и их адекватности по критерию Фишера были получены следующие регрессионные зависимости:

уравнение для определения конечной влажности:

$$y_1 = 0{,}022 - 0{,}00096x_1 - 0{,}0012x_3 - 0{,}0000875x_4 + 0{,}00041x_5 \quad ; \qquad (1)$$

уравнение для определения прочности:

$$y_2 = 0{,}2925 + 0{,}01x_1 - 0{,}01x_2 + 0{,}0175x_3 + 0{,}05x_5 \qquad (2)$$

Оптимизация технологических параметров получения композитного топлива была основана на градиентном методе получения целевой функции. В нашем случае основной целевой функцией являлась зависимость прочности гранул от независимых переменных с использованием формулы для расчета шага по независимой переменной:

$$\Delta X_i = \frac{C\dfrac{\partial Y}{\partial X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\dfrac{\partial Y}{\partial X_i}\right)^2}} \qquad (3)$$

где C=1,2,3…100 - константа, определяющая размеры "шага".

Графическая иллюстрация влияния независимых переменных на исследуемый параметр изображена на рисунке 1.

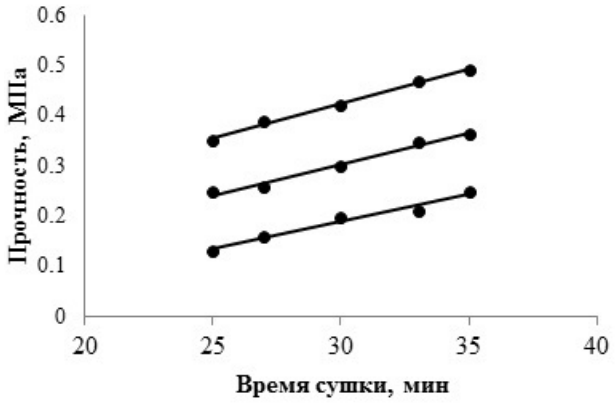


Рисунок 1 – Зависимость прочности топливных гранул от времени сушки при различной температуре воздуха под решеткой: 1–80°С; 2–90°С; 3–70°С.
Точки – эксперимент, линии – расчет.

Из рисунка 1 видно, что прочность гранул возрастает с увеличением времени сушки и температуры воздуха под решёткой и через 35 минут достигает значения 0,5 МПа.

Основная цель расчётно-экспериментальных исследований процесса сушки гранулированного топлива состояла в получении экспериментальных зависимостей массообмена $Sh=f(Re_г)$ и влагосодержания гранул от их температуры $U=f(t_м)$ по методикам , изложенным в [2-5] , в соответствии с которыми

Критерий Шервурда:

$$Sh = \frac{\beta \cdot d_{экв.}}{D} \quad (4)$$

где β – коэффициент массоотдачи, м/с; D – коэффициент диффузии, $м^2/с$; $d_{экв.}$ – диаметр эквивалентный частицы, м.

Экспериментальный коэффициент массоотдачи:

$$\beta_{экс} = \frac{\Delta m \cdot R \cdot T}{F_{исп.} \cdot \Delta P_{ср} \cdot M_{H_2O} \cdot \rho_{ист.} \cdot g \cdot \tau} \quad (5)$$

где $\rho_{ист.}$ – истинная плотность гранулы, $кг/м^3$, Δm – количество испарившейся влаги в процессе сушки, кг; F – площадь поверхности, $м^2$; $\Delta P_{ср.}$ – средняя движущая сила, Па.

Критерия Рейнольдса (газовый) $Re_г$:

$$Re_г = \frac{W_ф \cdot d_{экв.} \cdot \rho_г}{\mu}, \quad (6)$$

где $W_ф$ – фиктивная скорость воздуха в аппарате, м/с; μ – динамический коэффициент вязкости воздуха, Па·с; $d_{экв}$ – эквивалентный диаметр частицы.

После обработки результатов расчётно - экспериментальных исследований с применением метода наименьших квадратов были получены критериальные зависимости:

а) для массообмена:

$$Sh = 0{,}558 \cdot Re_г^{\,0,1} \quad (7)$$

б) для изменения влагосодержания гранул от их температуры:

$$U = 0{,}575e^{-0{,}031t_м}, \quad (8)$$

На рисунке 2 приведена удовлетворительная сходимость (до 10 %) расчетных и экспериментальных значений критерия Шервуда в диапазоне значений критерия $Re_г$ = 860 – 1100.

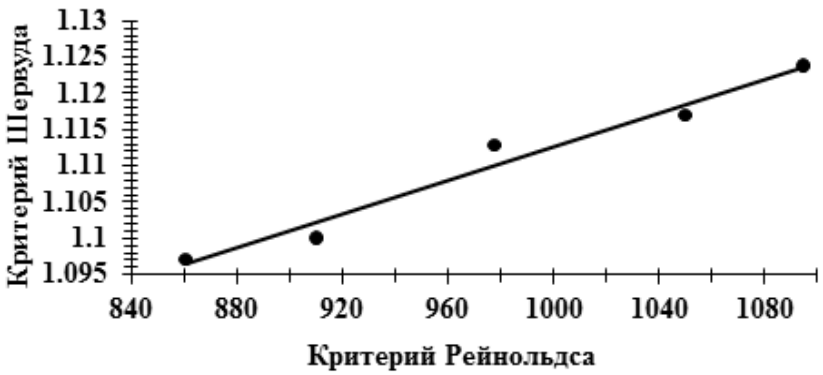


Рисунок 2 – Зависимость критерия Шервурда Sh от критерия $Re_г$:
Линия – расчет; точки – эксперимент. Диапазон значений критерия $Re_г$ = 860 – 1100

Графическая иллюстрация результатов экспериментальных исследований изменения влагосодержания гранул от их температуры $U=f(t_м)$ представлена на рисунке 3.

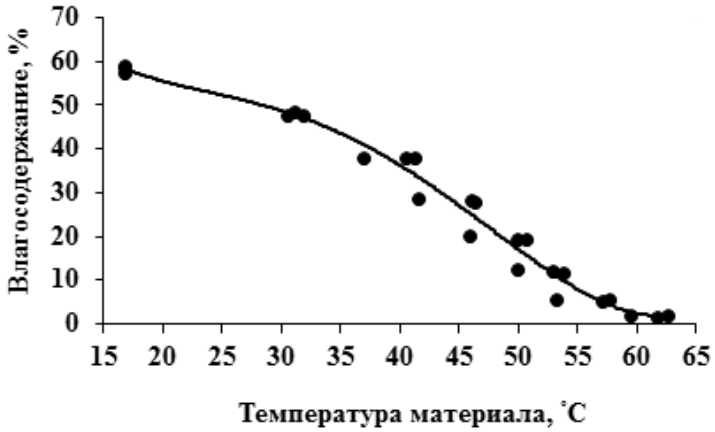


Рисунок 3 – Зависимость влагосодержания (U) от температуры материала ($t_м$) для диапазона значений критерия Рейнольдса $Re_г$ = 860 ÷ 1100. Линия – расчет. Точки – эксперимент.

Из рисунка 3 видно, что отклонение между экспериментальными и расчетными значениями влагосодержания от температуры частицы не превышает 10 %, что говорит о достаточной сходимости эксперимента и расчёта. Обработка результатов экспериментальных исследований влагосодержания гранул композитного топлива от их температуры методом наименьших квадратов позволила получить расчётную зависимость в виде:

$$U = 0{,}575e^{-0{,}031t_м}. \quad (9)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия, 1971. 496 с.

2. Овчинников Л.Н. Грануляция минеральных удобрений во взвешенном слое: монография. И.: Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2010. 168 с.

3. Лыков А. В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1971. 324 с.

4. Рудобашта С.П., Кошелева М.К. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. № 6 (360). С. 175-180.

5. Рудобашта С. П., Карташов Э. М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: Колос, 2010. 320 с.

УДК 677.4.027.62 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-322-326

РАЦИОНАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СУШКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
RATIONAL METHODS OF DRYING AND HEAT TREATMENT OF TECHNICAL TEXTILE MATERIALS

Ясинская Наталья Николаевна, Скобова Наталья Викторовна
Natalia N. Yasinskaya, Natalia V. Skobova

Витебский государственный технологический университет, Беларусь, Витебск
Vitebsk State Technological University, Belarus, Vitebsk
(email: YasinskayNN@rambler.ru, skobova-nv@mail.ru)

Аннотация: Проведен сравнительный анализ конвективной и СВЧ сушки технических тканей из полиамидных и вискозных нитей, пропитанных дисперсией стирол-акрилата (300-500 г/л).

Abstract: A comparative analysis of convective and microwave drying of technical fabrics made of polyamide and viscose yarns impregnated with styrene-acrylate dispersion (300-500 g / l) has been carried out.

Ключевые слова: технические ткани, пропитка, аппрет, дисперсия стирол-акрилата, конвективная и СВЧ-сушка.

Key words: technical fabrics, impregnation, finishing, styrene-acrylate dispersion, convective and microwave drying.

Одним из способов формирования технических текстильных материалов с заданными функциональными свойствами является пропитка тканых полотен полимерными аппретами с последующей сушкой и термофиксацией [1]. В настоящее время основными способами сушки и термообработки текстильных материалов являются конвективный, радиационный контактный и комбинированный. Наиболее простым и распространенным является конвективный способ, что объясняется простотой и дешевизной используемого оборудования. В результате ранее проведенных исследований [2], установлено, что для завершения процессов сушки и термофиксации технических текстильных материалов при использовании в качестве теплоносителя горячего воздуха (120 – 180^{0}С) требуется 10 - 12 мин, в зависимости от сырьевого состава тканого полотна и концентрации полимерного аппрета. Недостатком конвективного способа при сушке технического текстиля поверхностной плотностью выше 400 г/м^2, пропитанных полимерными дисперсиями аппретов является во-первых, разрушение аппрета, во-вторых, в некоторых случаях подплавление волокон, в третьих, значительная миграция дисперсной фазы к поверхностным слоям материала, что приводит к неравномерности его функциональных свойств.

Рациональным решением устранения указанных недостатков является использование для сушки текстильных материалов большой поверхностной плотности электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона – СВЧ сушка [1].

В отличие от конвективной при СВЧ сушке температура в центре выше, чем на поверхности материала, термодиффузия направлена от центра к поверхности, но при этом влагосодержание на поверхности выше, чем в центре, т.е. концентрационная диффузия влаги направлена в обратном направлении и оказывает сопротивление перемещению влаги. Испарение влаги в центре материала больше, чем на поверхности, так как температура в центре выше, чем на поверхности. Возникающий градиент давления является движущей силой переноса влаги в виде пара в объеме текстильного материала [3].

Проведены экспериментальные исследования процесса СВЧ сушки технических тканей из полиамидных и вискозных нитей (460 г/м^2), пропитанных водной дисперсией стирол-акрилата (300-500 г/л) и сравнение с кинетикой сушки той же ткани в условиях

конвективного нагрева [1,2]. Сушка в условиях СВЧ излучения проводилась при мощности генератора 300, 600 и 850 Вт частоте 2450 МГц. Кинетические кривые СВЧ-сушки представлены на рисунке 1.

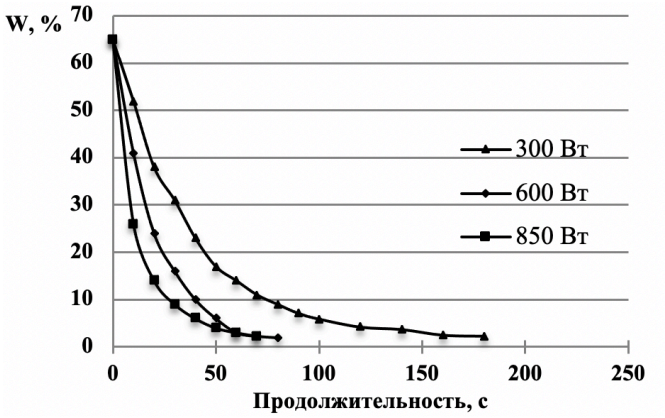


Рисунок 1 – Кинетические кривые СВЧ-сушки технических тканей

В начале процесса СВЧ обработки влажная ткань быстро нагревается, и скорость испарения влаги увеличивается, достигая максимального значения. Испарение влаги происходит при температуре близкой к 100 ^{0}C. После достижения максимального значения происходит снижение интенсивности испарения, и температура материала повышается. На кривых сушки практически не наблюдается периода постоянной скорости, сушка протекает в периоде падающей скорости. Эта особенность СВЧ сушки характерна для тонких материалов [3].

Анализируя и сравнивая конвективную и СВЧ сушку технических тканей из полиамидных и вискозных нитей можно сделать следующие выводы:

- при одинаковой мощности СВЧ излучения и начальном влагосодержании W_0 кривые сушки для полиамидных и вискозных материалов совпадают, изменение концентрации полимерного связующего также не изменяет зависимости, что можно объяснить высокой скоростью испарения влаги с объема текстильного материала, толщина которого не превышает $4*10^{-3}$ м;
- с увеличением мощности генератора СВЧ излучения интенсивность испарения влаги возрастает, и продолжительность сушки до равновесного влагосодержания сокращается;
- СВЧ сушка обеспечивает достижение равновесного влагосодержания материала за 70 – 90 с при мощности 600 – 850 Вт, в то время как конвективная сушка за 130 – 200 с для полиамидных материалов и 340 – 380 с для вискозных при температуре воздуха 120 – 140^{0}C [1, 2].

С использованием формулы для расчета продолжительности СВЧ обработки тонких текстильных материалов до заданного влагосодержания [4] рассчитана требуемая продолжительность СВЧ обработки для достижения равновесного влагосодержания технических тканей из вискозных и полиамидных нитей (таблица 1).

Из приведенных данных следует, что по сравнению с конвективной, СВЧ сушка позволяет сократить продолжительность в 2 - 3 раза для полиамидных материалов и 4 - 5 раз для вискозных материалов.

При сушке технических тканей, толщина которых составляет более 1 мм, возникает проблема миграции частиц дисперсной фазы аппрета к поверхности тканого полотна при высушивании. В результате миграции на поверхности образуется пленка, а глубинные слои обедняются связующим. Это приводит к ухудшению физико-механических и эксплуатационных свойств готового материала: уменьшается воздухопроницаемость, возрастает способность к расслаиванию, повышается жесткость. Кроме того, возникают

проблемы при термофиксации, так как образующаяся на поверхности пленка при высоких температурах (170-180^{0}С) начинает разрушаться, что также приводит к ухудшению свойств и внешнего вида материала.

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные значения продолжительности СВЧ сушки технических тканей

Технические ткани из вискозных и полиамидных нитей					
$P_{ген}$ = 300 Вт					
W_p, %	2,3	5	10	20	30
$\tau'_{эксп}$, с	190	108	77	43	31
$\tau_{расч.}$, с	193	110	75	45	29
$P_{ген}$ = 600 Вт					
$\tau'_{эксп}$, с	92	54	35	21	16
$\tau_{расч.}$, с	95	55	37,5	23	15
$P_{ген}$ = 850 Вт					
$\tau'_{эксп}$, с	72	41	26	14	11
$\tau_{расч.}$, с	68	39	26	16	10

Для исследования равномерности распределения дисперсии по объему тканого материала использован метод послойного анализа [5]. Предварительно были подготовлены образцы. Тканое полотно из вискозных нитей, пропитывалось водной дисперсией стирол-акрилата – 300 и 500 г/л, продолжительность пропитки – 10 минут температура пропитки – 20 °С. Затем одна часть образцов подвергалась конвективной сушке при температуре 120^{0}С в течении 340 - 400 с, другая часть СВЧ сушке при мощности 600 Вт в течении 90 с.

Количество отложившейся дисперсной фазы определялось на уточных нитях длиной 10 см, взятых из различных слоев пропитанного полотна, путем их взвешивания и вычитания из найденного значения веса таких же нитей, взятых из непропитанного тканого полотна. Взвешивание нитей осуществлялось на лабораторных аналитических весах с точность 0,0001г.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунках 2, 3.

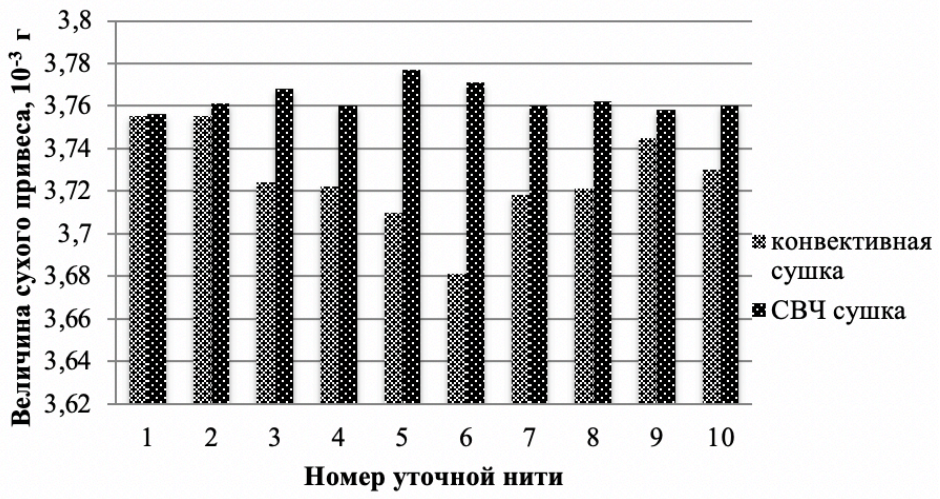


Рисунок 2 – Величина сухого привеса нитей утка ткани при концентрации дисперсии стирол-акрилата 300 г/л

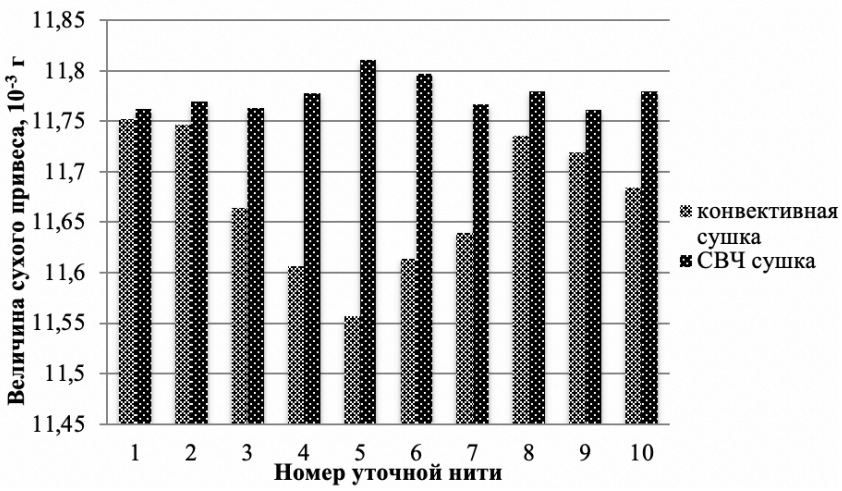


Рисунок 3 – Величина сухого привеса нитей утка ткани при концентрации стирол-акрилата 500 г/л

Как видно, в случае конвективной сушки количество отложившейся дисперсной фазы в глубинных слоях меньше, чем в поверхностных, что подтверждает миграцию частиц аппрета к поверхностным слоям вместе с удаляемой при конвективной сушке влагой. При СВЧ сушке влага удаляется в виде пара, не увлекая дисперсную фазу к поверхности материала. Так как сушка осуществляется изнутри наружу, поверхность материала остается «холодной» и влажной до тех пор, пока изнутри больше не добавиться пара и поверхность не начнет сохнуть. Это предотвращает, во-первых, преждевременное образование полимерной пленки, препятствующей сушке глубинных слоев, во-вторых, длительное действие высоких температур на волокнообразующий полимер и частицы аппрета, которое вызывает деструкцию волокна и связующего в результате чего происходит ухудшение свойств готового материала. Результаты, характеризующие эффективность СВЧ обработки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ конвективной и СВЧ сушки технических тканей из вискозных нитей

Наименование показателя	Концентрация дисперсии 300 г/л		Концентрация дисперсии 500 г/л	
	конвективная сушка	СВЧ сушка (600 Вт)	конвективная сушка	СВЧ сушка (600 Вт)
Продолжительность сушки, с	340	90	400	90
Содержание дисперсной фазы в количестве дисперсии, соответствующей привесу нитей, %	16,2		35,5	
Количество адсорбированной дисперсии на нитях при традиционной пропитке, %	9,5	9,6	29,8	30,0
Количество адсорбированной дисперсии на нитях при СВЧ пропитке, %	-	14,3	-	32,8
Относительный прирост количества адсорбированной дисперсии, %	-	48,9	-	9,3
Коэффициент вариации величины сухого привеса уточных нитей по слоям, %	0,65	0,17	0,54	0,12

Анализируя результаты исследований можно сделать следующие выводы:

- продолжительность сушки в условиях СВЧ нагрева не зависит от концентрации аппрета и сокращается в 4 раза;
- при пропитке ткани в условиях СВЧ обработки повышается степень полезного использования водной дисперсии аппрета, так как количество дисперсной фазы отложившейся на волокне немного ниже ее содержания в количестве дисперсии, соответствующей привесу нитей;
- в условиях СВЧ сушки значительно снижается миграция дисперсной фазы к поверхностны слоям материала, о чем свидетельствует коэффициент вариации величины сухого привеса уточных нитей по слоям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ясинская Н.Н., Ольшанский В.И., Коган А.Г. Композиционные текстильные материалы: монография. Витебск: ВГТУ, 2016. 299 с.

2. Ясинская Н. Н., Скобова, Н.В., Разумеев К.Э. Анализ кинетики сушки и термообработки при формировании текстильных композиционных материалов из химических нитей // Химические волокна. 2020. № 1. С. 32 - 34.

3. Лыков, В.А. Теория сушки. М.: Госэнергоиздат, 1950. 420 с.

4. Ольшанский, А. И. Исследование влагообмена при сушке натуральных тканей в электромагнитном поле сверхвысокой частоты / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский, С. В. Жерносек // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 86, №. 5. – С. 1041–1048.

5. Воюцкий С. С. Курс коллоидной хими: 2-е изд. перераб. и доп. М.: Химия, 1976. 512 с.

УДК 665.6/.7 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-327-329

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ОБУСТРОЙСТВА НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА РАННИХ ЭТАПАХ ОСВОЕНИЯ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ

THE TECHNOLOGIES OF COMPLEX OPTIMIZATION FOR OIL AND GAS FIELDS ON THE EARLIEST STEPS OF DEVELOPMENT AND METHODS OF ANALYSES OF ECONOMICAL EFFICIENCY FOR REALIZATION OF POTENTIAL OF ADDITIONAL OIL PRODUCING

Раткин Леонид Сергеевич
Leonid S. Rathkeen

Совет ветеранов Российской академии наук, Россия, Москва
Veteran's Council of Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow
(e-mail: Rathkeen@bk.ru)

Аннотация: Рассматриваются технологии комплексной оптимизации обустройства нефтегазовых месторождений на ранних этапах освоения. Дополнительно представлены методы оценки экономической эффективности для реализации потенциала дополнительной добычи нефти.

Abstract: The article is devoted to the technologies of complex optimization of development of oil and gas fields on the earliest steps of development. Additionally are presented the methods of analyzing of economical efficiency for realization of potential of additional oil producing.

Ключевые слова: технологии комплексной оптимизации, обустройство нефтегазовых месторождений, методы оценки, экономическая эффективность, реализация потенциала, дополнительная добыча нефти.

Keywords: technologies for complex optimization, development of oil and gas fields, methods of analyzing, economical efficiency, realization of potential, additional oil producing.

При разработке технологии комплексной оптимизации обустройства нефтегазовых месторождений на ранних этапах освоения необходимо уделить особое внимание повышению эффективности концептуального проектирования [1], например, сервисов оптимизации обустройства месторождений, сбора и обработки данных по разведке и разработке нефтегазовых промыслов. Применение программно-технических разработок для проектирования оптимальной сети автодорог с учетом цифровых моделей местности, стоимостных моделей, цифровых моделей рельефа, существующей инфраструктуры, допустимых углов пересечения с другими линейными объектами позволило оптимизировать дорожную сеть. Учет размещения в дорожной сети карьеров стройматериалов с расчетом удаленности дорог от мест их размещения позволило минимизировать логистические затраты. Аналогично, проектирование оптимальной сети трубопроводов с анализом планируемых годовых объемов продукции [2] и финансовых, экономических [3], промышленных и технологических [4-5] параметров продукции по соответствующему отраслевому инвестиционному проекту позволяет оптимизировать трубопроводную сеть с расчетом удельного давления на каждый участок трубы. Учет диаметров труб позволил оптимизировать стоимость строительства трубопроводов в среднем на 10%. Проектирование оптимальной сети ЛЭП с координатами источника или источников электроэнергии, класса напряжения на выходе из источника, координат потребителей, класса напряжения на каждом потребителе и профиля электрических нагрузок по годам сокращает время и снижает затраты на проектирование. Оптимизация размещения производственных и строительных площадок, в среднем, дает экономию затрат от 10 до 20%. Например, программное обеспечение (ПО) GeoDesign ориентировано на оптимизацию проектирования сети автодорог, в т.ч., с учетом

карьеров стройматериалов, трубопроводов, ЛЭП, площадок, логистических маршрутов: достигается оптимизация до 30% за счет учета мест размещения пунктов поступления и потребления материально-технических ресурсов (МТР), размещения промежуточных складов и расчета стоимости на транспортировку, хранение и погрузочно-разгрузочные работы. Еще одна сфера применения – оптимизация стоимости МТР: выполняется расчет оптимального по стоимости логистического варианта транспортировки строительных материалов с учетом различных ограничений и проводится предиктивная аналитика с формированием подробных рекомендаций по освоению карьеров на разных этапах строительства. В ПО реализована автоматическая обработка геофизических данных с автоматической корреляцией скважин и построением 3D-моделей месторождения, автоматическим определением литотипов, идентификацией фильтрационно-емкостных свойств коллекторов, восстановлением каротажных данных, контролем качества и поиском неточностей в каротажных данных с выявлением «пропущенных интервалов» - маломощных пластов и протопластов. ПО применимо для проектирования оптимального размещения объектов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на шельфах: решаются задачи по комплексному финансово-экономическому и промышленно-технологическому обоснованию применения ВИЭ на основе природно-климатического, технического и экономического потенциала территории, выбору оптимального типа и состава оборудования и оптимального местоположения [6].

ПО Pipesim («Schlumberger») и ICM («Ingenix Group») может применяться и для оценки экономической эффективности вариантов наземного обустройства с целью реализации потенциала дополнительной добычи нефти. На примере задачи по разработке концептуального проекта и технико-экономического обоснования строительства новых кустов скважин на месторождении, выполненной в научной кооперации с рядом предприятий и организаций, включая академические институты [7], использовался Pipesim – симулятор многофазного потока, на котором моделировалась работа добывающих и нагнетающих скважин, конструкция скважин с детальным моделированием забоя, механизированная добыча и оптимизация режимов работы скважин. Также в ПО Pipesim для одноточных трубопроводов и сетей выполнялся подбор оптимального диаметра, определение потенциальных осложнений (в т.ч., эрозионный и коррозионный износы, парафины, гидратообразование), анализ сетей сбора продукции и систем распределения закачки любой сложности, включая магистральные трубопроводы, и определение узких мест с оптимизацией сетей сбора. ПО учитывает топологию пространства и размещение наземного оборудования (штуцеров, компрессоров, насосов) с привязкой по ГИС-картам (включая возможность применения карт для определения профиля трубопровода). Инструментом для оценки CAPEX/OPEX и эффективности инвестиций в нефтегазовые проекты [8-9] является ICM, обеспечивающий доступ к уникальной пятиуровневой базе данных затрат из 1800 объектов с возможностью хранения корпоративных баз данных пользователей в удобной структуре. В ICM реализован функционал для редактирования и моделирования стоимости объектов капитального строительства с расчетом профилей CAPEX/OPEX и экономики проектов с учетом налоговых льгот и макропараметров. Реализован импорт данных из Pipesim в ICM с расчетом стоимостных моделей объектов капитального строительства в Ingenix Cost Manager для трубопроводных систем, автодорог, ЛЭП и кустовых площадок месторождений. В ICM реализован расчет стоимости объекта: из Pipesim импортируются координаты трубопроводов и кустовых площадок, диаметры и толщины стенок трубопроводов, глубины прокладок трубопроводов, производительность трубопроводных систем. Также учитываются данные о протяженности объектов с учетом рельефа местности, наличие леса и болот, пересечение водных преград, автомобильных и железных дорог. На топологической основе ICM проводится расчет дополнительных данных: по импортированным координатам из Pipesim на основе ICM происходит построение трубопроводов и кустовых площадок. Возможен также расчет стоимости прочих объектов наземного обустройства: автодорог, объектов основного и вспомогательного производства. Расчеты отражаются на изменении параметрической стоимостной модели ICM: например, исходные данные отражаются на стоимости работ по

монтажу трубопроводов и статьях затрат на строительство трубопроводных систем. Результаты применимы при пересчете стоимости по аналогам: рассчитанные в ICM укрупненные удельные показатели на уровне узлов и блоков облегчают пересчет стоимости, если необходимо применять аналоги.

В завершение отметим, что функция сравнения объектов позволяет оценить и сопоставить финансовые, экономические, промышленные и технологические параметры изделий и их влияние на стоимость строительства в целом и частями (конкретные технологические блоки – изменение толщины стенки, глубины прокладки и т.п.). Итогом тестирования совместной работы Pipesim и ICM в целях реализации концептуального проекта является оптимизированное комплексное решение с учетом пожеланий заказчиков, инвесторов и соисполнителей, многовариантные итерационные расчеты с высоким уровнем детализации и всесторонний анализ рисков проекта. Например, в Ingenix Cost Management для 9 типов трубопроводов учитываются 32 влияющих параметра, для 3 типов условий прокладки дорог – 18 влияющих параметров, для 3 типов кустовых площадок месторождений – 45 влияющих параметров, для 5 уровней напряжений ЛЭП – 15 влияющих параметров (предусмотрена возможность увеличения типов объектов и количества влияющих параметров с установлением корреляционных связей между ними).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова Д.И. Предпосылки дедолларизации современной финансовой системы. В сборнике: Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании. Материалы второй Международной научно-практической конференции. 2019. С. 175-189.

2. Стрыканов А.О., Золотухина Т.С., Лифарь М.В., Колесникова М.С., Анурина Т.Ф., Степанова Д.И. Построение модели кредитного потребительского кооператива на базе РЭУ имени Г.В. Плеханова. В сборнике: ПЛАН И РЫНОК – СОЧЕТАНИЕ НЕСОЧЕТАЕМОГО? сборник статей IX Международной научно-практической конференции «Абалкинские чтения». Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова. 2019. С. 333-339.

3. Степанова Д.И. Некоторые аспекты управления дебиторской задолженностью компании. Аудиторские ведомости. № 1. 2020.С. 73-80.

4. Иванов Л.А., Прокопьев П.С. Изобретения в области нанотехнологий, направленные на решение практических задач. Часть III // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 3. – С. 292–303. – DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-3-292-303.

5. Иванов Л.А., Прокопьев П.С. Изобретения в области нанотехнологий, направленные на решение практических задач. Часть IV // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 4. – С. 447–457. – DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-4-447-457.

6. Иванов Л.А., Разумеев К.Э., Бокова Е.С., Муминова С.Р. Изобретения в области нанотехнологий, направленные на решение практических задач. Часть V // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 6. – С. 719–729. – DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-6-719-729.

7. Раткин Л.С. К столетию со дня рождения Президента АН СССР М.В.Келдыша: у истоков программы пилотируемых космических полетов (пленарный доклад) // Материалы Второй международной научно-технической конференции «Нестационарные, энерго- и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, нано- и биотехнологии – НЭРПО-2011» // Под общей редакцией Г.И.Ефремова.– М.: Издательство МГОУ, 2011, С. 13-16.

8. Раткин Л.С. Автоматизированная информационная система космического экологического мониторинга разработок нефтегазовых месторождений с применением компьютерной стеганографии // В книге: НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ-2015. Аннотации докладов: в 3-х томах. Отв.ред. О.Н.Голотюк. 2015. С.91.

9. Раткин Л.С. Патент на изобретение РФ № 2322693.

УДК 677.017.88 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-330-334

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПОРТИВНОЙ ОДЕЖДЫ ИЗ МЕМБРАННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
TECHNOLOGY OF MANUFACTURING SPORTSWEAR FROM MEMBRANE TEXTILE MATERIALS

Панкевич Дарья Константиновна, Черкасова Татьяна Станиславовна
Darya K. Pankevich, Tatiana S. Cherkasova

Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь, Витебск
Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus, Vitebsk
(e-mail: dashapan@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены вопросы конфекционирования, выбора методов обработки и рациональных режимов ниточных соединений мембранных текстильных материалов для спортивной экипировки с учетом их гигиенических и технологических свойств, изложены результаты исследования структуры, водонепроницаемости, паропроницаемости и прорубаемости растяжимых трехслойных мембранных материалов на трикотажной текстильной основе и предложены методы обработки основных узлов и форма заточки острия иглы, обеспечивающая наименьшую степень повреждения материалов при стачивании.

Abstract: The issues of confection, the choice of processing methods and rational modes of thread connections of membrane textile materials for sportswear, taking into account their hygienic and technological properties, are presented the results of the study of the structure, water resistance, vapor permeability and cut-through of extensible three-layer membrane materials on a knitted textile basis and methods of processing the main units and the shape of the sharpening of the point of the needle, which provides the least degree of damage to materials when sewing.

Ключевые слова: мембранные материалы, спортивная экипировка, конфекционирование, прорубаемость.

Keywords: membrane materials, sportswear, confection, needle cut.

Выросший за последние годы ассортимент материалов, применяемых в швейной промышленности, ставит перед специалистами новые задачи, которые должны быть решены на основе совершенствования технологии изготовления одежды из новых малоизученных материалов. Значительный прорыв произошел в последние годы в развитии ассортимента комплексных и композиционных материалов, применяемых в том числе и для изготовления спортивной экипировки.

Спортивная одежда должна поддерживать оптимальное тепловое равновесие организма во время занятий спортом, обеспечивать защиту от травм и механических повреждений. Она должна быть легкой, удобной, не стеснять движений, быть барьером, защищающим от неблагоприятных внешних воздействий, и средством регулирования процесса тепло - и влагообмена между телом и окружающей средой [1]. Для занятий спортом на свежем воздухе необходима особенная спортивная экипировка. Наиболее актуальна на сегодняшний день спортивная экипировка из растяжимых композиционных мембранных текстильных материалов на трикотажной основе, которые не продуваются ветром, не промокают, позволяют телу спортсмена дышать, поскольку обладают высоким уровнем паропроницаемости и водонепроницаемости, ветрозащитой.

Конфекционирование материалов в пакет изделия, рациональный выбор режимов ниточных соединений, оборудования и методов обработки – каждый из известных этапов проектирования технологии изготовления спортивной одежды из мембранных материалов представляет новую научную задачу в связи с тем, что технологические свойства этих материалов исследованы мало и отрывочно, а использовать рекомендации, разработанные для

подобных материалов, невозможно, поскольку мембранные материалы имеют мало сходства с традиционными хорошо изученными материалами.

Анализ источников литературы [2, 3] и ассортимента материалов, перерабатываемых швейными предприятиями Республики Беларусь, показал, что мембранные материалы, вырабатываемые на трикотажной основе, по растяжимости сопоставимы с трикотажными полотнами I и II групп растяжимости. Определяющими их качество показателями свойств являются паропроницаемость, водоотталкивание, водонепроницаемость, воздухопроницаемость и стабильность уровня этих показателей в процессе эксплуатации. Мембранные материалы обладают высоким уровнем прочности (показатели разрывной нагрузки мембранных материалов лежат в диапазоне 200 – 1000 Н при норме для плащевых материалов 400 Н [6]), водоотталкиванием не ниже 80 баллов, ветрозащитой, поскольку их воздухопроницаемость в условиях проведения стандартного испытания близка к нулю. Показатель водонепроницаемости в среднем для таких материалов превышает значение 10 000 мм. вод. ст. или 98 кПа. Значения показателей паропроницаемости современных мембранных материалов лежат в диапазоне 3 000 – 20 000 г/м2/24ч [4]. Таким образом, свойства мембранных материалов на трикотажной основе позволяют применять их для изготовления спортивной экипировки, предназначенной для занятий спортом на открытом воздухе, на открытой воде, в условиях снегопада и при перемещении спортсмена на высоких скоростях, приводящих к существенному обдуву холодным воздухом: гребля на байдарках и каноэ, каякинг, лыжный и велосипедный спорт, биатлон и т.п.

Цель работы – разработка рекомендаций по технологии изготовления спортивной экипировки из растяжимых мембранных текстильных материалов на основе исследования их структуры, гигиенических и технологических свойств.

Исследовали материалы, применяемые для изготовления облегченных спортивных костюмов биатлониста для занятий при среднегодовых влажностно-температурных показателях зимнего периода, которые для Республики Беларусь составляют минус 4°С и 85% влажности воздуха [5]. Микроструктуру мембранных текстильных материалов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на растровом электронном микроскопе VEGA II LSH («TESCAN», Чехия). Микрофотография одного из исследуемых материалов представлена на рисунке 1. Характеристика структуры образцов, составленная по результатам их микроскопии, представлена в таблице 1.

Паропроницаемость определяли по ГОСТ Р 57514-2017 «Ткани с резиновым или полимерным покрытием для водонепроницаемой одежды. Технические условия». Установленные стандартом климатические условия моделировали в климатической камере YTH-408-40-1P («Tuantao», Китай).

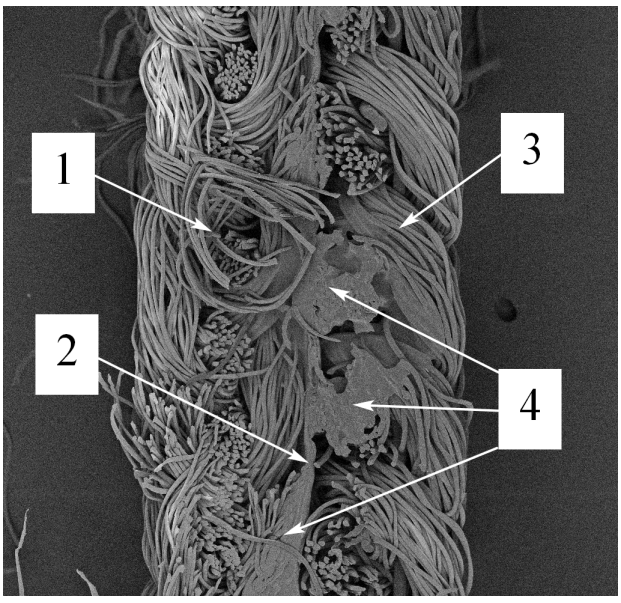


Рисунок 1 – Микрофотография трехслойного мембранного материала, образец №4 (×180).

1 – полотно изнаночной стороны,
2 – монолитная мембрана,
3 – полотно лицевой стороны,
4 – связующее, глубоко проникшее в структуру текстильных полотен.

Таблица 1 – Характеристика структуры исследуемых образцов мембранных материалов

Номер образца /артикул	Характеристика структуры мембранных материалов, наблюдаемой в микроскоп
1 / 3L-BlcP	Общая толщина около 960 мкм. Лицевая сторона – трикотажное полотно переплетения кулирная гладь. Изнаночная – трикотажное полотно одинарного комбинированного переплетения (сочетание поперечносоединенного и плюшевого). Между слоями монолитная ПУ мембрана толщиной около 25 мкм, скрепленная с текстильными полотнами точечно по опорным поверхностям.
2 / 3L-BBlc	Общая толщина около 840 мкм. Лицевая сторона– ткань полотняного переплетения. Изнаночная – трикотажное двуластичное полотно с ворсовым эффектом. Между слоями монолитная ПУ мембрана толщиной около 25 мкм, скрепленная с текстильными полотнами точечно по опорным поверхностям.
3 / 3L-GBlc	Общая толщина около 850 мкм. Лицевая сторона – трикотажное полотно переплетения кулирная гладь. Изнаночная – трикотажное полотно с развитым ворсом. Между слоями монолитная ПУ мембрана толщиной около 20 мкм, скрепленная с текстильными полотнами точечно по опорным поверхностям.
4 / 3L-Pstr	Общая толщина около 650 мкм. Лицевая сторона – трикотажное полотно одинарного поперечносоединенного переплетения. Изнаночная – трикотажное полотно двуластичного переплетения. Между слоями монолитная ПУ мембрана толщиной около 20 мкм, скрепленная с текстильными полотнами связующим, глубоко проникающим в структуру текстильных слоев.

Рассчитывали показатель абсолютной паропроницаемости по результатам взвешивания на лабораторных электронных весах PA 214 C («OHAUS Corporation», США) стаканчиков с водой, закрытых исследуемыми образцами, с интервалом времени 8 часов.

Водонепроницаемость по ГОСТ 413 – 91(ИСО 1420 – 87) определяли прибором «AVENO AG17-3» (Китай) с испытательной головкой диаметром 100 см2 при скорости повышения гидростатического давления 10 кПа/мин, подавая давление на лицевую сторону зажатого в кольцевом зажиме образца и завершая испытание при обнаружении первой капли воды на изнаночной стороне. Результаты исследования определяющих показателей гигиенических свойств материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2– Результаты исследования гигиенических свойств мембранных материалов

Номер образца / артикул	Поверхностная плотность, г/м2	Водонепроницаемость, кПа	Абсолютная паропроницаемость, г/м2/24ч
1 / 3L-BlcP	328	177	3344
2 / 3L-BBlc	279	180	606
3 / 3L-GBlc	244	116	3082
4 / 3L-Pstr	305	169	3726

Анализ данных таблицы 2 показывает, что исследуемые материалы обладают высоким уровнем водонепроницаемости, но низким уровнем паропроницаемости относительно указанного в источниках литературы среднего диапазона значений 3 000 – 20 000 г/м2/24ч. Образец №2 не может быть рекомендован для изготовления спортивной экипировки, поскольку обладает недопустимо низким уровнем паропроницаемости и не обеспечит необходимый комфорт в условиях спортивных тренировок.

Мембранные материалы обладают плотной структурой, поэтому создают высокое сопротивление проколу иглой и характеризуются повышенной прорубаемостью. При стачивании деталей одежды из мембранных материалов прорубаемость материалов иглой становится основным критерием оценки качества ниточного соединения, поскольку структура этих материалов такова, что зафиксированные в композите слои текстиля уже не ведут себя так, как они вели бы себя по-отдельности: петли трикотажных полотен не сдвигаются при проколе иглой, филаменты нитей не раздвигаются, а проколы от игл становятся неустранимыми.

Исследование прорубаемости мембранных материалов, выбранных для изготовления спортивной экипировки, проводили по методике, изложенной в источнике [6]. Выбранные материалы исследовали по показателям явной прорубки (количество разрушенных элементов структуры на 100 проколов иглой) и скрытой прорубки (изменение значения разрывной нагрузки прошитых без нитки образцов по сравнению с контрольными образцами).

Использовали иглы фирмы «Schmetz»с заточкой острия SES, SPI и KN, рекомендуемые для стачивания материалов с полимерным слоем и для трикотажных полотен. Номер иглы устанавливали в соответствии с толщиной материала. Результаты исследования представлены в таблице 3.

Анализ результатов исследования позволяет однозначно рекомендовать заточку острия типа KN для всех материалов, поскольку при использовании иглы с такой заточкой явная и скрытая прорубка мембранных материалов меньше, чем при использовании других типов заточки игл, принявших участие в эксперименте. Образец №4 не рекомендуется использовать в массовом производстве одежды, поскольку он прорубается даже при использовании заточки острия иглы типа KN и имеет более 15 проколов с разрушенной структурой на 100 проколов. Такая особенность материала связана с тем, что филаменты, образующие нити полотна, извитые, располагаются в нити разрозненно и закреплены глубоко проникшим в структуру полотна связующим, поэтому, не имея возможности сдвигаться, легко попадают под иглу (рисунок 1). Это придает материалу пушистость и мягкий гриф, но отрицательно сказывается на его прорубаемости.

Таблица 3 – Результаты исследования прорубаемости мембранных материалов

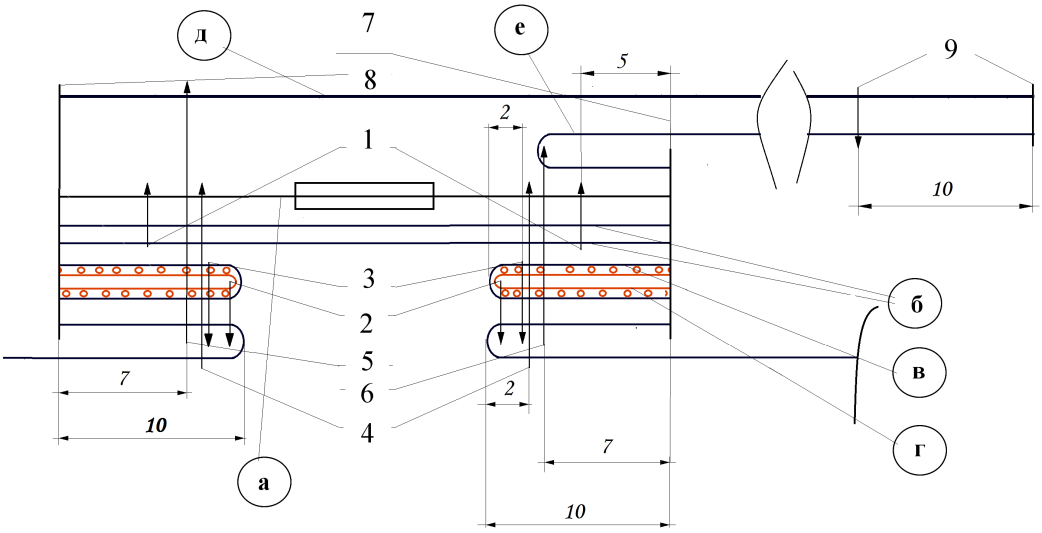
Номер образца / артикул	Номер и форма заточки острия иглы	Количество разрушенных элементов на 100 проколов иглой	Разрывная нагрузка, Н		Степень повреждения, %
			контрольной пробы	проколотой пробы	
1 / 3L-BlcP	75 SES	23	858	820	4,4
	75 SPI	12		834	2,7
	75 KN	4		858	0
3 / 3L-GBlc	75 SES	33	1140	1020	10,5
	75 SPI	15		1020	10,5
	75 KN	9		1030	9,6
4 / 3L-Pstr	75 SES	95	770	520	32,5
	75 SPI	78		532	30,9
	75 KN	29		640	16,9

При выборе методов обработки трехслойных мембранных материалов на трикотажной основе необходимо учесть тот факт, что материалы являются двусторонними и позволяют применять малооперационную технологию, что значительно сокращает количество сборочно-соединительных операций и увеличивает производительность труда [7]. Используют универсальное швейное оборудование, оснащенное дополнительными механизмами для улучшения продвижения материалов, цепного и челночного стежка. В связи с прорубаемостью материалов используют в основном стачные швы, за исключением обработки узлов, где требуется закрепление припусков (карманы, края бортов). Влажно-тепловую

обработку узлов изделий выполняют с помощью утюгов с фторопластовой обтяжкой при температуре 110°С без сильного давления. Срезы деталей либо окантовывают эластичной окантовочной тесьмой, либо обметывают. Дублирование деталей клеевыми прокладками не допускается, для предохранения от растяжения используют обтачки из нерастяжимого материала, как показано на рисунке 2.

Выводы

Проведено исследование структуры, технологических и гигиенических свойств растяжимых мембранных материалов на трикотажной основе, по результатам которого даны рекомендации по конфекционированию материалов и технологии обработки спортивной одежды из них.



а) тесьма-молния, б) туннель, в) обтачка кармана, г) клеевая прокладка обтачки кармана, д) нижняя подкладка кармана, е) верхняя подкладка кармана

Рисунок 2 – Сечение узла обработки прорезного кармана на переде спортивной куртки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панкевич Д. К. Разработка спортивной экипировки для детей младшего школьного возраста // сборник статей XXV Международного научного конгресса «Олимпийский спорт и спорт для всех». Минск: БГУФК, 2020. С. 425.

2. Буркин А. Н., Панкевич Д. К. Гигиенические свойства мембранных текстильных материалов. Витебск: УО «ВГТУ», 2020. 190 с.

3. Holmes D. A. Waterproof breathable fabrics /in book: Handbook of technical textiles. // Edited by Richard Horrocks. The Textile Institute, Cambrige: Elsevier, 2000. 576 p.

4. Williams J. T. Textiles for cold weather apparel. Elsevier: Woodhead Pablishing Ltd, 2009. 432 p.

5. Справочник по климату Республики Беларусь // 2021. https://www.pogoda.by/meteoarchive/

6. Бузов Б.А., Алыменкова Н. Д., Петропавловский Д.Г. Практикум по материаловедению швейного производства. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 416с.

7. Конопальцева Н. М., Рогов П. И., Крюкова Н. А. Конструирование и технология изготовления одежды из различных материалов. В 2 ч. Ч 2: Технология изготовления одежды. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 288с.

УДК 661.99 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-335-337

ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ГАЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО СЖИГАНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ
THE TECHNOLOGY OF MAGNETIC-ELECTRIC ACTIVATION OF GAS TO INCREASE THE ENERGY AND RESOURCE EFFICIENCY OF ITS COMBUSTION AND THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF COMBUSTION PRODUCTS

Челноков Виталий Вячеславович[*], Заболотная Елена[*,], Матасов Алексей Вячеславович[*]**
Vitalij V. Chelnokov[*], Elena Zabolotnaya[*,], Aleksej V. Matasov**

[*]Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, Москва
[**]АО Научный центр «Малотоннажная химия»
[*]D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russia, Moscow
[**]JSC "Fine Chemicals R&D Centre", Russia, Moscow
(e-mail: zabolotnaya.e@inbox.ru)

Аннотация: Сформулированы основные принципы системного подхода при исследовании закономерностей явлений магнитно-электрической активации процессов сжигания углеводородосодержащих отходящих газов для генерации теплоты. Разработана методика анализа состава газов, плана исследований закономерностей явлений магнитно-электрической активации процессов сжигания углеводородосодержащих отходящих газов для генерации теплоты.

Abstract: The basic principles of the system approach in the study of the regularities of the phenomena of magnetic-electric activation of hydrocarbon-containing waste gases combustion processes for heat generation are formulated. A method for analyzing the gases composition and a plan for studying the regularities of the phenomena of magnetic-electric activation of hydrocarbon-containing waste gases combustion processes for generating heat has been developed.

Ключевые слова: сжигание промышленных газов, магнито-электрическая активация, выработка тепла

Keywords: industrial gas combustion, magnetic-electric activation, heat generation

В соответствии с сформулированной стратегией и постановкой основной задачи исследований проведены системный анализ современной теоретической базы по проблеме активации процессов горения газов под воздействием магнитных и электромагнитных полей.

Для осуществления разработанного плана в соответствии с данной методикой разработано конструкционно-технологическое оформление, спроектирован, создан и запущен лабораторный испытательный стенд для исследований закономерностей явлений магнитно-электрической активации процессов сжигания УВСОГ для генерации теплоты. Проведены исследования явлений магнитно-электрической активации процессов горения УВСОГ на исследовательском стенде. На основании анализа результатов исследований магнитно-электрической активации процессов сжигания УВСОГ для генерации теплоты выявлены основные и значимые закономерности магнитно-электрической активации процессов сжигания УВСОГ для генерации теплоты для уточнения гипотезы обобщенной физической модели магнитно-электрической активации процессов сжигания УВСОГ для генерации теплоты.

Предложенная схема (рисунок 1) и способ подготовки газообразного топлива и воздуха перед подачей в устройство сжигания имеет нижеследующие основные особенности, которые позволяют наилучшим образом активизировать процессы горения в топочных устройствах.

1) Величину напряжения, создаваемого источниками высокого напряжения на клеммах электродов разрядников в ионизаторах газообразного топлива и воздуха осуществляется с помощью процессора управления, подключенного к датчику ионизации пламени.

2) Устройство подготовки газообразного топлива и воздуха перед подачей в топливно-сжигающее устройство выполнено в виде блочно-модульной установки.

3) Параметры коронных разрядов, создаваемых в электромагнитных ионизаторах газообразного топлива и воздуха, регулируется изменением напряжения на клеммах электродов разрядников для получения максимального тока ионизации, следовательно, и температуры на горелках топливно-сжигающего устройства.

4) На трубопроводе подачи газообразного топлива после ионизатора газообразного топлива и на трубопроводе подачи воздуха после ионизатора воздуха по ходу подачи, соответственно, топлива и воздуха установлены регуляторы расхода, соответственно, топлива и воздуха, подключённые к процессору.

5) Подачу ионизированного топлива и воздуха в топливо-сжигающее устройство осуществляют посредством регуляторов расхода подачи газообразного топлива и воздуха, соответственно для изменения режима работы топливно-сжигающего устройства с помощью процессора.

6) Сжигание ионизированного топливовоздушной смеси в топливо-сжигающем устройстве осуществляют посредством горелки турбулентного типа.

При этом мгновенно во всем объеме в любой точке горелочного устройства начинают действовать кулоновские силы отталкивания, интенсивно перемешивая горючую смесь. За счет повышения температуры и одновременного горения факела значительно усиливается его светимость. Нагрев рабочей поверхности уже происходит за счет излучения не только в инфракрасном, но и в видимом и ультрафиолетовом спектре [1].

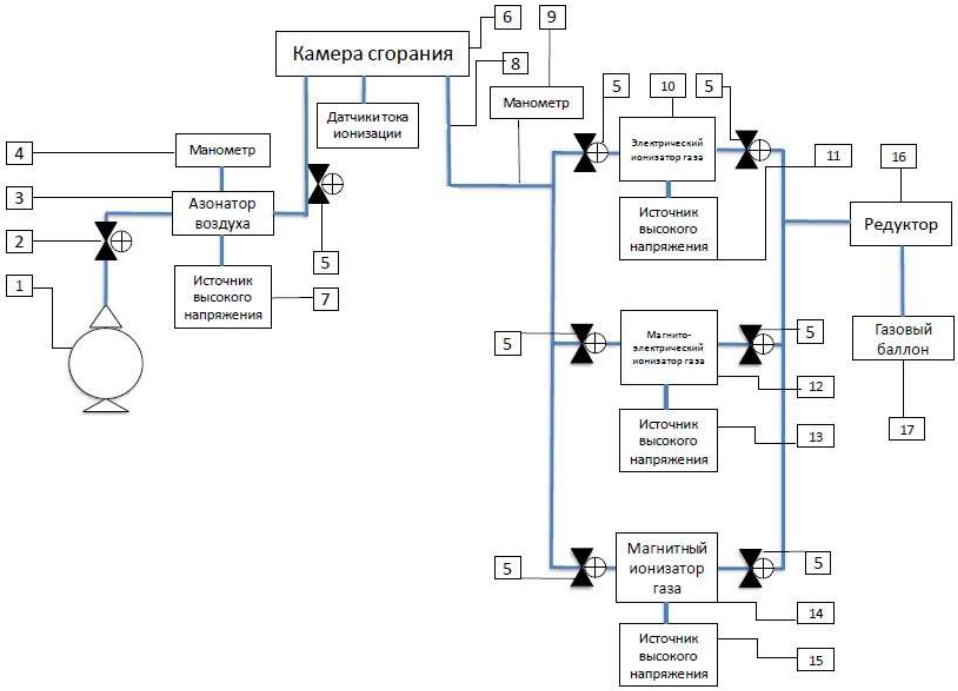


Рисунок 1 – Функциональная схема подготовки газообразного топлива и воздуха перед подачей в устройство сжигания по уточненной гипотезе, реализованная в стенде.

Воздушный вентилятор воздуха (1), подключённый через запорный вентиль (2) к электрическому озонатору воздуха (3), который в свою очередь соединён с манометром (4) и камерой сгорания (6) через вентиль (4); - ионизатор воздуха (3) посредством высоковольтного

кабеля подключён к источнику высокого напряжения (7); - баллон для газообразного топлива (17), подключённый через редуктор (16) и запорный вентиль (5) к регулятору расхода газа (8);

- к регулятору расхода газа (8) через запорные вентили (5) подключены, параллельно соединённые, электрический ионизатор газа (10), магнитоэлектрический ионизатор газа (12) и магнитный ионизатор газа (14) через запорные вентили (5) соединены с регулятором расхода газа (8); -регулятор расхода газа (8) подключен к камере сгорания (6); - электрический ионизатор газа (10), магнитоэлектрический ионизатор газа (12) и магнитный ионизатор газа (14) соединены высоковольтными проводами с источниками высоковольтного питания (11), (13) и (14) соответственно; - на регуляторе расхода газа (8) установлен манометр давления газа (9). [2].

В результате достигается изменение физико-химического свойств топливовоздушной смеси, что позволяет повысить эффективность топливоподготовки газообразного топлива и добиться экономии топлива при одновременном сокращении вредных выбросов продуктов горения газообразного топлива (продуктов неполного сгорания (CO)) из различного рода энергетических устройств в окружающее их пространство. Происходит интенсификация и повышается энергоресурсоэффективность процесса горения. Повышается температура пламени и отходящих газов, количество угарного газа снижается (рисунок 2, рисунок 3).

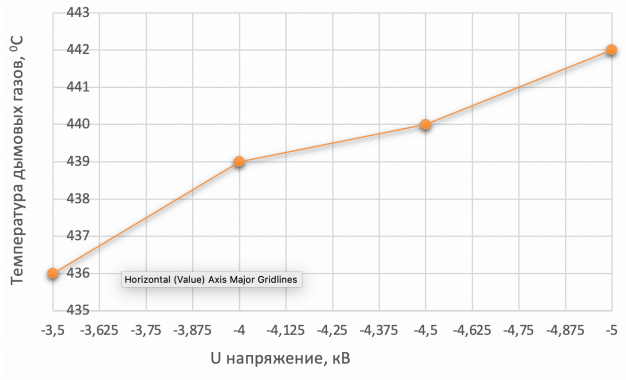


Рисунок 2 – Изменение температуры продуктов горения при наложении электрического поля на пламя.

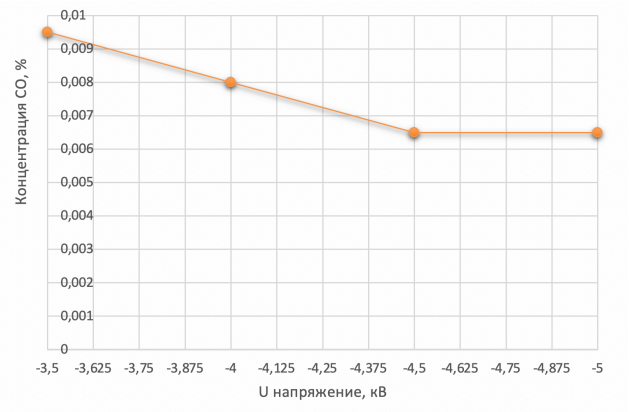


Рисунок 3 – Изменение выбросов CO от напряжения на электродах.

Эффективный результат достигается за счёт того, что способ подготовки газообразного топлива и воздуха перед подачей в топливно-сжигающее устройство осуществляют активацию газообразного топлива и воздуха в электромагнитных ионизаторах газообразного топлива и воздуха, установленных на трубопроводах подачи газообразного топлива и трубопроводе подачи воздуха в топливно-сжигающее устройство, причем активацию газообразного топлива и воздуха, соответственно в электромагнитных ионизаторах газообразного топлива и воздуха, путём воздействия на топливо и воздух одновременно коронным электрическим разрядом и магнитным полем.

Данное исследование выполнялось в рамках гранта РФФИ № 18-29-24220.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карманова О.В., Кудрина Г.В., Осошник И.А., Енютина М.В., Тихомиров С.Г., Корыстин С.И. Соли металлов жирных кислот и способ их получения // Патент на изобретение RU 2415886. Опубл.10.04.2011. Бюл. № 10.

2. Михайлин С.В.,Мешалкин В.П., Глушко А.Н., Гусев Б.В., Матасов А.В.,Челноков В.В. Способ подготовки газообразного топлива и воздуха перед подачей в топливосжигающее устройство // Патент на полезную модель № R U 2731462. Опубл. 03.09.2020. Бюл. № 25.

УДК 534:621.317.7 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-338-342

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЧЕРЕЗ ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ
ULTRASONIC DEVICES FOR INTENSIFICATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES THROUGH GAS MEDIA

Хмелёв Владимир Николаевич, Цыганок Сергей Николаевич,
Барсуков Роман Владиславович, Шалунов Андрей Викторович,
Нестеров Виктор Александрович
Vladimir N. Khmelev, Sergey N. Tsyganok, Roman N. Barsukov,
Andrey V. Shalunov, Viktor A. Nesterov

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Россия, Бийск
Biysk Technological Institute (branch) of Altai State Technical University I.I. Polzunova, Russia
(e-mail: vnh@bti.secna.ru)

Аннотация: The article presents ultrasonic devices created by a team of developers, designed to increase the efficiency of various technological processes (defoaming, coagulation, drying, etc.) in a non-contact mode of ultrasonic exposure through non-resonant gas gaps. It is shown that the use of bending-vibrating titanium disks provides the creation of ultrasonic fields specified in frequency and strength of ultrasonic action, necessary and sufficient for the implementation of optimal modes and conditions of ultrasonic action.

Abstract: The article presents ultrasonic devices created by a team of developers, designed to increase the efficiency of various technological processes – defoaming, coagulation, acoustic drying, etc. It is shown that the determination of the optimal modes and conditions of ultrasonic exposure allows the selection of devices according to the shape of the created acoustic field, according to the intensity of sound pressure, according to the frequency of exposure.

Ключевые слова: акустические колебания, ультразвуковые аппараты, коагуляция, акустическая сушка, пеногашение, интенсивность звукового давления, дисковый излучатель.

Keywords: acoustic oscillations, ultrasonic devices, coagulation, acoustic drying, defoaming, sound pressure intensity, disk radiator.

В современных производствах часто возникают ситуации, требующие обеспечения дополнительных энергетических воздействий ультразвуковыми колебаниями на различные среды и объекты без обеспечения физического контакта, т.е. через газовые промежутки различного размера (нерезонансые) [1, 2]. К области технологических процессов, где УЗ воздействие должно осуществляться через газовые среды, относятся такие процессы, как бесконтактная низкотемпературная сушка, коагуляция субмикронных частиц, пеногашение и т.д. [3-5].

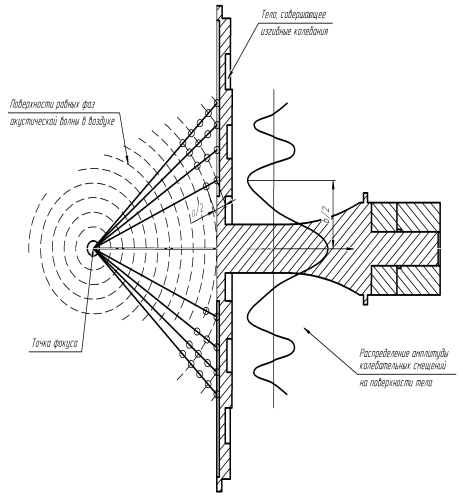
Каждый из выше приведенных технологических процессов характеризуется особенностью их протекания в УЗ полях. Однако, для обеспечения эффективного воздействия на процессы бесконтактной сушки, коагуляции субмикронных частик и пеногашения, создаваемые в газовых средах УЗ колебания должны превышать определенные значения и характеризоваться силой звука более 140-150 дБ.

Поэтому возникает необходимость в создании УЗ аппаратов, способных обеспечивать повышение эффективности технологических процессов через газовые промежутки и обеспечении с их помощью необходимых воздействий с учетом характерных особенностей процессов.

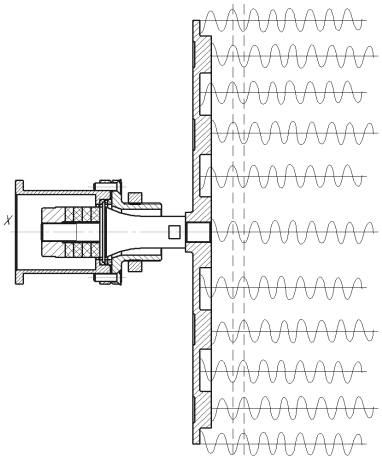
1 Источники ультразвукового воздействия в газовых средах

При реализации технологических процессов, таких как коагуляция, ультразвуковая сушка, пеногашение, требуется создать знакопеременные ультразвуковые колебания в

технологической среде. Для этих целей используются продольно колеблющиеся пьезоэлектрические колебательные системы с излучателями в виде изгибно-колеблющихся на частотах, кратных основной, ступенчато-переменных по форме дисков, изготовленных из титановых сплавов (рисунок 1) [6, 7].



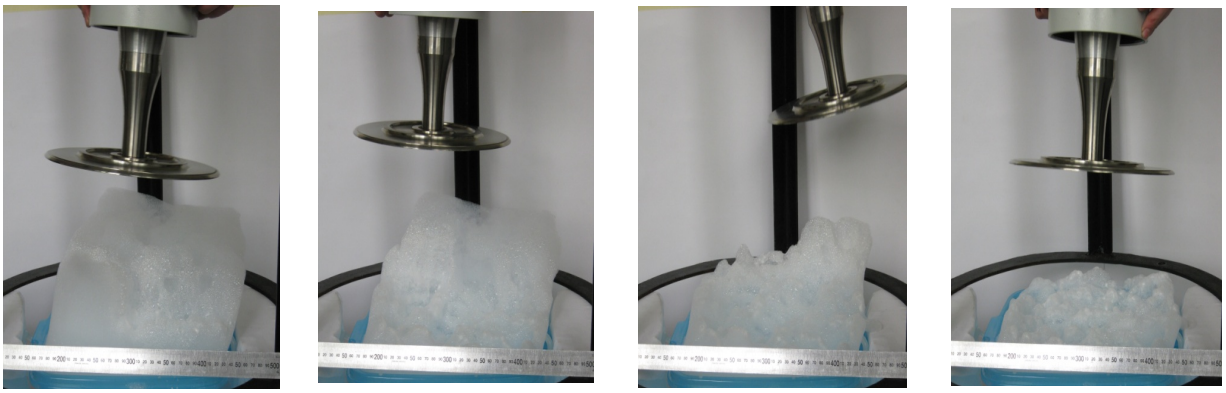
1) фазированный фокусирующий излучатель



2) нефокусный излучатель с фазовыравнивающими элементами

Рисунок 1 – Излучение ультразвука в газовые среды.

Фокусировка ультразвуковых колебаний позволяет достичь силы ультразвукового давления до 200 дБ. Такие высокие значения силы ультразвукового давления требуются для реализации процесса пеногашения. На рисунке 2 показаны результаты интенсификации подобного процесса. Эксперимент проводился при следующих параметрах дискового излучателя: уровень звукового давления – 140 дБ; частота генерируемых звуковых колебаний – 20,5 кГц, время ультразвукового воздействия 60 сек.

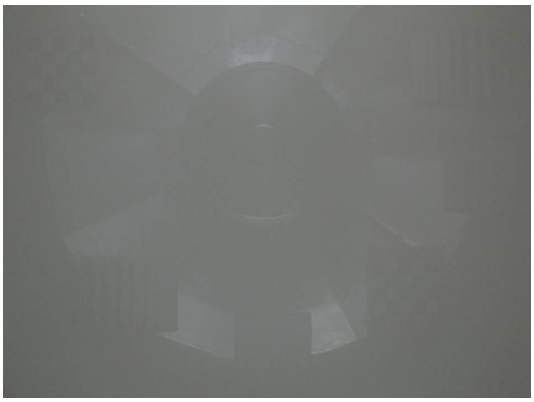


1 секунда 10 секунд 40 секунд 60 секунд

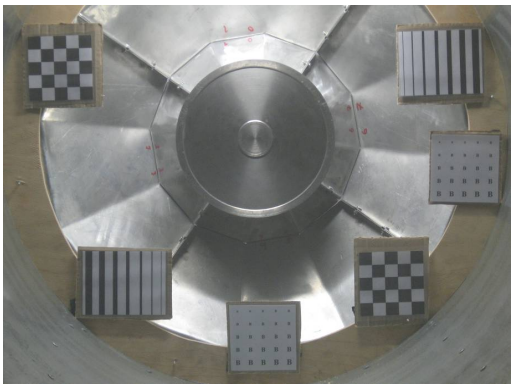
Рисунок 2 – Динамика процесса разрушения пены.

Использование нефокусированных УЗ колебаний необходимо в тех технологических процессах, в которых требуется создать равномерное акустическое поле. Это, например, коагуляция и ультразвуковая сушка. Для реализации процессов сушки и коагуляции используются УЗ излучатели с преимущественным излучением одной фазы колебаний. Для реализации такого излучения высота выступов на диске составляет половину длины волны в воздухе, и поэтому излучение с выступа и диска приходят в одной фазе.

На рисунке 3 приведены результаты интенсификации процесса коагуляции капель тумана. Эксперимент проводился при следующих параметрах дискового излучателя: уровень звукового давления – 125-130 дБ; частота генерируемых звуковых колебаний – 22,3 кГц, время ультразвукового воздействия 120 сек.



1) до



2) после

Рисунок 3 – Коагуляция туманов.

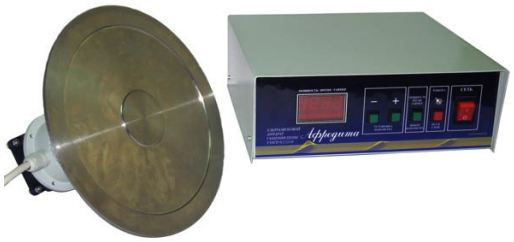
Наблюдалось ускорение процесса коагуляции капель тумана не менее чем в 6-10 раз по сравнению с естественным осаждением.

2 Аппаратные решения ультразвукового воздействия через газовые промежутки

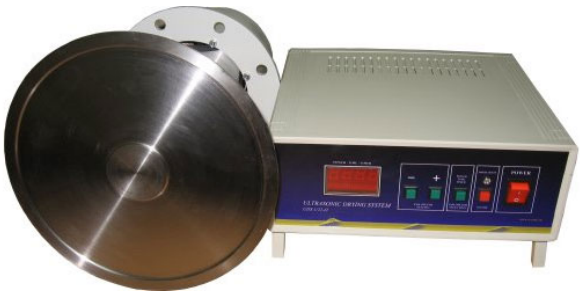
Необходимость реализации различных процессов при помощи различных УЗ полей (однородное и неравномерное), обеспечения необходимой и достаточной для реализации конкретных процессов силы УЗ давления (от 120 дБ до 160 дБ), заданной частоты УЗ колебаний (от 18 кГц до 22 кГц) привели к созданию ряда УЗ аппаратов серии «Соловей». Часть таких УЗ аппаратов для воздействия при нормальных условиях приведена на рисунке 4.



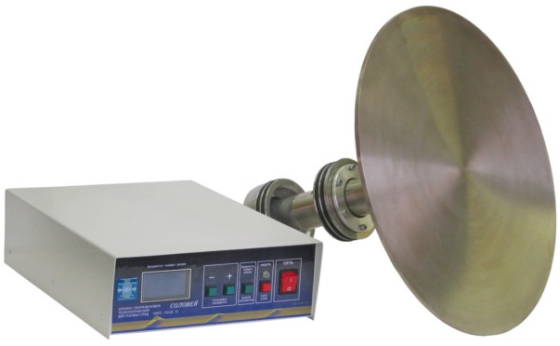
1) УЗАГС-0,1/22-О: 120 дБ, 22 кГц, диаметр излучателя – 105 мм



2) УЗАГС-0,2/22-О: 140 дБ, 22 кГц, диаметр излучателя – 210 мм



3) УЗАГС-0,5/22-О: 150 дБ, 22 кГц, диаметр излучателя – 320 мм



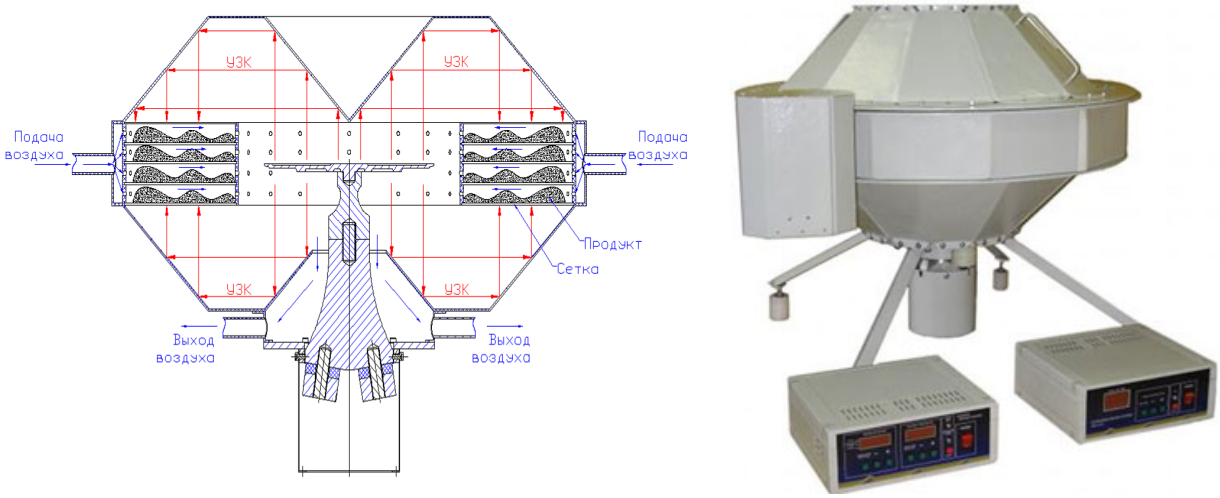
4) УЗАГС-0,6/18-О: 155 дБ, 18 кГц, диаметр излучателя – 360 мм

Рисунок 4 – УЗ аппараты для воздействия через газовые промежутки.

3 Учет влияния внешних воздействий

При реализации технологических процессов возникает необходимость максимально эффективного использования энергии создаваемых ультразвуковых колебаний при помощи специальных технологических объемов (камер).

Один из примеров реализации процесса сушки при помощи специально разработанного технологического объема, позволяющего размещать высушиваемый материал в области наивысшей концентрации ультразвуковой энергии представлен на рисунке 5. Такое конструктивное решение позволило не только увеличить скорость протекания процесса акустической сушки, но и снизить нижнюю границу диапазона силы звукового давления – до 125-130 дБ.



1) эскизная схема 2) УЗС-1,2/27-О

Рисунок 5 – УЗ аппарат для реализации акустической сушки.

При реализации процессов в отличных от нормальных по температуре и другим условиям возникает необходимость в создании и применении специальных аппаратов.

Температура технологического процесса ограничена верхним значением 250-300 °С, так как при таких значениях материал диска – титановый сплав – теряет свои упругие свойства. Кроме того, для исключения перегрева пьезокерамического преобразователя применяют системы тепловой отсечки в виде проточных объемов между пьезоэлектрическим преобразователем и бустерным звеном ультразвуковой колебательной системы (рисунок 6).



1 УЗАГС-0,2/22-ОРв: 135 дБ, 22 кГц, диаметр излучателя – 205 мм, +80±10 °С

2) УЗАГС-0,3/22-ОРв: 140 дБ, 22 кГц, диаметр излучателя – 205 мм, +175±25 °С

Рисунок 6 – УЗ аппараты для воздействия при повышенных температурах

Выводы

Представленные в работе УЗ аппараты обеспечивают эффективное бесконтактное УЗ воздействие на различные технологические процессы, такие как коагуляция, сушка, пеногашение и т.п.

Для повышения эффективности ультразвукового воздействия при помощи созданных аппаратов в различных условиях используются специальные технологические объемы и устройства тепловой защиты пьезопреобразователей.

Разнообразие созданных аппаратов обеспечивает оптимальный выбор при решении различных технологических задач современных производств.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00121).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелев, В.Н. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. технич. ун-та, 2015. – 688 с.
2. Хмелев, В.Н. Ультразвук. Распыление жидкостей [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов А.В. Шалунова. – Бийск: Изд-во Региональное отделение Алтайского края Общероссийской общественной организации писателей «Общероссийское литературное сообщество», 2017. – 271 с.
3. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. технич. ун-та, 2010. – 228 с.
4. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая коагуляция в скрубберах Вентури: особенности реализации и эффективность применения [Текст] / Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н., Нестеров В.А.// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 128-139.
5. Хмелёв, В.Н. Моделирование процессов коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия [Текст] / Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н., Шалунова К.В. //Вести высших учебных заведений Черноземья, 2010. – № 2 (20). – С. 48-52.
6. Khmelev, V.N. Development of two-step centrifugal acoustic gas-purifying equipment [Текст] / Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Kozhevnikov I.S. // В сборнике: 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM -2016). Conference Proceedings, 2016. – С. 264-268.
7. Хмелев, В.Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах [Текст] / Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Шалунов А.В., Лебедев А.Н., Хмелев С.С., Галахов А.Н. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. – № 1. –С. 148-157.

УДК 661.935, 519.633.2 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-343-347

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ УСТАНОВОК АДСОРБЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ
THE OPTIMAL DESIGN OF CYCLIC ADSORPTION UNITS FOR SEPARATION OF GAS MIXTURES

Голубятников Олег Олегович, Акулинин Евгений Игоревич, Дворецкий Дмитрий Станиславович, Дворецкий Станислав Иванович
Oleg O. Golubyatnikov, Evgeny I. Akulinin, Dmitry St. Dvoretsky, Stanislav I. Dvoretsky

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(e-mail: golubyatnikov_ol@mail.ru, akulinin-2006@yandex.ru, dvoretsky@tambov.ru, sdvoretsky@mail.tstu.ru)

Аннотация: Предложен подход к оптимальному проектированию циклических установок адсорбционного разделения газовых смесей в условиях неопределенности исходной информации. В результате решения задач оптимизации получены оптимальные режимные и конструктивные параметры установок КБА производительностью от 100 до 2000 нл/мин, обеспечивающие чистоту водорода на выходе установки не менее 99.99 об.% в условиях интервальной неопределенности части исходных данных.

Ключевые слова: газовая смесь, водород, процесс адсорбционного разделения, оптимизация, неопределенности.

Abstract: An approach to the optimal design of pressure swing adsorption (PSA) units for the hydrogen recovery from synthesis gas under uncertainty. As a result of solving optimization problems, the optimal operating and design parameters of PSA units with a capacity of 100 to 2000 l/min at NTP are obtained, ensuring the purity of hydrogen at the output of the unit at least 99.99 vol.% under conditions of interval uncertainty of a part of the initial data.

Keywords: gas mixture, hydrogen, cyclic adsorption process, optimization, uncertainty.

Целью оптимального проектирования циклической установки разделения газовых смесей является определение оптимальной с точки зрения какого либо критерия "конструкции" (технологической схемы и аппаратурно-технологического оформления) – процесса короткоцикловой безнагревной адсорбции, аппаратов и установки в целом. Обычно выбирается экономический критерий – прибыль, себестоимость, приведенные затраты и т.п. [1, 2] Оптимальная "конструкция" установки должна гарантировать выполнение некоторых проектных требований (ограничений), связанных с обеспечением заданной производительности, чистоты извлекаемого (концентрируемого) газа, условий безопасности, экологических ограничений, требуемых технико-экономических показателей функционирования установки. Эта задача, как правило, решается в условиях неточности исходной физико-химической, технологической и экономической информации, а проектирование циклических установок адсорбционного разделения газовых смесей выполняется с использованием неточных математических моделей и, кроме того, во время функционирования установки часто изменяются внутренние характеристики установки, а также условия внешней среды. В результате приходится решать задачу создания такой "конструкции" циклической установки адсорбционного разделения газовых смесей, которая гарантирует: 1) оптимальное значение экономического критерия, оценивающего работу установки за определенный период функционирования; 2) сохранение работоспособности установки (выполнение всех регламентных требований) в ходе ее функционирования, несмотря на использование неточных математических моделей и изменение внутренних и внешних факторов в определенных пределах.

Источниками неопределенности в задаче проектирования установки адсорбционного разделения синтез-газа являются: случайные изменения состава и температуры исходной газовой смеси (например, синтез-газа), погрешности экспериментального определения коэффициентов диффузии и массоотдачи при адсорбционном разделении газовой смеси, колебания характеристик адсорбента от партии к партии и в ходе эксплуатации установки.

Для решения задачи оптимального проектирования химико-технологических систем в условиях частичной неопределенности исходных данных разработаны новые подходы и эффективные алгоритмы [3–6], идея которых заключается в определении таких значений конструктивных d параметров и режимных u переменных циклической установки адсорбционного разделения газовых смесей, при которых достигается наибольшее/наименьшее значение экономического критерия эффективности $\varphi(d, u, t_{\text{css}},\ \xi)$ и выполняются требования технологического регламента к функционированию установки КБА (по чистоте извлекаемого (концентрируемого) газа, производительности установки и скорости потока газовой смеси) независимо от значений $\xi \in \Xi$, которые могут принимать неопределенные параметры из заданных интервалов их возможного изменения Ξ.

Как утверждается в работе [1], использование методов оптимизации позволяет, например, снизить себестоимость извлечения водорода из синтез-газа до 1.5–3 $/кг за счет определения наилучшего сочетания конструктивных и режимных параметров проектируемых циклических установок адсорбционного разделения газовых смесей.

В данной статье демонстрируется реализация алгоритма на примере оптимального проектирования четырехадсорберной установки КБА вакуум-напорного типа с четырьмя стадиями в цикле, равными по времени: адсорбция, десорбция, две стадии выравнивания давлений [3]. В качестве адсорбента использовали гранулированный цеолитовый адсорбент 13X с диаметром частиц 1.5 мм [7].

Критерий задачи оптимального проектирования

В качестве критерия оптимизации использовалась прибыль φ, млн.$, которая может быть получена от производства водорода в течение жизненного цикла LT установки КБА. Прибыль φ рассчитывалась согласно формуле, предложенной в работе [8]:

$$\varphi(d, u, \xi,\ t_{\text{css}}) = P_{\text{val}} LT - OC \cdot LT - I, \qquad (1)$$

где $d -$ конструктивные параметры, $d = \{D, L, K_{\text{v}}\}$; D, L – диаметр и высота слоя адсорбента, м; K_{v} – пропускная способность клапанов (л/мин); $u -$ режимные переменные, $u = \{t_{\text{ads}}, P_{\text{ads}}, P_{\text{des}}, \text{P/F}\}$; t_{ads} – длительность стадии адсорбции, с; P_{ads}, P_{des} – давления на стадиях адсорбции и десорбции, атм; P/F – коэффициент, показывающий соотношение потока, отбираемого на регенерацию адсорбента, и входного потока; $\xi -$ неопределенные параметры, $\xi = \{y_{\text{H}_2}^{\text{in}}, y_{\text{CO}_2}^{\text{in}}, y_{\text{CO}}^{\text{in}}, T_{\text{g}}^{\text{in}}\}$; $y_{\text{H}_2}^{\text{in}}, y_{\text{CO}_2}^{\text{in}}, y_{\text{CO}}^{\text{in}}$ – входные концентрации компонентов синтез-газа, об. %; T_{g}^{in} – температура синтез-газа на входе в адсорбер, К; $t_{\text{css}} -$ время достижения режима циклического периодического процесса (англ. – cyclic steady state, CSS); P_{val} – стоимость продукта ($/год); OC – производственные затраты ($/год), включающие теоретический объем работы компрессора и вакуум-насоса; I – капитальные затраты ($), включающие стоимость адсорбента, отсечных клапанов, электроэнергии, адсорберов, ресивера, компрессора, вакуум-насоса, дросселя, системы управления, обратных клапанов и прочего оборудования (фитинги, трубки); LT – жизненный цикл установки КБА, LT=10 лет.

Постановка задачи оптимального проектирования

Для заданных интервалов $\left[\xi^{-}, \xi^{+}\right]$ изменения неопределенных параметров $\xi = \{y_{\text{H}_2}^{\text{in}}, y_{\text{CO}_2}^{\text{in}}, y_{\text{CO}}^{\text{in}}, T_{\text{g}}^{\text{in}}\}$ требуется определить режимные переменные $u = \{t_{\text{ads}}, P_{\text{ads}}, P_{\text{des}}, \text{P/F}\}$ и конструктивные параметры $d = \{D, L, K_{\text{v}}\}$ такие, что среднее значение $\sum_{j \in J_1} \omega_j\, \varphi\left(d, u, \xi^{j}, t_{\text{css}}\right)$ прибыли $\varphi(d, u, \xi,\ t_{\text{css}})$ от эксплуатации установки КБА в режиме циклического периодического процесса при $t = t_{\text{css}}$ (англ. – cyclic steady state, CSS) достигает максимального значения:

$$I(u,d)=\max_{u,d}\sum_{j\in J_1}\omega_j\,\varphi\left(d,u,\xi^j,t_{\text{css}}\right), \tag{2}$$

где ω_j – весовые коэффициенты, удовлетворяющие условиям $\omega_j\geq 0$, $\sum_{j\in J_1}\omega_j=1$; при связях в форме уравнений математической модели динамики процесса адсорбционного разделения газовой смеси [7] и ограничениях на:

чистоту водорода в потоке газовой смеси на выходе установки

$$y_{\text{H}_2}^{\text{out}}\left(d,u,\xi^j,t_{\text{css}}\right)\geq 99.99\text{ об.\%},\ \xi^j\in S_1,\ \ j\in J_1, \tag{3}$$

$$y_{\text{H}_2}^{\text{out}}\left(d,u,\xi^l,t_{\text{css}}\right)\geq 99.99\text{ об.\%},\ \xi^l\in S_2,\ \ l\in J_2, \tag{4}$$

где S_1- множество аппроксимационных точек $\xi^j\in S_1,\ \ j\in J_1,$ равномерно покрывающих область неопределенности $\Xi=\left\{\xi_\rho:\xi_\rho^-\leq\xi_\rho\leq\xi_\rho^+\right\},\rho=\overline{1,4}$; S_2- множество критических точек $S_2=\left\{\xi^l:\xi^l\in\Xi,\ \ l\in J_2\right\}$, в которых ограничения задачи могут нарушаться [5];

производительность установки

$$G^{\text{out}}\left(d,u,\xi^j,t_{\text{css}}\right)\geq 100,300,500,1000,1500,2000\text{ нл/мин},\qquad \xi^j\in S_1,\ \ j\in J_1 \tag{5}$$

$$G^{\text{out}}\left(d,u,\xi^l,t_{\text{css}}\right)\geq 100,300,500,1000,1500,2000\,\frac{\text{нл}}{\text{мин}},\qquad \xi^l\in S_2,\qquad l\in J_2, \tag{6}$$

скорость газовой смеси v_g в "лобовом" слое адсорбента:

$$\text{v}_\text{g}\left(d,u,\xi^j,t_{\text{css}}\right)\leq 0.2\text{ м/с},\qquad \xi^j\in S_1,\ \ j\in J_1, \tag{7}$$

$$\text{v}_\text{g}\left(d,u,\xi^l,t_{\text{css}}\right)\leq 0.2\text{ м/с}\qquad\quad \xi^l\in S_2,\qquad l\in J_2, \tag{8}$$

соотношение длины слоя адсорбента к внутреннему диаметру адсорбера;

$$6\leq\frac{L}{D}\leq 14; \tag{9}$$

интервалы $[u^-,u^+]$ изменения режимных переменных $u=(t_{\text{ads}},P_{\text{ads}},P_{\text{des}},\text{P/F})^T$:

$$10\leq t_{\text{ads}}\leq 500\text{ с},\ 5\leq P_{\text{ads}}\leq 30\text{ атм},\ 0.5\leq P_{\text{des}}\leq 0.99\text{ атм},\ 0\leq\text{P/F}\leq 0.5 \tag{10}$$

интервалы $[d^-,d^+]$ изменения конструктивных параметров $d=(L,D,K_\text{v})$:

$$0.2\leq L\leq 2.0\text{ м},\ 0.02\leq D\leq 0.33\text{ м},\ 10\leq K_\text{v}\leq 60\text{ л/мин}; \tag{11}$$

интервалы $\left[\xi^-,\xi^+\right]$ изменения неопределенных параметров $\xi=\{y_{\text{H}_2}^{\text{in}},y_{\text{CO}_2}^{\text{in}},y_{\text{CO}}^{\text{in}},T_\text{g}^{\text{in}}\}$:

$$\begin{gathered}48\leq y_{\text{H}_2}^{\text{in}}\leq 68\text{ об. \%},\ 27\leq y_{\text{CO}_2}^{\text{in}}\leq 47\text{ об. \%},\ y_{\text{CO}}^{\text{in}}=5\text{ об. \%},\\ \sum\left(y_{\text{H}_2}^{\text{in}}+y_{\text{CO}_2}^{\text{in}}+y_{\text{CO}}^{\text{in}}\right)=100\text{ об.\%},\ 298\leq T_\text{g}^{\text{in}}\leq 323\text{ K}.\end{gathered} \tag{12}$$

Поскольку неизвестно с какой вероятностью неопределенные параметры ξ могут принимать те или иные значения из заданных интервалов $\xi^-\leq\xi\leq\xi^+$, принято допущение о равновероятном законе их распределения. Значения ограничений (3)–(8) и целевой функции (2) вычисляются путем решения уравнений математической модели динамики процесса адсорбционного разделения газовой смеси в момент времени $t=t_{\text{css}}$ [7].

Численными экспериментами доказано, что скачкообразное открытие впускных и выпускных клапанов не обеспечивает выполнение ограничений (7), (8) задачи (2)–(12) по скорости газового потока в "лобовом" слое адсорбента, что может приводить к истиранию и пылению гранулированного адсорбента в циклических адсорбционно-десорбционных процессах и требует определения законов изменения степени открытия клапанов во времени, при реализации которых исключаются гидравлические удары и разрушение адсорбента.

Сформулированная задача оптимизации (2)–(12) относится к классу задач нелинейного программирования, решение которой осуществлялось методом последовательного

квадратичного программирования в программной среде MatLab с использованием разработанного эвристического итерационного алгоритма [9].

Исследование задачи оптимального проектирования (2)–(12)

На рис. 1 представлены графики зависимости оптимальных значений степени извлечения водорода η, прибыли φ и длительности стадии адсорбции t_{ads} , полученные в результате решения сформулированной задачи (2)–(12) оптимального проектирования циклической установки адсорбционного разделения синтез-газа для 6 различных значений производительности установки (рис. 1а) и задачи оптимального проектирования без учета неопределенности при следующих фиксированных значениях вектора ξ : $y_{\text{H}_2}^{\text{in}} = 68$ об. %, $y_{\text{CO}_2}^{\text{in}} = 27$ об. %, $y_{\text{CO}}^{\text{in}} = 5$ об. %, $T_{\text{g}}^{\text{in}} = 298$ K (рис. 1б).

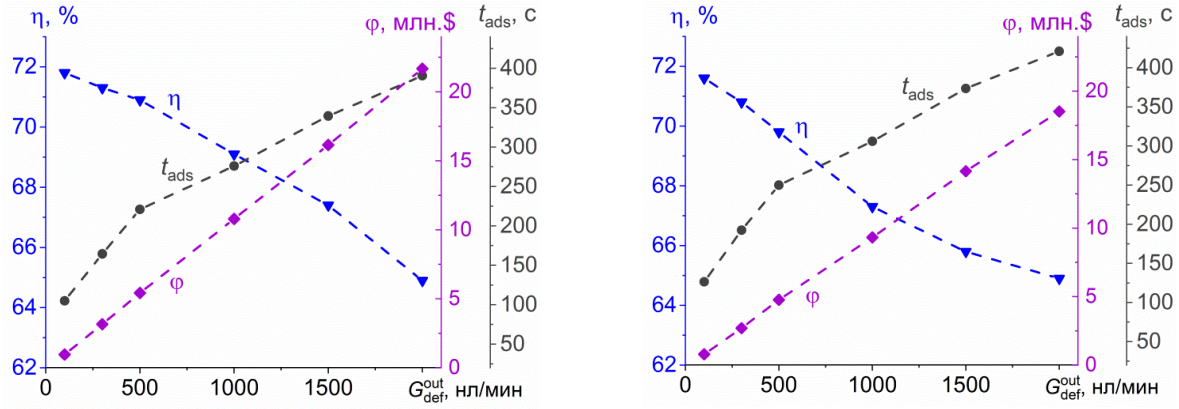


Рисунок 1 – Результаты решения задач оптимального проектирования: а) решение задач без учета неопределенности; б) решение задач с учетом неопределенности.

Из анализа графиков следует, что при увеличении производительности установки G^{out} прибыль от эксплуатации установки линейно возрастает, а степень извлечения водорода η уменьшается, что вполне согласуется с результатами работ [2, 3]. При этом возрастают длительность стадии адсорбции t_{ads}, коэффициент P/F и давление P_{ads} на стадии адсорбции, а давление P_{des} на стадии десорбции, напротив, уменьшается (на графиках не показано).

Установлено, что возможные изменения неопределенных параметров ξ в заданных пределах при проектировании приводят к уменьшению величины прибыли $\varphi(\cdot)$ в среднем на 10–15% (рис. 1), что объясняется необходимостью повышения давления P_{ads} на 5–7%, коэффициента отбора P/F на 10–20% и габаритов установки на 20–25% для выполнения ограничений (3), (4) по чистоте концентрируемого водорода $y_{\text{H}_2}^{\text{out}} = 99.99$ об. %.

Выводы

Сформулирована и решена задача оптимального проектирования циклической установки адсорбционного разделения синтез-газа и извлечения (концентрирования) водорода в условиях частичной неопределенности вектора $\xi = \left\{y_{\text{H}_2}^{\text{in}}, y_{\text{CO}_2}^{\text{in}}, y_{\text{CO}}^{\text{in}}, T_{\text{g}}^{\text{in}}\right\}$ с учетом требований по чистоте водорода $y_{\text{H}_2}^{\text{out}}(\cdot) \geq 99.99$ об. %, производительности и ресурсосбережению установки. Определены конструктивные параметры и режимные переменные установки КБА, обеспечивающие достижение максимальной прибыли от производства водорода независимо от изменения неопределенных переменных в заданных интервалах.

Разработано математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение для проектирования экономичных "конструкций" циклических установок адсорбционного разделения газовых смесей.

Благодарности. *Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках гранта Президента РФ МК-1604.2020.8.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li H., Liao Z., Sun J., Jiang B., Wang J., Yang Y. Modelling and simulation of two-bed PSA process for separating H2 from methane steam reforming. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2019. V. 27(8). P. 1870–1878.

2. Li C., Xiao J., Pierre B., Richard C. Optimization of Hydrogen Purification Performance of Layered Bed Pressure Swing Adsorption. Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban)/Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering). 2020. V. 44(4). P. 753-759.

3. Khajuria H., Pistikopoulos E.N. Optimization and Control of Pressure Swing Adsorption Processes Under Uncertainty. AIChE Journal. 2013. V. 59(1). P. 120–131.

4. Grossmann I.E., Apap R.M., Calfa B.A., Garcia-Herreros P., Zhang Q. Mathematical Programming Techniques for Optimization under Uncertainty and Their Application in Process Systems Engineering. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. V. 51(6). P. 893-909.

5. Ostrovsky G.M., Lapteva T.V., Ziyatdinov N.N. Optimal design of chemical processes under uncertainty. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2014. V. 48(5). P. 583-593.

6. Urich M.D., Vemula R.R., Kothare M.V. Multivariable model predictive control of a novel rapid pressure swing adsorption system. AIChE Journal. 2018. V. 64(4). P. 1234-1245.

7. Akulinin E., Golubyatnikov O., Dvoretsky D., Dvoretsky S. Optimization and analysis of pressure swing adsorption process for oxygen production from air under uncertainty. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly 2020. V. 26(1). P. 89–104.

8. Santos J.C. Study of New Adsorbents and Operation Cycles for Medical PSA Units. Departamento de Engenharia Química Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005. 215 p.

9. Akulinin E.I., Golubyatnikov O.O., Dvoretsky D.S., Dvoretsky S.I. The optimal design of pressure swing adsorption process of air oxygen enrichment under uncertainty. Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. 2020. V. 13(2). P. 5–16.

УДК 66.08 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-348-351

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО КРЕКИНГА ТЯЖЕЛОГО НЕФТЯНОГО СЫРЬЯ
APPLICATION OF INDUCTION HEATING FOR HEAVY PETROLEUM CRACKING

**Алимов Никита Борисович, Скубиева Александра Васильевна,
Кулешов Иван Александрович, Уханев Степан Александрович,
Рудякова Елена Владимировна, Чайка Анна Анатольевна
Nikita B. Alimov, Aleksandra V. Skubieva, Ivan A. Kuleshov, Stepan A. Uhanev,
Elena V. Rudyakova, Anna A. Chayka**

*Иркутский национальный исследовательский университет, Россия, Иркутск
Irkutsk national research technical university, Russia, Irkutsk
(e-mail: nikita.alimov.2001@mail.ru, aleksandraskubieva@gmail.com, vanekrus0@gmail.com, stepa_ukhanev1998@bk.ru, rudlenka@list.ru, b-106@mail.ru)*

Аннотация: рассмотрен принципиально новый подход к проведению процесса термического крекинга тяжелого углеводородного сырья с использованием индукционного нагрева, приведены результаты экспериментального исследования термической деструкции мазута в предложенных условиях.

Aabstract: a new way to use induction heating for thermal cracking. The materials of experimental studies of thermal cracking of heavy petroleum feedstock are presented. Found minimal formation of coke deposits on the iron catalyst. Fuel oil has been studied as a raw material.

Ключевые слова: тяжёлое нефтяное сырье, мазут, термический крекинг, индукционный нагрев

Keywords: Key words fuel, induction heating, thermal cracking, heavy petroleum feedstock.

Неослабевающий интерес к переработке тяжелого нефтяного сырья (нефтяные шламы, тяжёлые нефти, мазуты, тяжёлые нефтяные остатки) вызван целым рядом причин.

Во-первых, использование тяжелого нефтяного сырья повышает глубину переработки нефти, а, следовательно, ведет к повышению экономической эффективности нефтепереработки в целом.

Во-вторых, необходимость переработки тяжелого нефтяного сырья обусловлена истощением разведанных запасов лёгких нефтей.

В-третьих, накопленные к настоящему времени огромные количества тяжелых нефтяных остатков оказывают негативное воздействие на окружающую среду.

На сегодняшний день для переработки тяжелого нефтяного сырья используются такие методы как каталитический крекинг, термический крекинг, висбрекинг, замедленное коксование [1, 2], но при этом возникает ряд проблем.

При каталитическом крекинге происходит быстрое закоксовывание катализатора, что ведёт к усложнению конструкции реакторно-регенераторного блока установки, а также вызывает необходимость применения дорогих современных широкопористых пылевидных катализаторов [1].

Замедленное коксование – процесс, направленный на получение кокса, качество и выход которого напрямую зависит от качества сырья, а именно от содержания сернистых соединений и ароматических углеводородов. Поэтому возможность использования различного тяжелого нефтяного сырья в данном процессе ограничена.

Среди различных вариантов термического крекинга чаще всего для переработки тяжелого нефтяного сырья применяют висбрекинг, который позволяет улучшить качество мазутов. Этот процесс протекает в относительно мягких температурных условиях 400-480°С, в следствие чего наблюдается незначительная степень конверсии сырья, приводящая к

снижению вязкости и, как следствие, получению более качественного продукта. Количество бензиновой фракции, образующейся в этом процессе незначительно.

Процесс термического крекинга тяжелого нефтяного сырья, протекающий при температуре более 500°С не нашел широкого распространения по двум причинам: низкое качество получаемых продуктов, а также отложение кокса на стенках труб, вызывающее прогорание труб и вывод из строя трубчатых печей.

Несмотря на перечисленные недостатки термического крекинга, во всем мире растет интерес к более широкому использованию этого процесса для переработки не только тяжелых нефтяных остатков, но и для переработки тяжёлых нефтей.

Известны сообщения о деструктивной переработке углеводородного сырья с применением неорганических расплавов. При разогреве пространства реактора, металл находится в жидком состоянии, распределяя равномерно температуру в зоне нагрева сырья. По мнению авторов, данное направление является перспективным, так как данный процесс характеризуется высокой эффективностью [3, 4, 5]. Недостатком этого процесса является большой расход металла на единицу реакционного объёма, что значительно удорожает стоимость оборудования.

Наши исследования посвящены изучению процесса термического крекинга с использованием индукционного нагрева, принцип действия которого основан на создании переменного магнитного поля в фокусе индуктора. Это поле наводит в металле токи Фуко. Так как ферромагнитные материалы имеют большое электрическое сопротивление, то металл быстро нагревается. Сырье, пропускаемое через металл, находящийся в зоне индукционных токов, разогревается и подвергается термической деструкции. Такой способ нагрева сырья позволит решить проблему закоксовывания и прогара змеевиков трубчатых печей, традиционно применяемых для осуществления термического крекинга в нефтепереработке.

В последние годы все чаще в процессах термической переработки различного органического сырья предлагается использовать индукционный нагрев, например, для превращения отходов пластмассы в пиролизное масло [6], для пиролиза шламов сточных вод пищевой промышленности [7], для газификации и пиролиза биомассы [8], также предложена технология подземной газификации угля на основе электромагнитного индукционного нагрева и нагрева микроволновым излучением [9]. Авторами патента [10] предложена конструкция реактора для осуществления высокотемпературного флэш-пиролиза органического сырья. Однако для промышленного применения более перспективна конструкция реактора с псевдоожиженным слоем металлических проволок, которая сводит к минимуму температурные градиенты, улучшает теплопередачу, а также позволяет поддерживать постоянную температуру слоя на уровне точки Кюри [8].

Экспериментальная часть

В качестве сырья для лабораторных исследований использовали мазут, полученный после разгонки смеси западносибирских нефтей с температурой кипения выше 360 °С.

Термический крекинг мазута проводили в проточном реакторе, представляющем собой расположенную горизонтально кварцевую трубку, диаметром 20 мм, длиной 350 мм, заполненную железными стержнями (30х2 мм). Реактор помещали внутрь спирали индукционной катушки, длина которой составляла 150 мм. Сырье подавали в реактор с помощью перистальтического насоса WT600S со скоростью 6000 мл/мин. При соприкосновении мазута с металлом, разогретым индукционными токами катушки наблюдался интенсивный крекинг углеводородов. Температура реакционной зоны измерялась тепловизором NEC R450 и составила 650°С. Время пребывания сырья в зоне нагрева 1,9 с. Продукты реакции удаляли из реактора, конденсировали в охлаждаемом приёмнике и далее разделяли на фракции. Следует отметить, что кокс, образовывавшийся в процессе термического крекинга, активно уносился с продуктами реакции и закоксовывания греющей насадки не происходило. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты эксперимента.

Показатели	Фракция			
	газ	30-180 °С	180-360 °С	>360 °С и кокс
Выход фракций, % масс	16	24	32	28
Плотность, кг/м^3		738	846	889

Газообразные продукты реакции пропускались через спиртовый раствор йода, при этом наблюдалось обесцвечивание раствора, что указывает на наличие непредельных углеводородов С2-С4 в газе. Определение качественного состава газообразных углеводородов не проводилось. Качественный состав светлых фракций 30-180 и 180-360 °С определяли с помощью хроматомасс-спектрометрии на хроматомасс-спектрометре марки GCMS-QP2010ULTRA, количественный состав смесей определяли с помощью газовой хроматографии на газовом хроматографе марки GC-2014. Было установлено, что углеводородный состав продуктов, полученных в ходе эксперимента аналогичен составу продуктов классического термического крекинга (таблица 2).

Таблица 2 – Углеводородный состав светлых фракций.

Класс углеводородов	Содержание, % об.	
	фракция 30-180 °С	фракция 180-360 °С
Алканы (изо-алканы)	30,8	74,2
алкены (изо-алкены)	44,8	23,6
циклоалканы	2,3	-
арены	22,1	2,2

Поскольку механизм реакций описанного процесса является радикальным, то наличие алканов и алкенов изо-строения в продуктах можно объяснить наличием в мазуте веществ имеющих разветвлённое строение, которые при крекинге дали вещества изо-строения с меньшей молекулярной массой. Циклоалканы фракции с пределами выкипания 30-180 °С традиционно представлены циклопентаном, циклогексаном и их алкилзамещенными гомологами, а арены этой фракции представлены бензолом, толуолом и ксилолами, при чем соотношение бензол : толуол : ксилолы составляет 7:1:1. Арены фракции 180-360°С представлены только алкилзамещенными нафталинами.

Заключение

Проведённый эксперимент показал возможность проведения термического крекинга углеводородного сырья в условиях индукционного нагрева, что позволит решить проблемы прогорания труб печей термического крекинга, вызванные отложением кокса на их поверхности, а также позволит вовлекать в данный процесс сырье с широким углеводородным составом. Полученные результаты указывают на перспективность исследований в данном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Солодова Н.Л., Терентьева Н.А.* Современное состояние и тенденции развития каталитического крекинга нефтяного сырья // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 1. С. 141-147.

2. *Нефедов Б.К.* Современные технологии переработки нефтяных остатков // Катализ в нефтеперерабатывающей промышленности. 2007. № 4. С. 31-37.

3. *Медведев Д.В., Уханев С.А., Филиппов Н.С., Боженков Г.В., Рудякова Е.В.* Термический крекинг мазута на металлическом сплаве // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов». Иркутск: изд-во ИРНИТУ, 2018 г. С. 192-194.

4. *Медведев Д.В., Уханев С.А., Филиппов Н.С., Сотников А.Ю., Боженков Г.В., Рудякова Е.В.* Термический крекинг нефтешлама на металлическом сплаве // Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов». Иркутск: изд-во ИРНИТУ, 2019. С. 155-157.

5. *Гликин М.А., Тарасов В.Ю., Зубцов Е.И., Черноусов Е. Ю.* Исследование процесса деструктивной переработки углеводородов в неорганических расплавах. Влияние управляющих параметров // Технологии органических и неорганических веществ. № 3/4(23), 2015 г. С. 57-63.

6. EP 1726634 A1, опубл. 29.11.2006

7. *Tsai, W.-T., Chang, J.-H., Hsien, K.-J., Chang, Y.-M.* Production of pyrolytic liquids from industrial sewage sludges in an induction-heating reactor // Bioresource Technology, 2009. 100(1), C. 406-412

8. *Rohani, S., Latifi, M., Berruti, F., Briens, C.* Development and testing of a novel induction microreactor to test catalysts for bio-oii gasification // 8th World Congress of Chemical Engineering: Incorporating the 59th Canadian Chemical Engineering Conference and the 24th Interamerican Congress of Chemical Engineering, 2019. c. 515a

9. *Ge, S.* Chemical mining technology for deep coal resources // Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao. Journal of China University of Mining and Technology, 2017.46(4), c. 679-691

10. *Варфоломеев С.Д., Коверзанова Е.В., Ломакин С.М., Луканина Ю.К., Усачев С.В., Хватов А.В., Шилкина Н.Г.* Способ и устройство для осуществления флэш-пиролиза углеродсодержащего сырья с использованием индукционного нагрева. Патент на изобретение RU 2544635 C1, 20.03.2015. Заявка № 2013146241/13 от 17.10.2013

УДК 681.2: 681.722 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-352-356

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА ГАЗООЧИСТКИ ОТ ЧАСТИЦ РАЗМЕРОМ МЕНЕЕ 2,5 МКМ
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A NEW METHOD OF GAS CLEANING FROM PARTICLES LESS THAN 2.5 MICRON IN SIZE

Хмелёв Владимир Николаевич, Шалунов Андрей Викторович, Нестеров Виктор Александрович, Боченков Александр Сергеевич, Тертишников Павел Павлович
Vladimir N. Khmelev*, Andrey V. Shalunov, Viktor A. Nesterov, Alexander S. Bochenkov, Pavel P. Tertishnikov

Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Россия, Бийск
Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Russia, Biysk (info@bti.secna.ru)

Аннотация: Проведены исследования направленные на разработку нового способа и устройства для газоочистки от частиц размером менее 2,5 мкм за счет увеличения времени ультразвукового воздействия на дисперсные частицы и создания зон локального увеличения концентрации тонкодисперсных частиц. Это обеспечивается путем формирования вихревых потоков между дисковым изгибно-колеблющимся излучателем и отражателем. Локальная зона повышенной концентрации частиц формируется в периферийной области вихря, за счет дрейфа частиц под действием центробежных из центральной области вихря к его периферии. Способ повышает эффективность от 13% до 50% в зависимости от концентрации частиц.

Abstract: Research was been carried out to develop a new method and device for gas cleaning from particles less than 2.5 μm in size by increasing the time of ultrasonic exposure to each particle and creating zones of local increase in the concentration of submicron particles. This was ensured by the formation of vortex flows between the disk flexural-oscillating radiator and the reflector. A local zone of increased concentration of particles w formed in the peripheral region of the vortex, due to the drift of particles under the action of centrifugal particles from the central region of the vortex to its periphery. This method increases the efficiency from 13% to 50% depending on the concentration of the particles.

Ключевые слова: ультразвук, излучатель, отражатель, вихревые потоки
Key words: Ultrasound, radiator, reflector, vortex flows

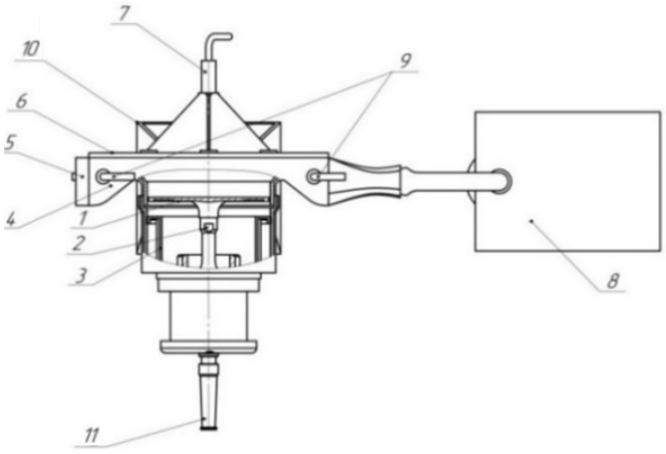
В последнее время большее внимание уделяется повышению эффективности способов газоочистки, особенно от частиц размером менее 2,5 мкм из-за их высокой общей поверхности и счетной концентрации. Из-за малых размеров подобные частицы задерживаясь в воздухе долгое время оказывают негативное влияние на здоровье человека.

Реализуемые в настоящее время способы очистки основаны на различных физических явлениях и принципах воздействия на загрязняющие газ частицы, например, на реализации процессов инерции и центробежных явлений [1]. Эффективность реализации этих способов очистки может достигать 70–90 % для частиц размером более 5–10 мкм. На меньшие частицы воздействие почти не оказывается. Это обусловлено отсутствием эффективных физических механизмов воздействия на тонкодисперсные частицы. Повысить эффективность способов газоочистки можно путем ультразвукового воздействия на тонкодисперсные частицы.

Однако предельные возможности ультразвукового воздействия при коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм до настоящего времени экспериментально не определены. Это не позволяет реализовывать конструкции ультразвуковых коагуляторов с максимальной эффективностью и не дает возможности выявлять пути решения проблемы повышения эффективности УЗ коагуляции мелких частиц [1-3]. Для исследования процесса

ультразвуковой коагуляции тонкодисперсных частиц был создан стенд, реализующий различные условия воздействия ультразвуковыми колебаниями. Для воздействия на аэрозоль были использованы два ультразвуковых излучателя: поршневого типа (формирующий плоскую акустическую волну) и в виде изгибно-колеблющегося диска (формирующий неоднородное акустическое поле вдоль радиуса диска).

Конструкция экспериментального стенда представлена на рисунке 1.



1) ультразвуковой излучатель; 2) пьезоэлектрическая ультразвуковая колебательная система; 3) фланец; 4) коагуляционная камера; 5) вентилятор; 6) отражательная пластина; 7) микрофон; 8) генератор газодисперсной взвеси (аэрозоля); 9) фотодиоды выходного и входного каналов, работающие в инфракрасном диапазоне; 10) опорная рама стенда; 11) кабель питания излучателя ультразвуковых колебаний

Рисунок 1 – Конструкция экспериментального стенда

Для обеспечения максимального ультразвукового воздействия в предложенном стенде был реализован режим резонансного усиления колебаний в коагуляционной камере при помощи круглого металлического отражателя. Для обеспечения резонансных режимов и установления различных уровней ультразвукового давления в стенде была предусмотрена возможность регулировки расстояния между излучателем и отражателем путем перемещения излучателя вдоль вертикальной оси коагуляционной камеры [3-4].

Экспериментальные исследования состояли из определения уровня звукового давления между излучателем и отражателем и определения эффективности УЗ коагуляции.

Для определения предельных возможностей ультразвукового воздействия для коагуляции тонкодисперсных аэрозолей в режиме плоской стоячей волны была разработана ультразвуковая колебательная система с продольно-колеблющимся излучателем (поршневой излучатель). Основой излучателя служит тело цилиндрической формы резонансной (полуволновой) длины, соединенное с электроакустическим преобразователем [5].

Экспериментальные исследования уровня звукового давления проводились внутри коагуляционной камеры, с использованием шумомера Экофизика-110А, при различных расстояниях между используемым излучателем и отражателем. В результате были полученные данные: на резонансном промежутке равном 1 длине волны уровень звукового давления достигал своего максимума равного 161 дБ.

Эффективность ультразвуковой коагуляции оценивалась по отношению оптической плотности аэрозоля на входе и выходе экспериментального стенда. Оптическая плотность определялась по ослаблению инфракрасного луча, проходящего через аэрозоль.

Результаты исследования эффективности процесса коагуляции для поршневого излучателя в зависимости от расстояния до отражателя представлены на рисунке 2.

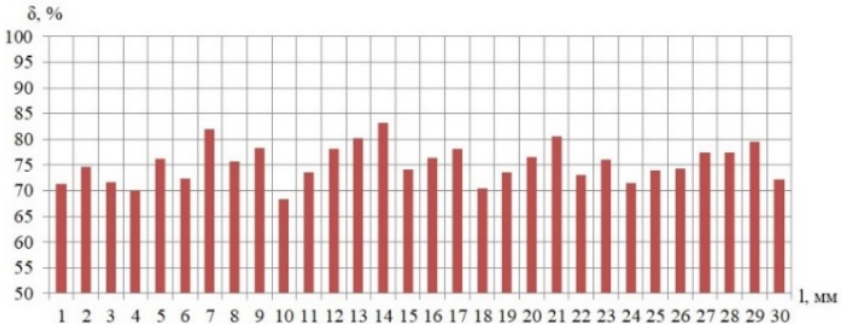


Рисунок 2 – Гистограмма зависимости эффективности коагуляции от расстояния между поршневым продольно-колеблющимся излучателем и отражателем

Из анализа гистограммы следует, что пик эффективности коагуляции приходится на расстояние 14 мм – 1 длина волны. На этом расстоянии эффективность достигает максимума.

Для повышения эффективности коагуляции тонкодисперсных частиц было предложено воздействовать неоднородным акустическим полем. Поэтому для дальнейших исследований был разработан и создан УЗ излучатель, позволяющий формировать иные условия в УЗ полях. В качестве такого излучателя был использован излучатель в виде изгибно-колеблющегося диска.

В процессе воздействия на аэрозоль в коагуляционной камере дисковым излучателем было установлено, что визуально можно наблюдать формирование вихревых акустических течений между дисковым излучателем и отражателем (рисунок 3).



Рисунок 3 – Формируемые акустические потоки вихревого типа дискового излучателя

При расстоянии λ/4, осажденные на поверхности отражателя капли (образуются в результате ультразвуковой коагуляции аэрозоля) образуют концентрические кольца. При этом внутренние кольца имеют более правильную форму и более четкую границу, чем внешние кольца. При расстоянии 7 мм и 14 мм структура осаждений также является регулярной, однако представляет собой сочетание пятен, равномерно покрытых осажденными каплями и концентрических колец. При этом внешние кольца не замкнутые. Это, по-видимому, связано со структурой акустического поля в зазоре и формируемыми акустическими течениями. При расстояниях меньше 4 мм (λ /4) и больше 14 мм (λ) формирование вихревых потоков не происходит. Следовательно, можно сделать вывод о факте возникновения на определенных расстояниях вихревых потоков в тонком промежутке.

По аналогии с поршневым излучателем был измерен уровень звукового давления при различных расстояниях между дисковым излучателем и отражателем. В результате получили, что для дискового излучателя на расстоянии, равном 1 длине волны формируется уровень звукового давления 160 дБ [6-7]. Равенство уровней звукового давления, формируемого обоими излучателями, позволяет сравнить эффективность коагуляции, обеспечиваемой дисковым излучателем и определить влияние вихревых потоков на эффективность.

Результаты эффективности коагуляции дискового излучателя показаны на рисунке 4.

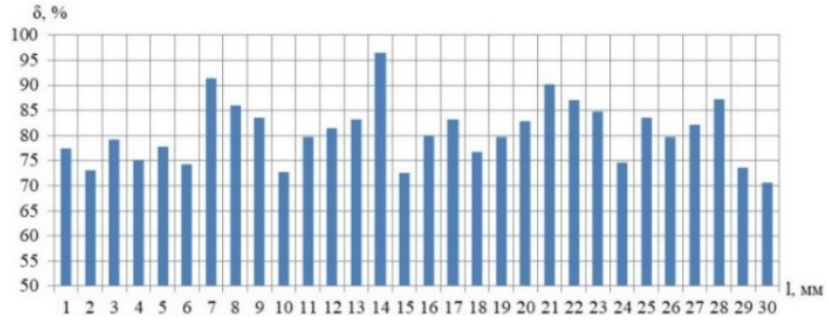
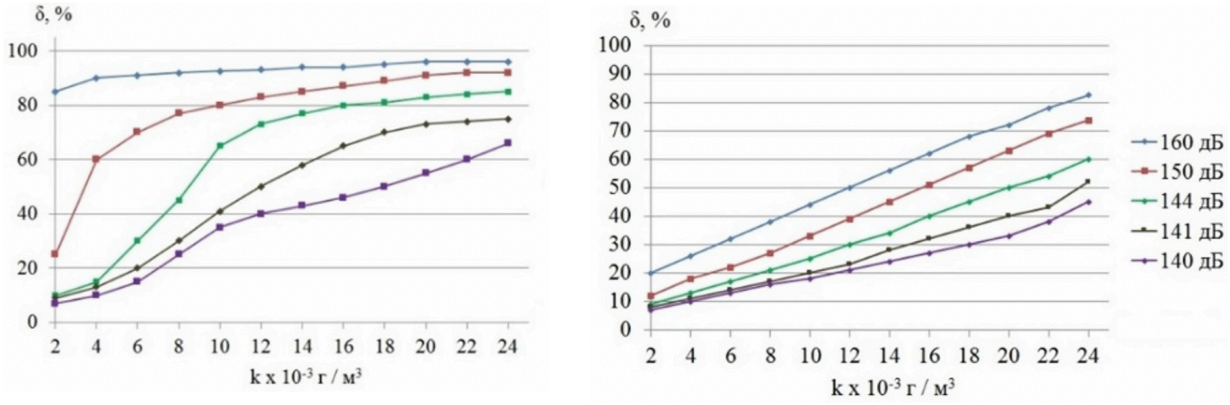


Рисунок 4 – Гистограмма зависимости эффективности коагуляции от расстояния между изгибно-колеблющимся дисковым излучателем и отражателем

Сравнив гистограммы на рисунках 2 и 4 выявлено, что для обоих излучателей пик эффективности коагуляции приходится на расстояние 1 длины волны ультразвуковых колебаний. На этом расстоянии эффективность коагуляции достигает своего максимума.

Также были проведены аналогичные эксперименты по исследованию эффективности процесса коагуляции дискового и поршневого излучателей при различных концентрациях аэрозоля. Результаты эксперимента представлены на рисунке 5.



а) б)

Рисунок 5 – Зависимость эффективности коагуляции от начальной концентрации: а) для дискового излучателя; б) для поршневого излучателя

Из сравнения графиков на рисунке 5 было установлено, что при использовании дискового излучателя при малой концентрации частиц эффективность коагуляции значительно превышает эффективность излучателя поршневого типа. Эффективность коагуляции излучателя поршневого типа с увеличением концентрации частиц возрастает линейно и достигает своего максимального значения 83% при значении концентрации $24 \cdot 10^{-3}$ г/м^3, в то время как эффективность дискового излучателя достигла своего максимума 96% при концентрации уже $18 \cdot 10^{-3}$ г/м^3. То есть, создание вихревых течений эффективно для сред с малой концентрацией частиц [3, 6-8].

Из полученных результатов следует возможность обеспечения эффективности коагуляции в равна 96 % для дискового излучателя (в сравнении с 83 % для излучателя поршневого типа). Таким образом, эффективность коагуляции при помощи дискового излучателя, создающего акустические потоки вихревого типа, выше, чем при использовании излучателя поршневого типа до 13%. Это может быть обусловлено созданием вихревых акустических течений. При их формировании создаются условия для дрейфа частиц под действием центробежных из центральной области вихря к его периферии. В результате обеспечивается локальное повышение концентрации частиц в периферийной области вихря,

повышающее вероятность столкновения, а, следовательно, и коагуляции частиц под действием ультразвуковых колебаний.

В результате проведенных исследований предложен новый способ очистки газов от дисперсных частиц размером менее 2,5 мкм за счет увеличения времени ультразвукового воздействия на каждую частицу и создания зон локального увеличения концентрации тонкодисперсных. Это обеспечивается путем формирования вихревых потоков. Локальная зона повышенной концентрации частиц формируется в периферийной области вихря, за счет дрейфа частиц под действием центробежных из центральной области вихря к его периферии. При этом излучающая поверхность выполняется в виде плоского диска. Вихревые потоки обеспечивают повышение эффективности ультразвуковой коагуляции не менее чем на 13% по сравнению с коагуляцией в режиме плоской стоячей волны. Экспериментально установлено, что в наибольшей степени вихревые потоки проявляются на расстояниях 7 мм ($\lambda/2$) и 14 мм (λ). Установлено, что формирование вихревых потоков позволяет:

– при одинаковом уровне звукового давления, создаваемом обоими излучателями, дисковый обеспечивает более высокую эффективность коагуляции $\delta = 96$ %, чем излучатель поршневого типа $\delta = 83$ % в промежутке равном 1 длине волны УЗ колебаний в воздухе.

– формирование вихревых акустических течений наиболее целесообразно для аэрозолей малых концентраций. Так для концентрации $18 \cdot 10^{-3}$ г/м^3 прирост эффективности, обеспечиваемый вихревыми потоками, составляет до 50%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Алтайского края Российской Федерации в рамках научного проекта № 19-48-220001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 386 с.

2. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. – Пенза.: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.

3. F. Fan, S. Zhang, W. Wang, J. Yan, M. Su Numerical investigation of PM2.5 size enlargement by heterogeneous condensation for particulate abatement. Elsevier. 2019. V. 125. P.197–206.

4. Bing Feng Ng, Jin Wen Xiong, Man Pun Wan Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in air-conditioning and mechanical ventilation (ACMV) system. PLOS ONE. 2017. V. 12. P. 1–26.

5. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н., Нестеров В.А. Ультразвук. Газоочистка. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2018. – 534 с.

6. J. Holonen, T. Lanki, T. Yli-Tuomi, P. Tiittanen, V. Kulmala, J. Pekkanen Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly. Amrican Journal of Epidemilogy. 2009. V. 20. P. 143–153.

7. A. Gallego-Juarez, G. Rodroguez-Corral, L. Gaete-Garreton. An ultrasonic transducer for high power applications in gases. Ultrasonic. 1998. V. 16(6). P 267–271.

8. R.R. Andres, V.M. Acosta, M. Lucas, E. Riera Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator. Ultrasonic. 2018. V. 82. P. 345–356.

УДК 677.054.89:004.94 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-357-359

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТКАЦКОГО СТАНКА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БУМГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ СУШИЛЬНЫХ СЕТОК OPERATINGCONTROLANDDIAGNOSISOFTHEWEAVINGMACHINEFORTHEPAPER DRYINGNETSPRODUCTION

Сигачева Валентина Васильевна, Меняйло Илья Евгеньевич
Valentina V. Sigacheva, Ilya E. Menailo

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
St. Petersburg University of Industrial Technology and Design
(e-mail:sigacheva2006@mail.ru, menyailo96@mail.ru)

*Аннотация:*Обоснована целесообразность эксплуатационного контроля и диагностирования ткацкого станка для выработки сушильных сетокбумагоделательных машин.

*Abstract:*Ubstantiated the expediency of operational control and diagnostics of a weaving machine for the production of drying meshes of paper-making machines.

Ключевые слова: контроль, диагностирование, технические средства, датчики
*Keywords:*control, diagnostics, technical means, sensors.

Современные сушильные сетки, применяемые в производстве бумаги, должны удовлетворять большому комплексу требований, обеспечивающих их технологическую работоспособность и эксплуатационную надежность. Они являются своеобразной «одеждой» сушильной части бумагоделательных машин. Эксплуатация сеток происходит в течение длительного срока в условиях высокой температуры (до 170 °С), влажности, кислой среды (pH = 4±0,5), при скоростях до 1000 м/с и больших динамических нагрузках. Вследствие этого тканые полотна сетки имеют сложную многослойную структуру, вырабатываемую из круглых и плоских химических мононитей и специальных комплексных нитей с высокими механическими характеристиками, термической и гидролитической устойчивостью. Сушильные сетки вырабатываются на тяжелых ткацких станках с рабочей шириной от 2 до 10 м.Сетки, подвергающиеся в процессе изготовления деформации под действием статических и динамических нагрузок, могут иметь технологические дефекты, возникающие в процессе изготовления при неудовлетворительном техническом состоянии оборудования.

Диагностика технического состояния механизмов ткацкого станка в рабочем режиме обеспечивает своевременный ремонт оборудования, совершенствование систем управления технологическим процессом.

Модернизация эксплуатируемого оборудования, посредством внедрения встроенной в станок диагностической системы, позволит своевременно устранять технические неполадки и стабилизировать технологический процесс. Такой способ значительно дешевле, чем закупка нового современного дорогостоящего оборудования.Модернизацию ткацких станков можно осуществить без длительного перерыва в работе оборудования, что выгодно для производственного процесса.

Основной проблемой использования устаревших ткацких станков является износ отдельных частей оборудования,возникающая дополнительная вибрации валов и приводных кулачково – рычажных механизмов рабочих органов. Контроль состояния каждого элемента ткацкого станка является нецелесообразным и экономически невыгодным. Однако можно контролировать изменение вибрации только основных валов, подшипниковых узлов, рычажных приводных механизмов и рабочих органов, т.к. дополнительная вибрация этих устройств оказывает значительное влияние на дальнейшую работу ткацкого станка. Она может привести к разрушению других механизмов ткацкого станка, что негативно влияет на производство.

Контроль вибрации основных устройств можно осуществить с помощью современных датчиков параметров вибрациис длительным периодом эксплуатации, подключенных к контроллеру, для которого разработано специальное программное обеспечение. Он обрабатывает экспериментальные данные и далее передает их в базу данных, где осуществляется сравнение с эталонными параметрами.

Помимо этого, с помощью контроллера можно реализовать функции мониторинга и управления. При превышении заданного уровня вибрации на элементах ткацкого станка, контроллер выдает сигнал тревоги и отключает оборудование. Такая защита необходима для своевременного отключения станка, так как, если оператор вовремя не заметит изменение вибрации оборудования, это может привести к поломкам деталей и останову станка.

Таким образом, с помощью дополнительного подключения датчиков вибрации к валам и устройствам ткацкого станка, установки контроллера с программным обеспечением и разработанной базой данных можно существенно увеличить продолжительность работы ткацких станков.

Для реализации автоматизированной встроенной диагностической системы ткацкого станка необходимо разработать структуру аппаратно-программного комплекса (АПК) ткацкого станка.

Структура аппаратно-программного комплекса подсистемы уровня присоединения ткацкого станкасостоит из элементов полевого уровня - датчиков, элементов уровня присоединения и верхнего уровня.

Полевой уровень включает в себя датчики,установленные на ткацком станке в местах наиболее подверженных вибрации. Выбор датчиков виброускорения зависит от максимального диапазона измерения, типа выходного сигнала и направления измерения. Эти параметры выбираются в соответствии с особенностями контролируемого оборудования.

Так же в таблице 1 представлены примеры датчиков механических величин. Выбор датчиков механических величин зависит от диапазона измерения смещений, воздушного зазора и предела допускаемой дополнительной погрешности.

Таблица 1 – Датчики механических величин

Наименование	Диапазон измерения смещений, мм	Нулевой воздушный зазор, мм	Пределы допускаемой дополнительной погрешности, %	Рабочий температур-ный диапазон, °С	Диаметр датчика
ДВТ10	0 – 2	0,4 ± 0,1	±4,0	от -40 до +180	М10х1
ДВТ20	0 – 4	1,0 ± 0,1	±4,0	от -40 до +180	М16х1
ДВТ30	0 – 20	0,8 – 1,5	±2,5	от -40 до +180	М20х1
ДВТ50	0 – 360 (Зависит от типа штока)	Зависит от типа штока	±4,0	от -40 до +125	Зависит от типа штока

Структура аппаратно-программного комплекса подсистемы контроля ткацкого станкасостоит из элементов полевого уровня - датчиков, элементов уровня присоединения и верхнего уровня.

Полевой уровень включает в себя датчики вибрации, установленные на ткацком станке в местах наиболее подверженных вибрации. Выбор датчиков зависит от максимального диапазона измерения, типа выходного сигнала и направления измерения. Эти параметры выбираются в соответствии с особенностями контролируемого оборудования.

Уровень присоединения включает автоматизированный контроллер с программным обеспечением, устройства управления, защиты, опроса или мониторинга, установленные«по месту» на ткацком станке, либо в специальных шкафах для аппаратуры.

Устройства верхнего уровня состоят из стационарного компьютера с базой данных, рабочего места оператора, интерфейсов, обеспечивающих дистанционную связь, и т. д.

Устройства полевого уровня собирают и передают информацию на устройства уровня присоединения. Полученная информация обрабатывается, формируются сигналы управления, а часть информации передается на верхний уровень, на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора и в архив.

На АРМ оператора отображаются текущие технические состояния узлов ткацкого станка и значения диагностических параметров. В случае необходимости, оператор может подавать управляющее воздействие на коммутационное оборудование, тем самым способствуя отключению оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технические средства и методы виброакустической диагностики оборудования текстильной и легкой промышленности / Сигачева В.В. и др. – М.: Легпромбытиздат, 1993 г. 160 с.

2. Сигачева В.В., Маежов Е.Г., Повышение ресурсосбережения ткацких станков при плановом использовании автоматизированной диагностической системы механизмов// Вестник Санкт- Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Серия 1 Естественные и технические науки 2019 № 4. С.86–88.

УДК 519.25:677.4

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРУЧЕНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ НИТЕЙ
ESTIMATION OF THE ERROR IN DETERMINING THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF TWISTED PRODUCTS MADE OF SYNTHETIC YARNS

Наумов Владимир Аркадьевич, Насенков Павел Владимирович
Vladimir A. Naumov, Pavel V. Nasenkov

Калининградский государственный технический университет, Россия, Калининград
Kaliningrad State Technical University, Russia, Kaliningrad
(e-mail: van-old@mail.ru, pavel.nasenkov@klgtu.ru)

Аннотация: Обработаны результаты экспериментального исследования прочностных характеристик крученых изделий из синтетических нитей. Рассчитаны случайные погрешности определения разрывного усилия и относительного удлинения для трех материалов. Установлено, что больше случайные погрешности определения относительного удлинения. Они уменьшаются при испытании изделий в мокром виде.

Abstract: The results of an experimental study of the strength characteristics of twisted products made of synthetic threads were processed. Random errors in determining the breaking force and elongation for the three materials were calculated. It is found that the random errors in determining the relative elongation are greater. They are reduced when testing products in wet form.

Ключевые слова: синтетические нити, крученые изделия, разрывное усилие, относительное удлинение, эксперименты, случайные погрешности.

Keywords: synthetic threads, twisted products, breaking strength, elongation, experiments, random errors.

В настоящее время крученые изделия из синтетических нитей (канаты, веревки) находят все более широкое применение в промышленном рыболовстве [1, 2], в строительстве [3], в текстильной и других отраслях промышленности. Опубликовано довольно много

результатов исследований прочностных характеристик таких изделий (см. [4-7] и библ. в них), в том числе и по статистической обработке результатов испытаний (например, [7]). Однако недостаточно исследованным остается случайный характер свойств синтетических нитей и изделий из них. Цель данной статьи – оценить степень стохастичности прочностных свойств крученых изделия из синтетических нитей по разбросу результатов испытаний, проведенных в одинаковых контролируемых условиях.

В лаборатории Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета аспирантом П.В. Насенковым были проведены испытания крученых изделий, изготовленных из полипропилена (ПП), полиамида (ПА) и полиэфира (ПЭ). Испытания проводились на универсальных разрывных машинах Shimadzu Autografh AGS-X10. Отбор и подготовка материала проводилась согласно ГОСТ 6611.2-73. Все образцы перед началом испытаний в течение суток выдерживались в расправленном виде для разглаживания. Испытания для определения разрывной нагрузки и удлинения проводились в сухом и в мокром виде. Более подробно методика проведения экспериментальных исследований описана в [8].

Испытания изделий были проведены при трех скоростях (V = 10; 50; 100 см/мин), трех длинах образцов (L =100; 175; 250 мм), ПП и ПЭ образцы были 4-х диаметров (d = 1,1; 2,0; 3,1; 4,0 мм), ПА – 3-х диаметров (d = 1,1; 2,0; 3,1 мм). При каждом наборе контролируемых параметров проводилась серия по 5 испытаний, всего 495 испытаний в 99 сериях. В табл. 1 приведена часть результатов испытаний крученых изделий ПА в сухом виде.

Таблица 1. Результаты испытаний крученых изделий ПА в сухом виде

Серия	d, мм	L, мм	V, см/мин	Опыт	P, Н	E, %
1	1,1	100	10	1	452,0	69,4
				2	445,4	65,2
				3	451,7	68,8
				4	451,6	69,2
				5	445,7	67,1
2	1,1	100	50	1	434,4	70,2
				2	435,0	75,1
				3	436,7	71,4
				4	433,3	72,7
				5	437,9	72,1
…						
27	3,1	250	100	1	2685	51,1
				2	2554	47,7
				3	2481	46,6
				4	2429	46,7
				5	2622	48,7

Рассчитаем погрешности в каждой серии из n испытаний. Абсолютная и относительная случайная погрешность прямых измерений (см., например, [9]):

$$\Delta_{P/сл} = t_{\gamma,n-1} \cdot \frac{\overline{\sigma}_P}{\sqrt{n}}, \quad \varepsilon_{P/сл} = 100 \cdot \frac{\Delta_{P/сл}}{\overline{P}}, \tag{1}$$

где $\overline{P}$ – среднее выборочной значение; $\overline{\sigma}_P$ – среднее квадратичное отклонение; $t_{\gamma,n-1}$ – коэффициент Стьюдента (принимаем доверительную вероятность γ=0,95).

Абсолютная полная погрешность прямых измерений

$$\Delta_P = \sqrt{(\Delta_{P/сл})^2 + (\Delta_{P/сист})^2}, \tag{2}$$

где $\Delta_{P/сист}$ – систематическая погрешность измерительного устройства.

Относительная погрешность прямых измерений в процентах

$$\varepsilon_P = 100 \cdot \frac{\Delta_P}{\overline{P}} = \sqrt{\varepsilon^2_{P/сл} + \varepsilon^2_{P/сист}}, \quad \varepsilon_{P/сист} = 100 \cdot \frac{\Delta_{P/сист}}{\overline{P}}. \tag{3}$$

Обработка результатов испытаний по формулам (1)-(3) была выполнена по сериям для изделий из всех материалов. В табл. 2 результаты обработки представлены для изделий из ПП. Далее были найдены средние и максимальные значения относительной погрешности для изделий из каждого материала, как в сухом, так и в мокром виде (табл. 3).

Таблица 2 – Обработка результатов испытаний изделий из ПП по сериям

d, мм	*L*, мм	*V*, см/мин	В сухом виде				В мокром виде			
			P, Н	ε_P, %	*E*, %	ε_E, %	*P*, Н	ε_P, %	*E*, %	ε_E, %
1,1	100	10	300,8	0,40	64,3	5,04	328,5	1,35	62,7	4,92
		50	309,7	0,84	65,9	5,52	341,4	1,23	62,4	4,06
		100	315,6	0,37	64,7	7,31	346,9	0,57	65,1	2,21
	175	10	302,0	0,37	46,6	2,34	330,8	0,33	49,8	1,38
		50	305,9	0,30	45,1	2,68	340,7	0,86	48,4	1,63
		100	312,5	0,37	45,9	2,92	345,5	1,07	47,7	2,98
	250	10	294,5	0,65	38,0	5,93	326,6	0,39	41,5	2,31
		50	305,4	0,20	39,0	6,07	335,5	1,33	41,2	4,30
		100	307,6	0,33	38,6	2,80	343,4	0,42	40,3	3,87
2,0	100	10	684,5	1,10	86,9	4,67	767,0	1,00	85,8	2,50
		50	716,2	0,58	79,1	5,92	785,0	0,60	83,4	3,42
		100	730,3	0,95	76,8	3,81	778,6	1,52	76,9	1,15
	175	10	696,8	0,52	61,1	0,83	769,2	0,72	61,8	3,13
		50	708,7	0,57	58,8	0,92	785,5	0,49	58,9	4,25
		100	724,3	0,82	58,0	4,69	790,4	1,64	55,8	5,12
	250	10	678,6	0,76	51,3	1,45	765,1	0,39	52,6	1,35
		50	694,9	0,72	48,8	3,32	789,3	1,26	48,5	2,61
		100	717,2	0,31	47,7	3,77	804,7	0,66	48,8	2,95
3,1	100	10	1339	0,34	82,4	3,33	1506	0,88	85,5	5,26
		50	1410	0,33	80,2	3,92	1530	0,78	77,5	2,26
		100	1447	0,44	77,1	4,02	1546	0,68	75,6	2,77
	175	10	1348	0,58	60,9	3,42	1516	0,65	61,7	1,86
		50	1412	0,42	56,9	0,90	1531	9,71	56,9	1,45
		100	1426	2,39	52,9	8,93	1549	1,14	54,4	1,99
	250	10	1314	0,59	50,6	1,71	1507	0,67	48,3	1,64
		50	1374	0,29	48,0	2,17	1549	0,92	46,1	3,23
		100	1415	0,28	45,1	2,34	1523	0,39	44,6	2,01
4,0	100	10	2367	2,15	97,2	3,97	2552	1,59	92,7	1,96
		50	2406	2,40	94,9	2,76	2581	1,33	93,1	3,84
		100	2508	2,67	94,1	4,39	2566	2,11	86,0	2,36
	175	10	2386	0,91	68,6	1,76	2566	0,68	67,3	2,47
		50	2458	2,78	65,9	5,16	2495	2,70	58,6	2,17
		100	2380	1,36	61,3	6,42	2486	2,07	58,1	2,34
	200	10	2384	3,17	54,8	4,10	2490	2,68	54,3	2,65
		50	2388	2,89	52,2	3,95	2507	1,99	50,3	2,39
		100	2381	2,81	51,1	4,24	2407	2,05	46,9	2,60

Таблица 3 – Средние и максимальные значения случайной относительной погрешности

ε	Характер	ПП		ПЭ		ПА	
		сухой	мокрый	сухой	мокрый	сухой	мокрый
ε_P, %	средн.	1,03	1,10	1,25	1,29	2,44	1,28
	макс.	3,17	2,70	3,82	3,02	**9,28**	2,30
ε_E, %	средн.	3,85	2,82	4,26	2,87	4,40	2,56
	макс.	8,93	5,26	9,81	4,73	7,84	4,72

По табл. 3 случайные погрешности ε_E для изделий в мокром виде меньше, чем для изделий в сухом виде. Погрешности относительного удлинения превосходят соответствующие погрешности разрывного усилия в 2-3 раза. Исключение составили результаты испытаний изделий из ПА в сухом виде, где максимальное значение погрешности в серии оказалось ε_P= 9,28%. Скорее всего, такое большое отклонение связано с аномальными свойствами образцов в данной серии. В дальнейшем эти результаты были исключены из рассмотрения.

Согласно паспортным данным машин Shimadzu Autografh AGS-X10 $\varepsilon_{P/сист} = 0{,}5\%$. Все средние случайные погрешности в табл. 3 заметно превышают указанную систематическую погрешность, особенно для относительного удлинения. Для снижения случайной погрешности необходимо увеличивать количество испытаний в серии.

Были рассчитаны коэффициенты парной корреляции различных факторов и относительной погрешности испытаний для изделий из всех материалов. Матрица парной корреляции для изделий ПП в сухом виде представлена в табл. 4. Значимая стохастическая связь имеется между d и ε_P (r=0,683); с увеличением диаметра растет случайная относительная погрешность определения разрывного усилия. Слабая отрицательная стохастическая связь наблюдается между L и ε_E, слабая положительная – между V и ε_E.

Таблица 4 – Коэффициенты парной корреляции различных факторов и относительной погрешности при испытаниях изделий из ПП в сухом виде

ε	Фактор		
	d	L	V
ε_P, %	0,683	0,016	0,058
ε_E, %	–0,060	–0,258	0,306

В заключение статьи следует отметить, что случайные погрешности определения относительного удлинения при разрыве изделий в мокром виде заметно меньше, чем в сухом виде. Для исследованных материалов погрешности определения относительного удлинения превосходят соответствующие погрешности разрывного усилия в 2-3 раза. Все средние случайные погрешности заметно превышают систематическую погрешность измерительных устройств, особенно для относительного удлинения. Обнаружена значимая стохастическая связь: с увеличением диаметра изделий растет случайная относительная погрешность определения разрывного усилия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Евсеева С.С.* Сравнительный анализ технических характеристик синтетических канатов // Вестник АГТУ. Промышленное рыболовство. 2008. № 3. С. 90.

2. *Greenwood M.C., Longerich R.* Determining tensile strengths of large-diameter synthetic fiber rope // Sea Technology. 2012. Vol. 53(4). P. 50.

3. *Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примак Л.В., Ахмедов И.М.* Испытания прочности канатов из полимерных материалов // Механизация строительства. 2017. Т. 78, № 4. С. 30.

4. *Лобанов Д.С., Темерова М.С.* Особенности квазистатических испытаний нитей и тканей // Вестник Пермского политехнического университета. Механика. 2013. № 2. С. 96.

5. *Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Ахмедов И.М.* Анализ результатов испытания прочности трехпрядных канатов из полимерных материалов // Известия КГТУ. 2015. № 36. С. 43

6. *Han G., Tao X., Li X., Jiang W., Zuo W.* Study of the mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene fiber rope // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2016. Vol. 11. Iss. 1. P. 9.

7. *Наумов В.А.* О законе распределения удлинения нити при разрыве // Химические волокна. 2019. № 4. С. 32.

8. *Насенков П.В., Недоступ А.А., Наумов В.А.* Экспериментальные исследования разрывного усилия и относительного удлинения рыболовных веревочно-нитевидных изделий с различной скоростью разрыва и длиной исследуемых объектов // Известия КГТУ. 2020. № 58. С. 35.

9. *Кравченко Н.С., Ревинская О.Г.* Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в лабораторном практикуме: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 88 с.

УДК 669-1 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-363-366

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СПЛАВОВ ТИТАНА, МОЛИБДЕНА И ТАНТАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF TITANIUM, MOLYBDENUM AND TANTALUM ALLOYS TO INCREASE THE CORROSION RESISTANCE OF OIL REFINING EQUIPMENT

Новоселова Елена Александровна
Elena A. Novoselova
АО НДЦ НПФ «Русская лаборатория», Россия, Санкт-Петербург
RUSSIAN LABORATORI Ltd., Russia, St. Petersburg
(e-mail: novoselova-1989@mail.ru)

Аннотация: В статье приводится обоснование рекомендаций по применению конструкционных материалов на основе сплавов титана, молибдена и тантала для изготовления нефтеперерабатывающего оборудования, и его деталей, которые позволят существенно повысить их надежность, а также технологическую и экологическую безопасность при эксплуатации нефтепроводов и промышленных установок нефтеперерабатывающих заводов.

Abstract: The article provides the rationale for recommendations on the use of structural materials based on titanium, molybdenum and tantalum alloys for the manufacture of oil refining equipment, and its parts, which will significantly improve their reliability, as well as technological and environmental safety during the operation of oil pipelines and industrial installations of oil refineries.

Ключевые слова: сплав, титан, тантал, молибден, коррозионная стойкость, нефтеперерабатывающее оборудование.

Keywords: alloy, titanium, tantalum, molybdenum, corrosion resistance, oil-refining equipment.

В настоящее время значительная часть нефтеперерабатывающего оборудования эксплуатируется в тяжелых условиях. Оно подвергается постоянному воздействие коррозионных сред в сочетании с воздействием высоких и низких температур, статических, динамических и циклических нагрузок. Это существенно повышает технологическую и экологическую опасность конструкций и, как следствие, приводит к возрастанию требований по их надежности. Вопрос выбора материалов является первостепенным в решении проблемы повышения надежности нефтеперерабатывающего оборудования.

При выборе материала для той или иной детали или конструкции учитывается экономическая целесообразность его применения, сохранение конструкционных критериев и возможность переработки в изделие. Все эти требования обеспечивают сплавы титана, молибдена и тантала.

Титан и его сплавы. В химическом машиностроении, в основном, применяются технически чистый титан марок ВТ1-00, ВТ1-0, ВТ1-2 и титановые деформируемые сплавы типа ОТ4-0, ОТ4-1 и ОТ4 (с легирующими добавками марганца до 2% и алюминия –1-3,5%) [1].

Эти сплавы, к сожалению, пока еще недостаточно широко применяются в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отраслях. В то же время, титан и его сплавы обладают рядом уникальных качеств, в том числе, повышенной коррозионной стойкостью в агрессивных средах.

Технически чистый титан подвергается всем видам механической обработки. Данные по механическим свойствам титана ВТ1 и сплава ОТ4 приведены в таблице 1.

В ГОСТ 19807 «Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки» приведены марки и химический состав титана и титановых сплавов [2].

Нормальный электродный потенциал ($Ti \rightleftarrows Ti^{+2} + 2e$) – 1,63 в и ($Ti \rightleftarrows Ti^{+3} + 3e$) – 1,21 В, то есть это химически активный элемент. Однако, при обычных температурах титан не активен, что объясняется образованием на его поверхности пленки типа рутила TiO_2.

Он устойчив против воздействия растворов многих кислот, щелочей, солей. По стойкости в HNO_3 и H_2CrO_4 титан превосходит все металлы. В растворах азотной кислоты титан стоек вплоть до температуры кипения.

Таблица 1 - Механические свойства ВТ1 и ОТ4

Свойства	ВТ1	ОТ4
Предел прочности, Мн/м^2	450-600	700-850
Относительное удлинение, %	не менее 25	15-40
Ударная вязкость, (н×м/м^2) ×10^5	7	3,6-6,5

При комнатной температуре на титан не действует “царская водка”, которая растворяет золото и платину. В органических кислотах (молочной, уксусной, стеариновой, лимонной, виннокаменной) отполированная поверхность титана даже не утрачивает своего блеска. Этот металл абсолютно стоек во влажном хлоре и его водных соединениях, а также стоек по отношению к парам серы и ее соединениям. Коррозия происходит лишь в тех случаях, когда разрушается защитная пленка, обнажая активный металл.

В расплавах солей и металлов коррозионная устойчивость титана не одинакова. Так, в расплаве NaC1 при наличии контакта с воздухом Ti сильно корродирует, а в атмосфере нейтральных газов коррозия незначительна. В расплавленном Bi, Pb, Sn при плюс 300^{o}C, в калии и натрии при плюс 600^{o}C, в расплавленной сере при плюс 240^{o}C титан устойчив.

Титан отличается высокой коррозионной стойкостью в морской воде и в атмосфере. Скорость коррозии Ti в морской воде составляет всего 0,02 мм за 1000 лет. В 15%-ом растворе H_2SO_4, дымящейся HNO_3 титан склонен к межкристаллитной коррозии.

Коррозионная стойкость и физико-механические свойства технического титана могут быть значительно увеличены путем легирования его элементами, которые образуют с титаном твердые растворы двух или многокомпонентных однофазовых систем. Наиболее эффективны для увеличения коррозионной стойкости титана добавки таких элементов, как Mo, Ta, Nb, Zr, Cu.

Сплавы титана с молибденом (3-5%) достаточно хорошо устойчивы в растворах таких кислот, как HC1, H_2SO_4, H_3PO_4. Недостатком сплавов системы Ti – Mo является их нестойкость в растворах концентрированной серной и азотной кислот.

Сплавы титана, содержащие больше 40% тантала, отличаются коррозионной стойкостью в таких сильно агрессивных средах, как кипящие растворы 20% HC1, 30% H_2SO_4.

В химической и нефтехимической промышленности Ti и его сплавы рекомендуется использовать для работ более, чем в 130 агрессивных средах.

Только титановое оборудование позволило, например, организовать промышленное получение NH_4C1 методом выпаривания. Применение титана способствовало возникновению производства ацетальдегида, малеинового ангидрида и некоторых спиртов - сырья для синтетических волокон, пластиков, лаков.

Следует отметить, что недавно институтом ЦНИИ «Прометей» разработан новый высокопрочный титановый β-сплав марки ТС-6. Сплав позволяет за счет термообработки изменить прочность от 750 МПа до 1500 МПа и обеспечить высокую технологичность в отожженном состоянии (удлинение не менее 20%, относительное сужение не менее 50%). Этот сплав соответствует лучшим зарубежным аналогам (сплав В120 США), имеет широкую область применения, в частности для изготовления систем трубопроводов, гидравлических и пневматических устройств, топливных баков.

Сплав ТС-6 обеспечивает снижение массы изделий в 1,5 – 1,8 раза по сравнению со сталью. В настоящее время из этого сплава освоено промышленное производство листа 0,5 – 10,5 мм, прутка диаметром 8 – 250 мм, профилей и проволоки.

Следует отметить, что титановые сплавы с успехом могут быть рекомендованы в качестве перспективных коррозионностойких материалов для изготовления различного рода пружин в элементах бурового оборудования и нефтяной промышленности, поскольку в них выгодно сочетаются высокая прочность, сравнительно низкий модуль упругости, низкая плотность, высокое соотношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, малая магнитная проницаемость и высокая коррозионная стойкость в органических неэлектролитах [3].

При применении титановых пружин может быть достаточно значительное снижение их массы не только вследствие малой плотности сплавов, но и за счет низкого значения модуля упругости, позволяющего использовать пружины с меньшим количеством витков или элементов. По сравнению с пружинами из сталей пружины, изготовленные из титановых сплавов легче в 1,5 – 2 раза [4].

Так, при изготовлении упругих элементов пружин из высокопрочных титановых сплавов ($\sigma_B \geq 1200$ МПа) достигается более высокое соотношение $\sigma_{0,002} / E$ $(0,73 – 0,8)\times10^2$ по сравнению с бронзой марки БрБНТ1 $(0,66\times10^2)$ и сталью марки Н18К9М5Т $(0,68\times10^2)$ [5].

Высокопрочные титановые сплавы являются более предпочтительными, так как максимально допускаемое напряжение пружины τ_3 тем выше, чем больше предел прочности сплава. В свою очередь, чем выше τ_3, тем выше энергоемкость пружины.

По этому критерию в [7] проведено сравнение стали (5160), титана, а также его сплавов Ti – 6Al – 4V и Ti – BC и показана значительная эффективность высокопрочного титанового сплава BC.

Винтовые пружины сжатия, изготовленные из этого сплава, отличаются также высокой долговечностью при испытании на усталость [7].

Молибден и его сплавы. Молибден и его сплавы обладают комплексом свойств, исключительно ценных для современной техники. Температура плавления молибдена равна 2610°С, σ прочности листового молибдена 1200 $Мн/м^2$, предел относительного удлинения 10-12% [8].

Применение молибдена в нефтехимических отраслях пока еще, однако, затруднено, вследствие его низкого сопротивления окислению при повышенных температурах и недостаточной плотности сварных швов. Соединение деталей из Mo производится клепкой.

Молибден устойчив во многих коррозионных средах. При комнатной температуре молибден устойчив в растворах таких кислот, как $HC1$, HF, H_3PO_4, $HCOOH$, CH_3COOH, $C_2H_4O_2$. Однако, присутствие окислителей или аэрация растворов приводят к резкому возрастанию скорости коррозионного процесса.

В HNO_3 молибден растворяется при температуре равной плюс 80-100°С. Разрушают его и растворы серной и соляной кислот. Со щелочами молибден в отсутствии окислителей не взаимодействует. Он устойчив в расплавленных металлах (Na, Pb, K, Mg), за исключением расплавленного алюминия и олова.

На воздухе и в кислороде при 20°С молибден устойчив. Легкое окисление его наблюдается при плюс 300°С, а при плюс 600°С и выше молибден быстро окисляется. Пары воды активно реагируют с молибденом при плюс 600-1000°С, образуя оксиды молибдена и водород.

С фтором молибден взаимодействует при обычной температуре, с хлором при плюс 250°С, с бромом – при плюс 450°С, а с иодом (пары) – при Т > плюс 800°С.

Коррозионная стойкость молибдена возрастает при легировании его небольшими количествами Ti, Zr и Nb. Молибден находит применение для изготовления нагревателей в высокотемпературной технике, работающей в вакууме, а также в восстановительной среде при температурах до 1700°С.

Тантал и его сплавы. Тантал имеет ρ = 166 г/см^3, $T_{пл}$ = 2996°С, σ разрыва 320-460 Мн/м^2, относительное удлинение (δ) – 25-40%, твердость НВ (по Бринелю) 45-125 Мн/м^2. Электропроводность тантала несколько ниже электропроводности стали.

По своим антикоррозионным свойствам тантал превосходит даже благородные металлы. Его высокая коррозионная стойкость связана с образованием на поверхности тантала прочной оксидной пленки Ta_2O_5, обладающей хорошим сцеплением и непроницаемостью [9]. Эта пленка защищает металл от действия большинства агрессивных сред даже при высоких температурах.

Тантал не разрушается в царской водке, в растворах HNO_3, HC1 любой концентрации. Органические кислоты на тантал не действуют. Тантал легко окисляется на воздухе при Т > плюс 300°С, фтор реагирует с танталом при комнатной температуре, хлор – при плюс 250°С, бром – при плюс 300°С, иод – при плюс 1000°С. Свойства тантала можно улучшать с помощью добавок Mo, W, Nb, Ti.

В химическом машиностроении тантал уже применяется для изготовления теплообменной аппаратуры (конденсаторов, теплообменников ректификационных установок). Тантал применяют для изготовления трубок теплообменных аппаратов, змеевиков, работающих под давлением до 60-70 кг/см^2 при плюс 350°С, автоклавов. Его следует более широко внедрять и в изделиях для нефтехимических отраслей.

Для снижения рисков отказов нефтеперерабатывающего оборудования в следствие коррозионного воздействия сред помимо внедрения новых конструкционных материалов необходимо также применение автоматизированных средств контроля и управления технологическими процессами, систем контроля фактического состояния оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фокин М.Н. Титан и его сплавы в химической промышленности / Ю.С. Рускол, А.В. Мосолов – Л.: Химия, 1978.

2. ГОСТ 19807-91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. Введен с 01.07.92. Изд-во стандартов, 1991.

3. Carson R.W. Corrosion and heat resistant flat spring materials / R.W. Carson // Product. Eng. – 1985. – 36 v.

4. Федорович В.А. Мартенситностареющие стали – материал для упругих элементов / В.А. Федорович // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1988. – №10.

6. Seagle S.R. Titanium alloy springs Materials and Design / S.R. Seagle, R. Bajoraitis, C.F. Pepka – 1989. – v. 4.

7. Сопротивление сульфидному растрескиванию сталей с диффузионным хромовым и гальваническим покрытиями. В.Н. Поляков // Актуальные эколого-экономические проблемы современной химии: Тезисы докладов IX Всероссийская межвузовской научно-технической конференции, Самара. – 1991.

8. Войтович Р.Ф. Окисление тугоплавких соединений / Р.Ф. Войтович, Э.А. Пугач – М.: Металлургия, 1978.

9. Туманов А.Т. Тугоплавкие материалы в машиностроении / А.Т. Туманов, К.И. Портного – М.: Машиностроение, 1967.

УДК 685.34.08 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-367-370

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛОКНИСТО-НАПОЛНЕННЫХ ПОДОШВ ОБУВИ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА
TECHNOLOGY OF OBTAINING FIBER-FILLED SHOES BASED ON PRODUCTION WASTE

Радюк Анастасия Николаевна, Буркин Александр Николаевич
Anastasia N. Radyuk, Alexander N. Burkin

Витебский государственный технологический университет,
Республика Беларусь, г. Витебск
Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus, Vitebsk
(e-mail: ana.r.13@mail.ru)

Аннотация: Представлена технология производства волокнисто-наполненных подошв обуви на основе использования отходов производства, способствующая экономии первичных ресурсов и утилизации отходов производства. Проведены исследования свойств полученных подошв, анализ которых позволил выявить их соответствие требованиям стандартов, и то, что их значения близки к используемым в настоящее время материалам в обувной промышленности.

Abstract: The technology for the production of fiber-filled shoe soles based on the use of production waste is presented, which contributes to the saving of primary resources and the disposal of production waste. The study of the properties of the obtained soles, the analysis of which made it possible to reveal their compliance with the requirements of the standards, and the fact that their values are close to the materials currently used in the shoe industry.

Ключевые слова: отходы, кноп стригальный, пенополиуретан, технология, подошвы обуви, свойства.

Keywords: waste, knop shearing, polyurethane foam, technology, shoe soles, properties.

Все технологии переработки подразделяются на две группы: индустриальные и утилизационные. Индустриальные технологии аналогичны технологиям, применяемым для первичного сырья, а утилизационные – специальные технологии переработки вторичного сырья, в частности отходов полимеров и полимерных композиций [1]. Данные технологии позволяют осуществить переработку отходов большинства полимерных материалов, а основные направления переработки полимерных отходов в наибольшей степени связаны с термомеханическим методом. Данный метод позволяет изменить молекулярную структуру пенополиуретана (ППУ) и обеспечивает повторное использование его отходов [2]. Основная цель метода состоит в том, чтобы получить термопластичный материал, который можно было бы использовать в обувной промышленности.

Наиболее значимые результаты научных исследований в области переработки отходов обувного производства достигнуты под руководством К.С. Матвеева, В.В. Пятова, А.Н. Буркина и др. Эффективная практическая реализация изготовления деталей из вторичных материалов осуществляется на предприятиях СООО «Белвест», Белорусский производитель обуви холдинг «Марко», ОАО «Труд». На сегодняшний день разработаны способы переработки отходов, технологии, оборудование для этих целей, композиции для получения различных деталей, подробно рассмотренные в работе [3].

Даная работа заключается в разработке новой композиции для деталей низа обуви, состоящей из отходов легкой промышленности, а именно отходов ППУ и кноп стригальный. В результате снижается себестоимость деталей низа обуви, расширяется ассортимент продукции за счет использования новых материалов, одновременно решается задача импортозамещения и частичной утилизации отходов методом рециклинга.

Указанная задача решается за счет того, что в композиции для деталей низа обуви, включающей в качестве основного компонента вторичное полимерное сырье в виде отходов пенополиуретана обувного производства, а в качестве наполнителя – отходы коврового производства, а именно кноп стригальный полипропиленовый с длиной волокон 2-4 мм. Особенностью таких отходов является невозможность их использования путем возврата в основное или вспомогательное производство в виду незначительных размеров. Использование данных волокон обусловлено их низкой объемной плотностью, позволяющей при небольшом их количестве в композиции достигнуть достаточного армирующего действия.

На основе анализа литературных источников и работ сотрудников УО «ВГТУ» были обоснованы компоненты полимерной композиции. С целью повышения технологичности переработки материала и модификации свойств полимерных композиций применяли дополнительные ингредиенты: масло индустриальное (ТУ 0253-003-71148628-2005) и стеарат кальция (ТУ У 24.1-34767516-003:2008). Представленные компоненты композиции способствуют решению ряда технических и технологических задач при введении их в композицию.

Полиуретановый компонент обеспечивает формирование эластичной полимерной матрицы, сохраняющей основные свойства исходных полиуретанов обувного назначения.

Масло индустриальное улучшает истечение расплава, осуществляет смазывание компонентов композиции с целью облегчения их взаимного агломерирования, способствует определенной пластичности композиции.

Стеарат кальция реализует функцию твердой смазки, предотвращает деструкцию полиуретанового компонента в ходе технологического процесса под действием высоких температур, ослабляет разрушающее действия механических воздействий, особенно интенсивных при переработке и литье – уменьшает трение композиции об рабочие поверхности экструдера и литьевой машины и уменьшает трение частиц композиции друг об друга.

При получении композиционных полимерных материалов кноп выполняет роль связующего, гидрофобизатора и наполнителя.

На основе анализа вариантов технологий производства материалов и изделий для деталей низа обуви с использованием отходов полиуретанов была разработана технология получения полиуретановых композиций для низа обуви, которая включает в себя следующие этапы: сортировка, измельчение, смешивание, гранулирование и литье [4].



Рисунок 1 – Схема технологического процесса получения подошв обуви из вторичного ППУ

На первой стадии отходы сортируются по группам и по внешнему виду. Предварительную сортировку производят, как правило, вручную на столах или ленточных конвейерах; при сортировке одновременно удаляют из отходов различные посторонние предметы и включения.

Далее отходы, прошедшие сортировку, подвергаются измельчению для унификации свойств. Эту стадию можно определить как формирование частиц определенного размера и формы для уменьшения объема и гомогенизации потока сырья.

Для реализации этой стадии технологического процесса отходы предварительно накапливали в специальных ящиках, откуда они поступали на операцию измельчения, осуществляемую с помощью одноротрной дробилки Alpine A 40/63-5-3, предназначенной для эксплуатации на предприятиях, производящих термопластичные материалы и изделия из них, для измельчения отходов производства. При этом следует учесть то, что процесс измельчения должен обеспечить равномерную размерность частиц – отходы ППУ дробили до размеров (5-7) мм.

Главным фактором, влияющим на дальнейшие свойства получаемого материала, является процесс смешивания, который должен обеспечивать высокую гомогенность композиции и, как следствие, постоянность физико-механических свойств. Процесс смешивания и приготовления композиции представляет интерес и с точки зрения технической обработки, так как должна быть обеспечена хорошая совместимость полимерной матрицы с другими компонентами, содержащимися в композиции. В связи с этим данный процесс следует проводить по упрощенной схеме. Приготовление композиции проводили в смесителях – лопастной мешалке. При этом для увеличения гомогенности композита, облегчения введение волокна, улучшения и достижения равномерного распределения волокнистого наполнителя в объеме полимерной композиции необходимо предварительно получить «гель», состоящий из таких компонентов композиции как масло индустриальное и кноп стригальный полипропиленовый.

После чего для получения однородного состава и стабильности физико-механических свойств компоненты композиции пропускают через шнековый экструдер ЭШПО-75Н4 с 4 зонами терморегуляции, механическим приводом с мощностью 5,0 кВт. Гранулирование по данной технологии для получения подошв обуви осуществляется при температурах от 150 °С до 170 °С. Далее идет охлаждение заготовки композиционного материала.

Перед литьем полуфабрикат предварительно еще раз измельчается до размеров гранул 2–4 мм с целью последующей переработки в готовое изделие.

Переработку в изделие осуществляли на литьевом агрегате статического типа SP 345-3 фирмы Main Group. Для литья подошв использовали следующие режимы: температура 145-155 ºС, давление впрыска 40-60 МПа; время впрыска 20 с.; выдержка 240 с.

В результате проведенной апробации была получена композиция, обладающая неплохими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. На основе полученной композиции были отлиты подошвы обуви.

При обосновании методов испытаний полученных образцов подошв обуви были проанализированы стандарты, распространяющиеся на материалы для низа обуви [5, 6]. Для оценки качества полученных подошв определяли следующие показатели: плотность (ρ), твердость (Н), относительное удлинение при разрыве ($\varepsilon_р$), условную прочность ($f_р$), относительное остаточное удлинение после разрыва (Θ), сопротивление истиранию (β), сопротивление многократному изгибу (N). Стандарты, устанавливающие требования к подобным материалам из отходов, в настоящее время отсутствуют. Объем выборки составлял 6 образцов. Из композиций изготовлены отливки в виде подошв обуви фасона «SIGMA», а также проведены испытания с целью оценки их физико-механических и эксплуатационных свойств (таблица 1).

Таблица 1 – Физико-механические и эксплуатационные свойства подошв обуви

Показатель	Полученные образцы подошв обуви волокнисто-наполненной структуры 	Волокнисто-наполненная резина типа «Кожволон»	Подошва обуви из первичного полиуретана
ρ, г/см^3	1,0–1,05	0,90–1,10	0,8–1,1
Н, усл. ед.	80–85	80–95	80–90
$f_р$, МПа	5,0–5,5	6,0–6,5	3,0–6,0
$\varepsilon_р$, %	200–250	180–300	200–250
Θ, %	18	не >20	не >15
β, Дж/мм^3	6,0–6,5	5,0–5,9	не <3,0
N, тыс. циклов	30	>20	>30

Сравнительный анализ показал, что полученные подошвы обуви по физико-механическим и эксплуатационным свойствам близки к значениям свойств волокнисто-наполненных резин и первичного полиуретана, соответственно и обладают достаточными свойствами для того, чтобы рекомендовать их в производстве обуви. Поэтому данные композиции могут быть основой для использования в производстве деталей низа обуви: подошв, каблуков и набоек.

Таким образом, использование в качестве основного компонента отходов ППУ, в качестве наполнителя отходов коврового производства, а именно кноп стригальный полипропиленовый с длиной волокон 2-4 мм позволяет снизить себестоимость изготовления обувных материалов, частично решить проблему утилизации отходов в виду их повторного использования, расширить ассортимент продукции за счет использования новых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лотош В.Е. Экология природопользования. Из-во Ур. гос. эконом. ун-та, 2000. 540 с.

2. Буркин А.Н. [и др.] Обувные материалы из отходов пенополиуретанов: монография. Витебск: УО «ВГТУ», 2001. 173 с.

3. Радюк А.Н. [и др.] Материалы и технологии получения изделий на основе отходов полиуретанов // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2020. № 1(38). С. 100–112.

4. Радюк А.Н., Буркин А.Н. Получение подошв из отходов пенополиуретанов с волокнистым наполнителем // Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности»: сборник научных статей, г. Витебск, 21-22 ноября 2018 г. УО «ВГТУ» Витебск, 2018. С. 266–269.

5. ГОСТ 4.387-85 Система показателей качества продукции. Материалы синтетические для низа обуви. Номенклатура показателей, Введ. 1987.-01.-01, Министерство легкой промышленности СССР, Минск, 1985, 12 с.

6. ГОСТ 7926-75 Резина для низа обуви. Методы испытаний, Введ. 1975.-07.-01, Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, Минск, 1992, 8 с.

УДК 685.34.08 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-371-374

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СИЛ АДГЕЗИИ ВОЛОКОН К СВЯЗУЮЩЕМУ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ КЛЕЯЩЕГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КЛЕЕВОЙ ПРЯЖИ
THE DEPENDENCE OF THE FORCES OF ADHESION OF THE FIBERS TO THE BINDER CONCENTRATION OF ADHESIVE IN THE MANUFACTURE OF GLUE YARN

Рудовский Павел Николаевич, Белова Ирина Сергеевна
Pavel N. Rudovsky, Irina S. Belova

Костромской Государственный Университет,
Россия, Кострома
Kostroma State University, Russia, Kostroma
(e-mail: pavel_rudovsky@mail.ru, belova_irina44@mail.ru)

Аннотация: проведен эксперимент по измерению сил адгезии клеевых растворов ПВА, ПВС и серицина к целлюлозным материалам. Предложена модель зависимости сил адгезии от концентрации клеящего вещества.

Abstract: An experiment was conducted to measure the adhesion forces of PVA, PVA and sericin adhesive solutions to cellulose materials. A model of the dependence of the adhesion forces on the concentration of the adhesive substance is proposed.

Ключевые слова: клеевая пряжа, адгезия, силы адгезии, серицин.
Keywords: adhesive yarn, adhesion, adhesion forces, sericin

При производстве пряжи клеевым способом в настоящее время в качестве клеящего вещества чаще всего используют раствор ПВА, крахмал или поливиниловый спирт (ПВС) [1, 2]. Указанные составы ухудшают гигиенические свойства пряжи и получаемых из нее тканей, и должны удаляться из ткани в процессе отделки. В [3] предложено использовать в качестве связующего при производстве пряжи клеевым способом серицин – природный клей, содержащийся в оболочке коконов тутового шелкопряда. Серицин получают вываривaнием отходов шелкового производства. Водный раствор серицина при охлаждении застывает в виде студня. Чистый высушенный серицин представляет собой порошок без цвета и запаха, разбухающий в холодной воде и легко растворимый в горячей. По своим физико-химическим свойствам серицин отвечает всем требованиям, предъявляемым к связующему, используемому для производства пряжи клеевым способом. Являясь компонентом шелка, он также отвечает гигиеническим требованиям, что исключает необходимость в его выведении из готовых текстильных материалов [3]

Прочность клеевой пряжи зависит от сил адгезии, возникающих между волокнами и связующим. Поэтому для окончательного вывода о применимости серицина в качестве связующего необходимо оценить его адгезию к текстильным волокнам в сравнении с названными выше составами.

В [4] предложено оценивать адгезию связующего с волокном путем отношения силы, необходимой для сдвига волокон, к площади клеевого соединения. Вычислить площадь контакта волокон на практике невозможно. Производство пряжи клеевым способом планируется из целлюлозных волокон – льна и хлопка. В качестве целлюлозного материала, позволяющего изготовить образцы с известной площадью склейки, использовались полоски березового шпона шириной 10 мм и длиной 100 мм. Длина, на которой производилось склеивание, составляла 50 мм. При этом площадь соединения составляла 500 мм^2. В эксперименте склеивание образцов производилось тремя составами связующего – это растворы серицина, ПВА и ПВС с концентрациями до 10%. Концентрация связующего выбиралась в связи с необходимостью минимизировать его содержание в готовой пряже.

Было подготовлено по 3 образца для каждой концентрации и каждого связующего. После высыхания до кондиционной влажности образцы нагружались силой сдвига до разрушения. Согласно методике испытаний, сила адгезии принималась равной максимальной силе сдвига.

По экспериментальным данным были построены графики зависимости сил адгезии от концентрации связующего (рис.1 – 3).

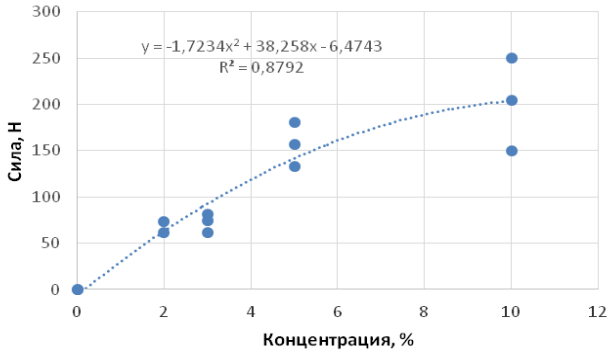


Рисунок 1 – График зависимости сил адгезии от концентрации ПВА

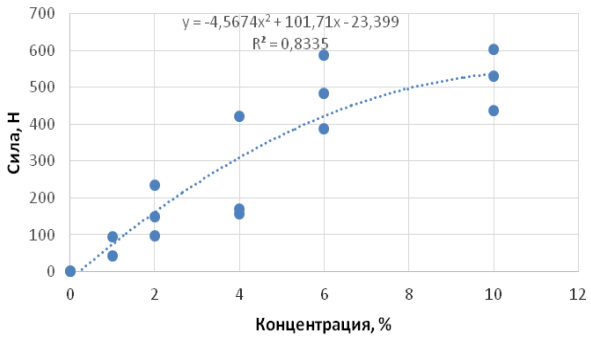


Рисунок 2 – График зависимости сил адгезии от концентрации ПВС

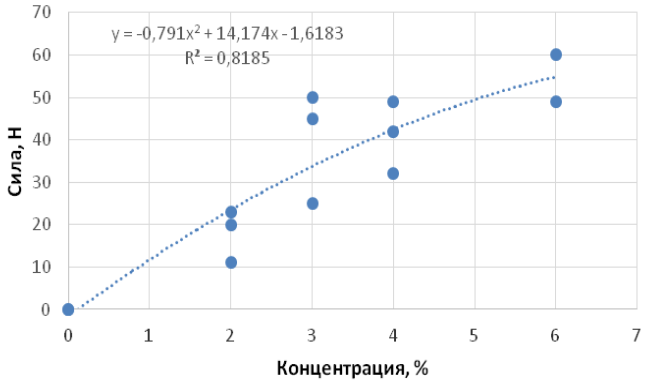


Рисунок 3 – График зависимости сил адгезии от концентрации серицина

Полученные данные аппроксимировались полиномиальными кривыми второго порядка. Полученные при этом значения коэффициентов детерминации R^2 указывают на тесную связь предложенной модели и экспериментальных значений.

Из графиков на рис. 1 – 3 можно говорить о росте значения сил адгезии при увеличении концентрации клеевого раствора. Силы адгезии ПВА и ПВС выше, чем у серицина. Но для применения определенного клеевого раствора в качестве связующего требуется сравнить полученные значения сил адгезии с разрывной нагрузкой волокон, зависящей от вида волокна.

Сравним силы адгезии, возникающие между связующим и целлюлозными волокнами с прочностью волокон. Для этого рассчитаем максимальное значение удельной силы адгезии (силы приходящейся на единицу площади контакта) для трех вариантов связующего. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Удельная сила адгезии при концентрации 6%

Связующее	Удельная сила адгезии, Н/мм^2
ПВА	0,40
ПВС	1,06
Серицин	0,11

Силу адгезии, приходящуюся на одно волокно, рассчитаем по формуле

$$F_A=0,25\cdot\pi\cdot d\cdot l\cdot F_У \quad (1)$$

где d – условный диаметр волокна,

l – средняя длина элементарных волокон,

F_y – удельная сила адгезии

Величины d и l принимались на основе справочных данных [5, 6]. В формуле (1) учтено, что при разрыве пряжи длина скольжения волокон равна четверти их длины [3].

Для расчета разрывной нагрузки элементарных волокон воспользуемся справочными данными из [5, 6], где приведены сведения об относительной разрывной нагрузке p и линейной плотности $T_в$ волокон льна и хлопка. Расчет проведем по формуле

$$F=pT_в \quad (2)$$

Данные расчетов при использовании в качестве связующего серицина, сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчет силы адгезии на одно волокно

Вид волокна	Сила адгезии на одно волокно, сН	Относительная разрывная нагрузка волокна, сН/Текс	Разрывная нагрузка элементарного волокна, сН
Чесаное льняное волокно	2,5-16,5	50 – 70	6,25 – 38
Льняной очес	1,95-7,5	30 – 50	3,75 – 27
Хлопок	3,75-8,5	20 – 30	3 – 4,4

Из таблицы 2 видно, что силы адгезии и разрывная нагрузка одного элементарного волокна представляют собой величины одного порядка. Учитывая, что входящие в формулы (1) и (2) величины имеют ярко выраженный случайный характер можно утверждать, что прочность пряжи, полученной клеевым способом будет обеспечиваться как за счет прочности волокон, так и за счет прочности связующего.

Для дальнейших исследований процесса получения пряжи клеевым способом целесообразно в качестве связующего использовать серицин с концентрацией 6%. Растворы ПВА и ПВС можно использовать с меньшими концентрациями. При этом необходимо учитывать тот факт, что связующие на основе указанных соединений ухудшают гигиенические свойства тканей и требуют дополнительной обработки их при отделке.

Выводы

Проведено экспериментальное исследование зависимости сил адгезии клеевых растворов ПВА, ПВС и серицина к целлюлозным материалам. Предложена модель зависимости сил адгезии от концентрации клеящего вещества. На основе сравнительного анализа полученных экспериментальных значений сделан вывод о возможности применения серицина в качестве связующего при производстве пряжи клеевым способом.

Список литературы

1. Рудовский П.Н., Белова И.С. Технология получения льняной пряжи путем совмещения вьюркового способа со способом PAVENA. В сборнике: Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование. сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина» на Международном Косыгинском Форуме-2019 «Современные задачи инженерных наук». 2019. С. 194–196.

2. Рудовский П.Н., Белова И.С. Анализ и перспективы клеевых способов формирования пряжи. Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). 2019. № 1–1. С. 186–189.

3. Ишматов А.Б., Рудовский П.Н., Яминова З.А. Применение серицина для шлихтования основ. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2012. № 6 (342). С. 98 – 102.

4. Белова И.С. Обоснование метода оценки адгезии волокнистых материалов к связующему при выработке пряжи клеевым способом. Технологии и качество. 2019, – №4, с.3-6. DOI 10.34216/2587-6147-2019-4-46-3-7

5. Прядение льна и химических волокон: справочник/под. Ред Л.Б.Карякина, Л.Н.Гинзбурга. М.: Легпромбытиздат. 1991. –544 с.

6. Справочник по хлопкопрядению/ Широков В.П. и др. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1985, – 472 с.

УДК 621.81:621.791 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-374-378

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ НА УЧАСТКАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ШТАМПОСВАРНЫХ ТРОЙНИКОВ
IMPROVING THE PIPELINE SYSTEMS OPERATIONAL SAFETY IN THE STAMPED-WELDED TEES AREAS

Шарафиев Роберт Гарафиевич[*], Ерофеев Валерий Владимирович[*,], Игнатьев Андрей Геннадьевич[***], Ирина Трояновская Павловна[**,***] Гильманшин Рустем Альбертович[*], Ерофеев Сергей Валерьевич[****]**

Robert G. Sharafiev[*], Valery V. Erofeev[*,], Andrey G. Ignatiev[***], Irina P. Troyanovskaya[**,***] Rustem A. Gilmanshin[*], Sergey V. Erofeev[****]**

**Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Уфа*
***Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa*
(e-mail: ervv52@mail.ru)
***Южно-Уральский государственный аграрный университет, Россия, Троицк*
*** South Ural State Agrarian University, Russia, Troitsk*
(e-mail: ervv52@mail.ru)
****Южно-Уральский государственный университет, Россия, Челябинск*
**** South Ural State University, Russia, Chelyabinsk*
(e-mail: ignat74@bk.ru)
*****ООО «НПП Плазмотрон»», Россия, Челябинск*
*****LLC Research and Production Enterprise "Plazmotron", Russia, Chelyabinsk*

Аннотация: Предложена методика расчетного определения диапазона давлений опрессовки штампосварных тройников. Применение методики позволяет на стадии заключительного контроля сварных трубных изделий произвести полное снятие остаточных сварочных напряжений путем пластического деформирования металла в зонах максимальной концентрации напряжений вблизи сварных соединений. Результатом этой процедуры является повышение долговечности и рабочего ресурса трубопроводных систем.

Abstract: A method for calculating the range of crimping stamped-welded tees pressures is proposed. The application of this technique at the stage of welded pipes final inspection allows to completely removing residual welding stresses by metal plastic deformation in the maximum stress concentration zones near the welded joints. The result of this procedure is increasing the pipeline systems durability and working resource.

Ключевые слова: штампосварные тройники, остаточные напряжения, давление опрессовки, рабочий ресурс.

Keywords: stamped-welded tees, residual stresses, crimping pressure, working resource.

Одной из основных причин аварий на участках врезки трубопроводных систем является использование сварочных технологий при изготовлении штампосварных тройников

большого диаметра, приводящее к возникновению остаточных сварочных напряжений, а также несовершенство геометрических форм конструкций врезок, вызывающее эффект концентрации напряжений вблизи сварных соединений [1, 2 и др.]. Одним из направлений на пути решения данной проблемы является использование технологических приемов по снятию остаточных сварочных напряжений, позволяющих существенно повысить уровень промышленной безопасности трубопроводных систем.

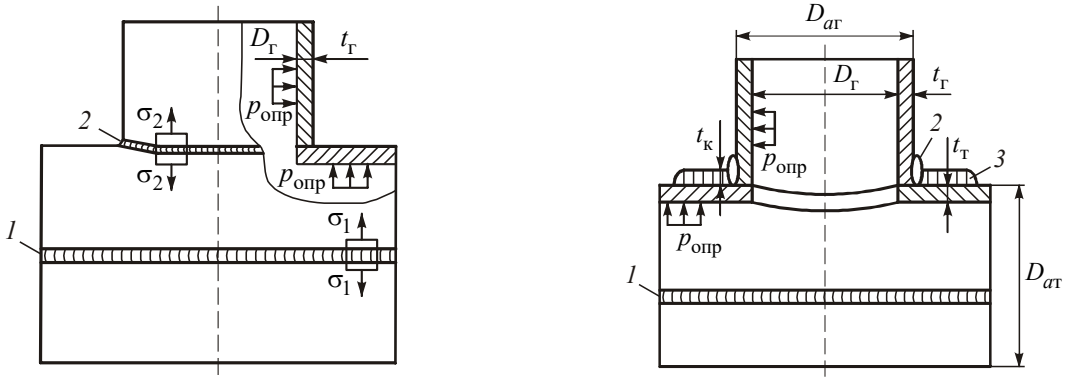
Для снижения нагруженности тройников в процессе их эксплуатации, как правило, используются дополнительные элементы (воротники, косынки, накладки и др.). Однако данные мероприятия приводят к существенному повышению уровня остаточных сварочных напряжений в связи с увеличением объема сварочных работ. В связи с этим на заключительном этапе контроля качества тройников предполагается использование операции редуцирования (опрессовки), которая позволит, с одной стороны, выявить скрытые дефекты, а, с другой стороны, снизить уровень остаточных сварочных напряжений. Следует отметить, что операция опрессовки трубных изделий достаточно полно апробирована для линейных оболочковых конструкций [3] и штампосварных отводов [4], и разработан целый ряд стендов для проведения процесса редуцирования. Определенные трудности возникают при реализации данного процесса для элементов трубопроводов типа тройников, т.к. практически отсутствуют расчетно-экспериментальные подходы по определению режимов опрессовки, гарантирующих снятие остаточных сварочных напряжений.

В середине 80-х годов XX века ИЭС им. Е.О. Патона (г. Киев) было предложено использовать процесс опрессовки электросварных труб большого диаметра для снятия остаточных сварочных напряжений, возникающих в процессе изготовления трубных изделий [3]. Для этих целей использовался механизм снятия остаточных сварочных напряжений за счет эффекта локального пластического деформирования металла кольцевых сварных швов, выполненных из менее прочного присадочного металла. В последнем случае происходит снятие остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ при условии упругого деформирования изделия.

Используя данный подход, в настоящей работе предлагается методика определения режимов опрессовки тройников (рисунок 1), обеспечивающая создание зон локального деформирования металла трубных изделий в результате действия эффекта концентрации напряжений в окрестности сварных соединений (продольных швов тела трубы или в узлах соединения горловины) при упругом нагружении конструкции в целом.

Для количественной оценки эффекта концентрации напряжений использовали величину теоретического коэффициента концентрации K_σ, представляющего собой отношение максимального напряжения в окрестности концентратора σ_{max} к номинальному значению напряжения $\sigma_н$: $K_\sigma = \sigma_{max}/\sigma_н$.

Анализ конструкций тройников, выполненных без усиления стенки (рисунок 1, *а*), свидетельствует о том, что последние изготовляются с применением стыковых сварных соединений *1*, расположенных вдоль магистральной оси и испытывающих напряжения $\sigma_1 = p(R_т/t_т)$, действующие поперек сварного шва ($R_т$ и $t_т$ – соответственно радиус и толщина стенки тела трубы тройника). Горловина тройника соединена с телом трубы стыковым швом *2*, который по отношению к ней является кольцевым, воспринимающим напряжения $\sigma_2 = p(R_г/2t_г)$ ($R_г$ и $t_г$ – соответственно радиус и толщина стенки горловины тройника).



а б

Рисунок 1 – Конструктивные особенности изготовления тройников:
а – без усиления горловины, *б* – с усилением накладным кольцом

Усиленные тройники с накладным кольцом (рисунок 1, *б*) изготовляются с применением стыковых сварных соединений *1*, с кольцевым стыковым швом *2* в месте соединения горловины тройника и тела трубы. Накладное кольцо приваривается к телу тройника с помощью нахлесточного соединения 3.

Концентрация напряжений в области стыковых швов обусловлена геометрическим несовершенством формы шва. В работах [5, 6] приведены различные методики для оценки коэффициента концентрации K_σ в наиболее нагруженных зонах сварных соединений. В частности, для определения K_σ в стыковых сварных соединениях в работе [6] приведена формула В.А. Кархина:

$$K_{\sigma г} = 1 + \frac{1}{\sqrt{\rho\left(\frac{14}{B} + \frac{1,7}{C} + \frac{5}{t}\right)}}, \quad (1)$$

где ρ, B, C и t – геометрические параметры сварного стыкового соединения (рисунок 2).

Для оценки коэффициента $K_{\sigma н}$ в наиболее нагруженных точках нахлесточных соединений (точках A), можно воспользоваться соотношением Г.П. Турмана [6]:

$$K_{\sigma н} = 1 + 0,2\sqrt{2t - \frac{K}{\rho^A}}, \quad (2)$$

где K – катет углового шва, $K = t_к$; ρ^A – радиус в месте перехода от шва к угловому шву (в точке A на рисунке 3).

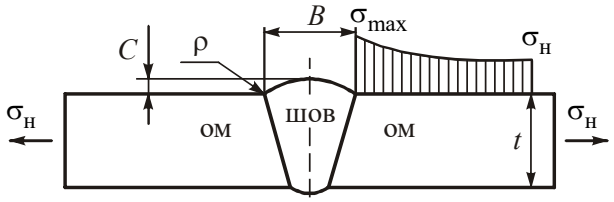


Рисунок 2 – Распределение напряжений в стыковом соединении

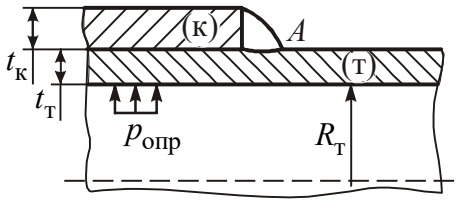


Рисунок 3 – Нахлесточное соединение, используемое для монтажа укрепляющего кольца (к) у горловины тройника

Для рассматриваемых тройников в связи с резким переходом от тела трубы к горловине возникает дополнительный эффект концентрации напряжений, который учитывается коэффициентом концентрации напряжений $K_{\sigma д}$. В [7] рассмотрена методика определения $K_{\sigma д}$, основанная на следующих соотношениях:

$$D_{a\text{г}} / D_{a\text{т}} > 0,5, \;\; K_{\sigma\text{д}} = \frac{1,35}{w^{2/3} w_p}, \tag{3}$$

$$D_{a\text{г}} / D_{a\text{т}} < 0,5, \;\; K_{\sigma\text{д}} = \frac{0,9}{w^{2/3} w_p}, \tag{4}$$

где w_p – параметр, определяющийся давлением опрессовки $p_{\text{опр}}$, модулем упругости $E_\text{т}$ и конструктивными размерами тела тройника ($D_{a\text{т}}$, $t_\text{т}$),

$$w_p = 1 + 3,25 \frac{p_{\text{опр}}}{E_\text{т}} \left(\frac{D_{a\text{т}} - t_\text{т}}{2t_\text{т}} \right)^{5/2}; \tag{5}$$

w – параметр, зависящий от геометрических размеров тела тройника без усиления ($D_{a\text{т}}$, $t_\text{т}$) (рисунок 1, *а*) или от геометрических размеров тела тройника с усилением и толщины накладного кольца ($D_{a\text{т}}$, $t_\text{т}$, $t_\text{к}$) (рисунок 1, *б*).

Для тройника без усиления:

$$w = \frac{2t_\text{т}}{D_{a\text{т}} - t_\text{т}}, \tag{6}$$

для тройника с усилением накладным кольцом:

$$w = \frac{2(t_\text{т} + 0,5t_\text{к})^{5/2}}{t_\text{т}^{3/2}(D_{a\text{т}} - t_\text{т})}. \tag{7}$$

Концентрация напряжений, обусловленная совместным взаимовлиянием концентраторов напряжений (сварного шва, нахлесточного соединения, перехода от горловины к телу трубы), определяется следующей зависимостью [7]:
для тройников без усиления

$$K_\sigma = K_{\sigma\text{г}}, \tag{8}$$

для тройников с усиливающими накладками (кольцом)

$$K_\sigma = K_{\sigma\text{г}} K_{\sigma\text{п}} K_{\sigma\text{д}}. \tag{9}$$

Как видно, концентрация напряжений в сварном узле горловины тройников существенно выше, чем в продольных швах тройников, и в значительной мере зависит от отношения диаметров горловины и тела трубы $D_{a\text{г}}/D_{a\text{т}}$, толщины накладного кольца $t_\text{к}$, катета углового шва нахлесточного соединения K и радиуса перехода от шва к основному металлу ρ[4].

Для оценки напряжений в зоне концентрации установлена связь между главными напряжениями, действующими поперек сварных соединений, и внутренним давлением в тройнике, выполненном без усиления и с усилением накладками (см. рисунок 1), в процессе его опрессовки. Для продольных сварных соединений *1* и кольцевых соединений *2*, расположенных в теле трубы, данные зависимости имеют вид:

$$\sigma_1 = \sigma_\text{н} = p_{\text{опр}}(R_\text{т} / t_\text{т}), \tag{10}$$

$$\sigma_2 = \sigma_\text{н} = p_{\text{опр}}(R_\text{г} / 2t_\text{г}). \tag{11}$$

Максимальные напряжения $\sigma_{1\max}$ и $\sigma_{2\max}$ в зоне концентрации для рассматриваемого тройника с учетом соотношений (10) и (11) определяются следующими выражениями:

$$\sigma_{1\max} = p_{\text{опр}}(R_\text{т} / t_\text{т}) K_{\sigma\text{г}}, \tag{12}$$

$$\sigma_{2\max} = p_{\text{опр}}(R_\text{г} / 2t_\text{г}) K_{\sigma\text{г}} K_{\sigma\text{д}}. \tag{13}$$

При наличии усиливающих элементов (например, кольца) (см. рисунок 1, *б*) концентрация напряжений в зоне перехода от продольного заводского шва *1* к основному металлу практически не изменяется, т.к. данный шов расположен достаточно далеко за пределами влияния на него узла горловины. Поэтому максимальные напряжения $\sigma_{1\max}$ вблизи сварного шва *1* будут определяться тем же самым соотношением (12).

Максимальные напряжения в зоне узла горловины, усиленной накладкой (кольцом) (см. рисунок 1, *б*), определяются коэффициентом концентрации напряжений K_{σ}, который в соответствии с (9) представляет собой произведение составляющих величин $K_{\sigma г}$, $K_{\sigma п}$ и $K_{\sigma н}$:

$$\sigma_{2\max} = p_{опр}(R_г / 2t_г)K_{\sigma г}K_{\sigma п}K_{\sigma н}. \quad (14)$$

При разработке расчетной методики для оценки параметров опрессовки штампосварных тройников необходимо учесть некоторые особенности деформирования рассматриваемых трубных узлов. В частности, основным условием при определении режимов опрессовки трубных изделий (труб, отводов, тройников и т.п.) является выбор давлений опрессовки $p_{опр}$, которые в зонах концентрации напряжений, с одной стороны, гарантировали бы пластическое деформировании металла тела трубы, и с другой стороны, обеспечивали упругое нагружение тела тройника вдали от концентраторов напряжений. Математически данные условия можно представить в следующем виде:

$$p_{пл} < p_{опр} < p_{упр}, \quad (15)$$

где $p_{пл}$ – нижняя граница диапазона давления опрессовки, начиная с которого обеспечивается пластическое деформирование металла тройника в зонах концентраторов напряжений; $p_{упр}$ – верхняя граница диапазона давления, при котором обеспечивается упругое деформирование металла тройника вдали от сварных соединений.

Границы данного диапазона изменения давлений опрессовки, представленного в виде неравенства (15), определяются из следующих условий:

$$\max\begin{cases}\sigma_т t_т / K_{\sigma г}R_т \\ 2\sigma_т t_т / K_{\sigma г}K_{\sigma п}K_{\sigma н}R_т\end{cases} < p_{опр} < \min\begin{cases}(\sigma_т t_т / R_т)/(1-0{,}5\mu) \\ (\sigma_т t_г / R_т)/(1-0{,}5\mu)\end{cases} \quad (16)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование напряженного состояния сварных тройниковых соединений действующих нефтепродуктопроводов / В.В. Ерофеев [и др.] // Проблемы сбора, подготовки, транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. № 2. С. 91-103.

2. Определение рабочего ресурса сварных соединительных узлов магистральных трубопроводов по данным диагностики их технического состояния / В.В. Ерофеев [и др.] // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2017. № 2. С. 37-39.

3. *Нетребский М.А.* Определение давления опрессовки сосудов высокого давления с мягкими кольцевыми швами // Многослойные сварные конструкции и трубы : матер. 1 всесоюзн. конф. Киев : Наукова думка, 1984. С. 85-91.

4. Разработка гидравлического стенда для опрессовки штампосварных отводов / С.В. Ерофеев [и др.] // Интеллектика, логистика, системология: сб. науч. трудов. Челябинск : ЦНТИ,ЧНЦ РАЕН, 2003. Вып. 12. С. 25-29.

5. Особенности разрушения материалов нефтегазопроводов / А.Г. Гареев [и др.]. Уфа : Гилем, 2006. 156 с.

6. *Турмов Г.П.* Определение коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях // Автоматическая сварка. 1976. № 10. С. 14-17.

7. РД 10-400-01. Нормы расчета на прочность трубопроводов тепловых сетей. М. : ГУП Промышленная безопасность, 2001.

УДК 504.062 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-379-381

АНАЛИЗ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ НЕФТЕЗАГРАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВ
ANALYSIS OF GAS EMISSIONS IN THE ELECTROCHEMICAL CLEANING OF OIL-CONTAMINATED SOILS

Шулаев Николай Сергеевич, Пряничникова Валерия Валерьевна, Кадыров Рамиль Римович, Овсянникова Инна Вячеславовна
Nikolay S. Shulaev, Valeria V. Pryanichnikova, Ramil R. Kadyrov, Inna V. Ovsyannikova

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г.Стерлитамаке, Россия, Стерлитамак
Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa State Petroleum Technological University in Sterlitamak City, Russia, Sterlitamak
(e-mail: prvaleria@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрен высокоэффективный процесс электрохимической очистки грунта, загрязненного нефтепродуктами и пластовыми водами и приведены результаты анализа газообразных веществ, образующихся в процессе обработки.

Abstract: The highly efficient process of electrochemical cleaning of soil contaminated with oil products and formation waters is considered, the results of the analysis of gaseous substances formed during processing are presented.

Ключевые слова: электрический ток, почва, газовые выбросы, электрохимическая очистка, нефтепродукты

Keywords: electric current, soil, gas emissions, electrochemical cleaning, oil products

Существуют различные способы очистки грунтов, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Каждый из них обладает своими особенностями, которые необходимо учитывать при реализации на практике. Электрохимический метод очистки нефтезагрязненного грунта применяется in situ и заключается в общем случае в погружении в почвенный массив электродов, подключенных к источнику питания, и пропускании через загрязненную среду электрического тока малой величины [1]. Данная технология обладает широким рядом преимуществ, среди которых мобильность, возможность очистки глинистых грунтов, значительная глубина обработки, сочетание с очисткой подземных вод. К аспектам, которые следует принимать во внимание, относится в первую очередь сложность протекающих в почвенной среде физико-химических реакций и возможность образования их газообразных продуктов [2].

Электроиндуцируемые процессы, как правило, обобщенно делятся на две группы: электрокинетические и электроокислительные [3]. Почвенная среда вместе с поровыми растворами может рассматриваться как электрохимическая ячейка, в которой происходят реакции окисления и восстановления, приводящие к частичному или полному электрохимическому окислению загрязняющих веществ [4]. В результате электролиза порового раствора грунтов и подземных вод образуется газовая фаза, которая окисляет органические загрязнители. В процессах окисления органических веществ могут участвовать кислород, газообразный хлор, озон, перекись водорода и гидроксильные радикалы, образующихся в разных зонах между электродами [5].

Один из вариантов разложения углеводородов нефти - последовательное образование альдегидов, карбоновых кислот и CO_2 [6]. Возможно и образование разнообразных побочных продуктов, в т.ч. обладающих высокой токсичностью. Точно предсказать состав продуктов электроокисления не представляется возможным, т.к. их образование зависит не только от электрокинетических процессов, но и от сложных геохимических реакций. В связи с этим

актуальным является изучение образования возможных газообразных выбросов при проведении электрохимической очистки грунтов, которое позволит принять соответствующие превентивные меры по защите атмосферного воздуха.

Для исследования состава газовых выбросов при эксплуатации установки электрохимической очистки в лабораторных условиях использовался модельный грунт. Грунт замешивался на основе чернозема, в который вносили нефть (11,36 мл на 1 кг грунта) и пластовые воды (404 мл/кг). Последние содержали в своем составе NaCl – 86 г/л, $CaCl_2$ – 10,5 г/л, $MgCl_2$ – 5,2 г/л, Na_2SO_4 – 4 г/л, $NaHCO_3$ – 0,4 г/л.

Обработка модельного грунта проводилась в закрытой электрохимической ячейке, оснащенной газоотводными трубками, присоединяемыми к газоанализатору. При проведении анализа использовалось несколько методов, среди них: фотоионизационные; электрохимический; инфракрасный. При очистке в почву погружались графитовые электроды и подавался ток силой 0,1А (т.е. создавались условия, способствующие активизации не только электрокинетических, но и электроокислительных процессов в межэлектродном массиве). Время одного цикла обработки составляло 120 мин.

Состав выделяющихся газов приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав газов, выделяемых при проведении электрохимической обработки.

Наименование вещества	Концентрация, мг/м3	Наименование вещества	Концентрация, мг/м3
Хлор	12,2	Пропан, бутан	2429
Углекислый газ	0,3	Пропанол	165
Аммиак	165	Пропилен	549
Ацетон	160	Тетрахлоридэтилен	55
Углеводороды С5-С11 (бензиновая фракция)	153	Толуол	330
Сероводород	220	Трихлоридэтилен	55
Бензол	66	Циклогексан	648
Бутанол	165	Циклогексанон	66
Бутилацетат	440	Этанол	2263
Винилхлорид	165	Этилацетат	440
Диметилформалид	110	Этилбензол	323
Изобутилен	330	Этилен	549
Углеводороды С12-С16 (керасиновая фракция)	542	Метиил-трет-бутиловый эфир	439
Ксилол	209	Этан	0,08
Метилэтилкетон	294	Оксид азота	55
Метан	0,06		

Выводы

Проведенные исследования показали, что при электрохимической обработке грунта, содержащего нефтепродукты и пластовые воды, в выбросах преобладают различные группы углеводородов, в том числе хлорсодержащие, молекулярный хлор, аммиак, углекислый газ. Многие из веществ обладают высокой токсичностью. Следует отметить, что данная тема требует дальнейших, более детальных исследований, однако уже на данном этапе можно сделать заключение о необходимости использования систем сбора газовых выбросов при эксплуатации электрохимических установок в полевых условиях на грунтах со значительным загрязнением.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-24041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р., Быковский Н.А., Овсянникова И.В. Воздействие электрического тока на почвы, загрязненные нефтепродуктами / Бутлеровские сообщения. 2020. Т. 61. № 2. С. 132-138.
2. Meshalkin V.P., Shulaev N.S., Chelnokov V.V., Pryanichnikova V.V. and Kadyrov R.R. Determination of electrical parameters for the electrochemical treatment of soils contaminated with oil / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 537 (062069).
3. Королев В.А. Очистка грунтов от загрязнений. М.: МАИК Наука/интерпериодика, 2001. 365 с.
4. Bashir M.J.K., Isa M.H., Skutty R.M., Awang Z.B. Landfill leachate treatment by electrochemical oxidation / Waste Management. 2009. № 29. P. 2534-2541.
5. Ferrarese E.G., Andreottola G. Application Of Electrochemical Techniques For The Remediation Of Soils Contaminated With Organic Pollutants / Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy. 2010. № 13.
6. Rahner D., Ludwig G., Rohrs J. Electrochemically induced reactions in soils - a new approach to the in-situ remediation of contaminated soils. Part 1: The microconductor principle / Electrochim. Acta. 2002. № 47. P. 1395-1403.

УДК 697.343 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-381-383

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
AUTOMATION OF HEAT SUPPLY

Первак Галина Ивановна
Galina I. Pervak

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

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности работы автоматизированных и неавтоматизированных систем теплоснабжения в целом и её отдельных элементов.

Abstract: Some features of the work of automated and non-automated heat supply systems in general and its individual elements are considered.

Ключевые слова: автоматизация, теплоснабжение, регулирование, давление, температура, сигнал, диспетчеризация, приборы, неисправности, преобразователи.

Key words: automation, heat supply, regulation, pressure, temperature, signal, dispatching, devices, malfunctions, converters.

Система автоматизации теплоснабжения объектов предназначена для автоматического регулирования температуры горячей воды в системе отопления в зависимости от температуры наружного воздуха, поддержания заданного давления воды в трубопроводе. Система автоматического управления и регулирования обеспечивает непрерывное измерение параметров СТС, автоматическое регулирование температуры сетевой воды в подающем трубопроводе. Автоматизированный расчет температуры сетевой воды в подающем трубопроводе производится на основе данных о температуре наружного воздуха, поддержания заданного давления в тепловой сети. Диспетчеризация сигнала «АВАРИЯ» осуществляется при выходе параметров СТС за предельные значения и при неисправностях в измерительных приборах и преобразователях, информация о работе СТС передается на диспетчерский пульт. Система управления и регулирования может работать в автоматическом и ручном режиме. Управление сетевыми, подпиточными, циркуляционными, дренажными, пожарными насосами возможно ручным управлением и управлением с помощью автоматизированной задвижкой. В автоматическом режиме управление СТС осуществляется программируемым

контроллером SIM фирмы SIEMENS. Он осуществляет поддержание заданной температуры сетевой воды, управляя клапаном, и поддержание заданного давления в тепловой сети, управляя насосами подпитки. Использование программируемого контроллера позволяет упростить и удешевить схему автоматики и тем самым повысить её надежность, что позволит обмениваться информацией с единым диспетчерским пультом СТС. Визуализация технологических процессов СТС осуществляется с помощью панели оператора, переключателей и индикаторных ламп. В режиме управления сетевыми, подпиточными насосами с щита ручного управления ориентируются на показания визуальных датчиков и измерительных приборов, что помогает осуществлять включение и выключение насосов. На диспетчерском пульте имеется возможность задания температуры сетевой воды в подающем и обратном трубопроводе для автоматического регулирования [1]. Для измерения давления в прямом и обратном трубопроводе применяются датчики давления. Диапазон измерения 0-10 bar. Датчики имеют токовый выход 4-20 mA. Для измерения расхода воды в подающем и обратном трубопроводах, применяются электромагнитные SITRANS FM фирмы SIMENS, они позволяют измерять мгновенные и за определенный период времени показания. Для измерения температур используются термопреобразователи сопротивления РТ 100. В автоматическом режиме управления СТС осуществляется промышленным контроллером SIMATIS 57-2. Для перехода в автоматический режим управления насосами необходимо перевести переключатели управления насосами в положение «автоматический». Система контролирует давление в обратном трубопроводе по показаниям датчика давления и ниже установленного уровня, управляющая программа включает насос подпитки. При достижении давления насос подпитки отключается. Оператор имеет возможность с панели оператора или диспетчерского пульта изменять следующие параметры: давление в обратном трубопроводе, при котором включаются (выключаются) насосы подпитки, режим сетевых (подпиточных) насосов (основной, резервный) отключен. Переход в автоматический режим осуществляется переводом переключателя на шкафу управления положением «Автомат». Ручной режим управления насосами со щита управления насосами предназначен только для проверки работоспособности всех насосов и для управления оператора в случае выхода из строя управляющего контроллера. В ручном режиме оператор определяет параметры СТС по визуальным датчикам и со щита ручного насосами осуществляется поддержание системы в рабочем состоянии. Переход в ручном режиме осуществляется переводом переключателя на шкафу управления насосами «Ручной». Включение любого из насосов осуществляется нажатием соответствующей кнопки «ПУСК». Выключение любого из насосов осуществляется нажатием соответствующей кнопки «СТОП». В случае аварии насоса (выключился автомат) зажигается красная лампа, соответствующая неисправности. Лампа «Питание вкл» светится всегда, когда включено питание СТС.

Автоматический режим поддержания температуры основан на использовании встроенного в контур регулятора. Входным параметром регулятора являются температуры в подающем трубопроводе и температура наружного воздуха. На диспетчерском пульте имеется возможность переключения между следующими вариантами температуры: задание температуры сетевой воды в подающем трубопроводе в соответствии с переменной температурой наружного воздуха [1]. Переход в автоматический режим осуществляется переводом переключателя на шкафу управления в положение «Автомат». В ручном режиме оператор определяет параметры СТС по визуальным датчикам и со щита управления. Переход в ручной режим осуществляется переводом переключателя из положения «Автомат» в положение «Ручной». В режиме управления со щита ручного управления работы можно регулировать температуру только вручную – открывая и закрывая задвижку кнопками «открыть» и «закрыть». С диспетчерского пульта можно установить следующие параметры СТС: задание температуры и давления в подающем трубопроводе, информацию об авариях и режимах работы СТС в целом.

Автоматика регулирования обеспечивает автоматический режим работы СТС в заданных пределах и включает в себя приборы визуального контроля, датчики ДТ-2,

электронные регулирующие приборы Р-25, регулирующие и сигнализирующие приборы ТПГ-СК-150, температурный мост М-4, КСД-2. При измерении температуры наружного воздуха задатчиком на регуляторе топлива Р-25-газ устанавливается выбранный режим. Регулирующая заслонка, установленная на газопроводе, изменяет подачу газа на котел. Регулятор воздуха Р-25-воздух автоматически изменит подачу воздуха на горение, за счет изменения положения заслонок направляющего аппарата вентилятора, т.е. работа регуляторов Р-25-газ и Р-25-воздух согласованы между собой через датчики и поддерживают нужное, ранее установленное соотношение «газ-воздух». При изменении подачи газа и воздуха в топку котла, изменится и разряжение в топке при изменении нагрузки на котел. Приборы визуального и регистрирующего контроля подтверждают оператору выбранный режим работы. Автоматика безопасности служит для отключения подачи топлива в котел, в случае нарушения режима горения. В автоматику безопасности входят тягонапоромеры МП-51 для визуального наблюдения за давлением газа, воздуха и разряжения в топке. Приборы КСД-2 для контроля, датчики температуры воды на выходе из котла, температуры уходящих газов. Приборы ДНТ и ДН (датчики) для контроля давления воздуха, газа и разряжения в топке, ЭКМ – электроконтактные манометры (датчики) для контроля минимального и максимального давления воды на выходе из котла, в щите управления котлом установлены реле автоматики безопасности ПСД-2 (расход воды через котел). Рассмотрим параметры срабатывания автоматики безопасности: газ (макс) – 0,25 кгс/см^2, газ (мин) – 0,05 кгс/см^2, воздух – 25 мм вод. ст., разрежение – 0,5 мм вод. ст., давление на выходе воды из котла (макс) – 12 атм, давление на выходе из котла (мин) – 6 атм, расход воды через котел менее 350 м^3/час. Отключающим органом подачи газа на котел является ПКВ (предохранительный контрольный клапан высокого давления). Когда все параметры выбраны, т.е. построены по нужным пределам, срабатывает электромагнит ПКВ и оператор устанавливает ПКВ. При нарушении какого-либо параметра датчик (микровыключатель) размыкает контакты и размыкает электрическую сеть автоматики безопасности. Электромагнит обесточивается, срабатывает ПКВ и через рычаг закрывается клапан ПКВ, т.е. отключается подача газа на котел.

Модульный тепловой пункт укомплектован теплообменным, насосным оборудованием контрольно-измерительными приборами, автоматикой регулирования и поддержания заданных параметров сетевой воды, приборами учета тепловой энергии и теплоносителя. Рассмотрим процессы, которые выполняются и контролируются автоматикой: автоматическое поддержание графика температуры сетевой воды с учетом температуры наружного воздуха, автоматический и ручной режимы управления агрегатами и устройствами, автоматическое управление циркуляционными насосами, автоматический контроль и индикация возникающих внештатных ситуаций, оптимизация теплопотребления объекта путем задания графика отопления, поддержание и сохранность работоспособности при критических и аварийных режимах работы СТС. Нужно стремиться к обеспечению снижения потерь тепла, капиталовложений, аварийности при организации системы ГВС и возможности оплачивать только фактическое потребление при установке приборов учета тепла [1].

Вывод: Разница в автоматизированных и неавтоматизированных СТС значительная. Автоматизированные СТС не требуют большого ухода. В них за всеми тепловыми процессами следит автоматика, а в неавтоматизированных должен находится оператор. При установке автоматизированных блочных тепловых пунктов нет необходимости установки центрального теплового пункта, что позволяет улучшить режим работы тепловой сети, повышает эффективность работы систем автоматического регулирования и контроля. Возможные утечки в сети потребителя не приводят к расходу обработанной и обескислороженной (дорогой) сетевой воды. Автоматика может справляться с работой без участия человека, т.к. есть связь с диспетчерским пунктом СТС. Любое изменение или сбой работы мгновенно фиксируется и на место аварии выезжает ремонтная бригада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е.Я. Соколов Теплофикация тепловые сети.- М. Издательство МЭИ, 2001 г., 7-е изд.

УДК 504.064.4: 658.567 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-384-386

ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ИЗ ГАЛЬВАНОШЛАМОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ ELECTROCHEMICAL REMOVAL OF METALS FROM GALVANIC SLUDGES

Ольшанская Любовь Николаевна, Лазарева Елена Николаевна
Lyubov N. Olshanskaya, Elena N. Lazareva

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia
(e-mail: ecos123@mail.ru, ms.elena.lazareva@list.ru)

Аннотация: Рассмотрены экологические проблемы образования и накопления гальванических шламов и основные направления их утилизации. Предложен способ извлечения металлического никеля из гальваношлама электрохимическим методом в потенциостатическом режиме. Обоснована экологическая и экономическая эффективность процесса.

Abstract: The ecological problems of the formation and accumulation of galvanic sludge and the main directions of their utilization are considered. A method for extracting metallic nickel from galvanic sludge by electrochemical method in potentiostatic mode is proposed. The ecological and economic efficiency of the process has been substantiated.

Ключевые слова: гальваношламы, электрохимическая обработка, потенциостатический режим, извлечение, металлический никель

Key words: galvanic sludge, electrochemical treatment, potentiostatic mode, extraction, metallic nickel.

Ежегодно на промплощадках и в шламонакопителях накапливаются тысячи тонн гальванических шламов (ГШ) производств. Они не только занимают полезные площади, но и загрязняют почвенный покров, поверхностные и подземные воды в результате вымывания токсичных компонентов под воздействием осадков. Их экологическая опасность обусловлена тем, что образующиеся отходы относятся к 3-му классу опасности, и содержат ионы тяжелых металлов (Pb^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Ni^{2+}, Zn^{2+} и др.), обладающие высокими токсичными, канцерогенными и мутагенными свойствами. Период полуудаления металлов из почв составляет: для цинка ~ 500 лет, кадмия ~ 1100 лет, меди ~ 1500 лет, свинца до нескольких тысяч лет [1]. Попадая с водой и продуктами питания в организм человека, ТМ не только влияют на здоровье человека, но и разрушают генофонд. Вместе с тем при нахождении эффективного способа утилизации металлов, входящих в состав гальванических шламов, они могут служить источником для получения ценных материалов, которые могут найти широкое применение.

В настоящее время утилизация шламов гальванических производств в России развивается в основном по трем направлениям [1-3]:

1. извлечение металлов пирометаллургическим или гидрометаллургическим способами. Однако данное направление не находит широкого применения по причинам высокой энергоёмкости, образования большого количества отходов и непригодностью для утилизации многокомпонентных смесей;

2. применение для изготовления керамических красок, пигментов, огнеупоров. Данное направление находит применение для моношламов с высоким содержанием гидроокисей отдельных металлов;

3. использование методов химической фиксации тяжёлых металлов для уменьшения экологической опасности. Данное направление является перспективным в случае утилизации большого количества гальваношламов различного состава для многих предприятий.

Нами проведено извлечение из никельсодержащего ГШ ОАО «Роберт - Бош - Саратов» (рис.1) **металлического никеля** электрохимическим методом. Исходный ГШ на первом этапе растворяли в воде, затем добавляли серную кислоту и после тщательного перемешивания полученный раствор отделяли фильтрованием от твердого осадка. Отфильтрованный раствор, содержащий сульфаты металлов, использовали для выделения никеля. **Извлечение никеля проводили в потенциостатических условиях при потенциале катодного выделения никеля (Ер=250 мВ [4]) и** комнатной температуре. Рабочим и вспомогательным электродами служили графитовые стержни, электродом сравнения - нормальный водный хлорсеребряный электрод ЭВЛ-1М в 1М растворе KCl (Е хсэ=223 мВ [4]).

Для определения потенциала выделения никеля снимали потенциодинамическую кривую (ПДК) со скоростью развертки катодного потенциала 20 мВ/с (рис. 2). На ПДК j,E - кривых обнаружены характеристические пики, которые позволили выбрать необходимый интервал потенциалов для выделения никеля из раствора (рис. 2). Резкое снижение плотности тока от 9 до 6,5 мА/см^2 в начальный момент времени может быть связано с процессами разрушения сольватокомплексов Ni^{2+} с компонентами электролита. В области потенциалов -470 ÷ -520 мВ (относительно хсэ) наблюдается пик тока характерный для присутствия катионов Ni^{2+} в растворе электролита в несольватированном виде. На следующем отрезке снижение скорости процесса указывает на обеднение раствора ионами никеля, а отрицательнее -800 мВ протекает процесс разложения воды с выделением на катоде водорода (пузырьки газа наблюдали визуально).

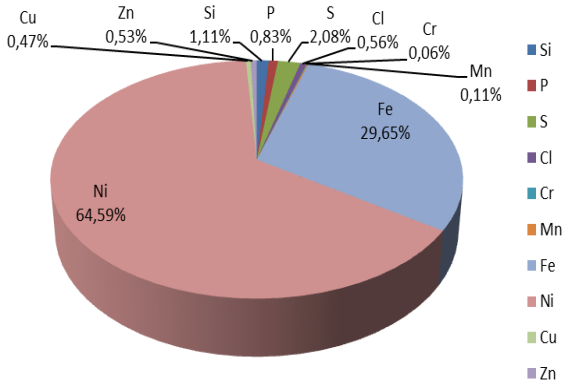


Рисунок 1 – Компоненты исходного ГШ ОАО «Роберт-Бош-Саратов»

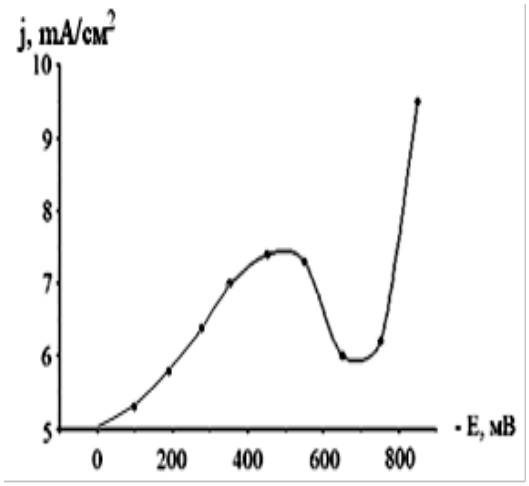


Рисунок 2 - ПДК i,E – кривые на графитовом электроде в растворе $NiSO_4$ (ГШ)

Равновесный потенциал, характеризующий процесс выделения никеля на катоде в соответствии с реакцией:

$$Ni^{2+}+2e^{-}=Ni \quad (1)$$

составляет - 250 мВ [4], а относительно хлорсеребряного электрода сравнения эта величина равна -473 мВ. То есть пик тока в области потенциалов -470÷-520 мВ, указывает на наличие катионов Ni^{2+} в объеме раствора. Анализа ПДК позволил выбрать диапазон потенциалов выделения никеля от -400 мВ до -500 мВ. Проведенная серия экспериментов по извлечению никеля в потенциостатическом режиме при потенциалах катодной поляризации -$E_{кп}$., мВ: 400; 425, 450; 473; 500 на графитовом электроде позволила оценить количественные характеристики процесса. Путем интегрирования площадей под j-t кривыми при различных -$E_{кп}$ определяли суммарное количество электричества, затраченное на выделение никеля при каждом потенциале [5, 6]:

$$Q = \Sigma (\Delta j \bullet \Delta t), (мА \bullet ч) \quad (2)$$

где j- плотность тока, мА/см^2; t -время, затраченное на выделение никеля, часы.

Определив количество электричества, по закону М. Фарадея определяли массу выделившегося на катоде вещества (табл. 1):

$$m = q \bullet Q = q \bullet J \bullet t \text{ (г)} \quad (3)$$

где q=1.095 г/А·ч — электрохимический эквивалент Ni^{2+} [4].

Сравнительный анализ полученных данных показал, что наибольшее количество никеля извлечено при потенциале Е= - 473 мВ.

Таблица 1 – Данные по извлечению никеля (пересчет на 1 тонну) ГШ ОАО «Роберт–Бош–Саратов» при различных потенциалах катодной поляризации и весовым методом

$E_{к.п.}$, мВ	400	425	450	473	500
$m_{Ni,}$ кг	15,4	21,3	27,2	92,4	25,1
m_{Ni} весовой, кг	15,2	21,6	27,4	92,1	24,7

Экономическое обоснование

Согласно котировке «СЕТТЛМЕНТ» цветных металлов на лондонской бирже металлов среднемесячные цены на никель в 2006 г. составили в долл. США за 1 т металла: ≈ 6773,2 $ [7]. На ОАО «Роберт-Бош-Саратов» за год образуется около ~60 тонн ГШ, что позволяет оценить возможную прибыль предприятия при извлечении и продаже никеля. Если из одной тонны можно извлечь ~ 92,2 кг никеля, то, соответственно, из 60 тонн - 5532 кг. Годовая прибыль при получении и продаже никеля составит около трех миллионов рублей в год (5,532 т•6773,2 $•74 руб. = 2772731,3 руб./год). **Таким образом, проведенные нами исследования показали, что отходы гальванических производств могут успешно использоваться для извлечения металлов и приносить прибыль предприятию.**

Переработка ГШ позволит предприятиям снизить плату за хранение опасных отходов и одновременно с этим будет решен и ряд важных экологических проблем – уменьшение площадей для организации и содержания полигонов и свалок, снижение вредного воздействия гальваношламов на окружающую природную среду и здоровье населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ремнева Т.А., . Волков М.И. Утилизация гальваношламов // Экология и промышленность России.2003. Август. С. 16-17.

2. Марьин В.К., Кузнецов Ю.С., Новокрещенов С.Ю. Опыт утилизации промышленных отходов в Пензенской области // Экология и промышленность России. 2005. Май. С 28-33.

3. Верболь, С.В., Запарий М.М., Козлов В.В. Обезвреживание гальваношламов с выделением металлов // Экология и промышленность России. 2000.-Апрель.- С. 28-29.

4. Рабинович, В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978. 392 с.

5. Галюс З. Теоретические основы электрохимического анализа. М.: Мир, 1974.- 552 с.

6. Флеров, В.Н. Сборник задач по прикладной электрохимии: учеб. пособие для ВУЗов.- М.: Высшая школа, 1976.- 291 с.

7. Рынок никеля. Мировой рынок никеля [Электронный ресурс] Globfin/info/nickmkt.htm (Дата обращения март 2021 г.).

УДК 621.7.044.4 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-387-391

ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ СВЧ-ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ
ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MICROWAVE RECYCLING OF OIL-WASTE

Абдеев Эльдар Ринатович[*,], Саитов Раиль Идиятович[*], Рукомойников Александр Александрович[*,**], Абдеев Ринат Газизьянович[*], Швецов Михаил Викторович[***]**
Ildar R. Abdeev[*,], Rail I. Saitov[*], Alexsandr A. Rukomoinikov[*,**], Rinat G. Abdeev [*], Mikhail V. Shvetsov[***]**

**Башкирский государственный университет, Россия, Уфа*
**Bashkir state University, Russia, Ufa*
***РХТУ им. Д.И.Менделеева, Россия,Москва*
***D. Mendeleev University, Russia, Moscow*
****ОАО "ТатНИИнефтемаш", Россия, Казань*
**** JSC "TatNIIneftemash", Russia, Kazan*
(e-mail: air@bgutmo.ru)

Аннотация: В статье приводятся результаты разработки энергоресурсоэффективной низкотемпературной техники и технологии СВЧ-переработки углеводородсодержащих отходов. Исследования на разработанной математической модели показали, что при частотах СВЧ-излучения близких к резонансной частоте молекул воды, величины напряженности поля, необходимого для разрушения водонефтяных и нефтеводяных эмульсий, находятся в интервале 2-100 В/м. Благодаря возможности осуществления процесса разделения эмульсий кратковременным (микросекунды) СВЧ-воздействием, данная технология позволяет существенно снизить энергозатраты на переработку нефтешламовых отходов.

Abstract: The results of the development of energy efficiency low-temperature technology for microwave processing of hydrocarbon-containing waste are presented. Studies on a mathematical model showed that at a frequency of microwave radiation equal to the resonant frequency of water molecules, the field strength needed to break the water- oil and oil-water emulsions is 2-100 V/m. Due to short-term (microsecond) processing, this technology will significantly reduce the amount of waste generated.

Ключевые слова: переработка нефтешламов, низкотемпературный процесс, СВЧ-обработка и воздействие, моделирование, энергоресурсоэффективная технология, физико-химические методы.

Keywords: oil sludge processing, low temperature, microwave technology, microwave processing, modeling, energy efficiency technology, physical and chemical methods.

Применяемые в настоящее время способы переработки нефтешламовых отходов, как термические (получение битуминозных остатков путем сжигания), физические (фильтрация, отстаивание, центрифугирование), физико-химические, химические, биологические, при низкой эффективности и дороговизне имеют целый ряд других недостатков,основными из которых являются сжигание полезного вторичного углеводородного сырья с образованием в больших обьемах углекислого газа и других токсичных газов. Существенными недостатками также являются низкая производительность и невозможность применения при низких температурах при переработки труднорассылаиваемых высоковязких нефтешламовых отходов [1]. Кроме того, они не могут использоваться в условиях предприятий нефтегазохимического комплекса, которые являются одними из основных источников образования и накопления нефтешламовых отходов, переработка которых в технологическом потоке переработки, то есть «на месте», могла бы существенно снизить объемы образующихся отходов [2].

В настоящее время одним из перспективных направлений создания энергоэффективных технологий является использование эффектов волнового воздействия, в том числе СВЧ-обработки углеводородных соединений для снижения вязкости при транспортировке, разделения устойчивых эмульсий при первичной переработке нефти, утилизации буровых нефтешламовых отходов и отходов нефтехимического производства. При этом разделение фаз эмульсии происходит, в основном, за счет нагрева [3].

При разработке энергоресурсоэффективной низкотемпературной техники и технологии СВЧ-переработки углеводородсодержащих нефтешламовых отходов нами проведен критический анализ литературы по существующим методам переработки нефтешламов.

Математическим моделированием теоретически обоснована возможность создания процесса низкотемпературной СВЧ- переработки нефтешламовых углеводородсодержащих отходов.

Поисковые экспериментальные работы проводились на установке показанной на рисунке 1.

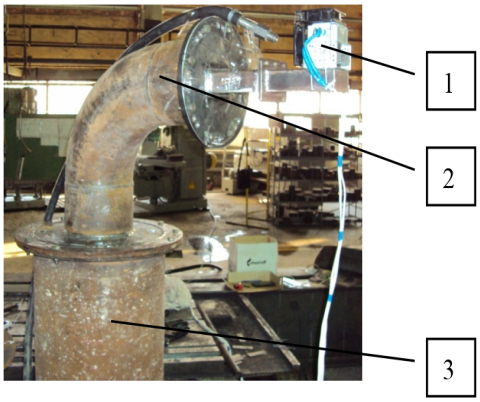


Рисунок 1 - Общий вид экспериментальной установки. 1 – СВЧ-генератор, 2 – антенно-фидерное устройство, 3 – емкость на 40 литров с датчиками температуры.

Не останавливаясь подробно на результатах поисковых экспериментов отметим, что они показали возможность низкотемпературного разделения фаз СВЧ-способом. При определенных параметрах СВЧ-обработки разделение фаз водонефтяных (ВНЭ) и нефтеводяных (НВЭ) эмульсий осуществляется путем превращения электромагнитной энергии в кинетическую энергию связанных молекул в объеме объекта. При этом исключаются трудоемкие промежуточные подготовительные работы, связанные с разогревом промежуточного теплоносителя и его подводом непосредственно к шламонакопителю. Вместе с тем, перед нами встали вопросы о возможности технической реализации разрабатываемого способа, связанные с потерями СВЧ-энергии при передаче по тракту, определением оптимальной частоты излучения, необходимое минимальное время обработки. Для этого нами разработана экспериментальная установка с более широкими возможностями, принципиальная схема которого приведена на рисунке 2.

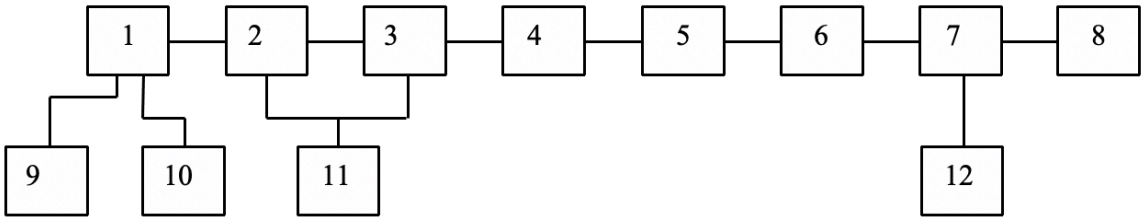


Рисунок 2 - Структурная схема опытно-экспериментальной установки 1 – блок питания СВЧ-генератора, 2 – СВЧ-генератор, 3 – ферритовый вентиль, 4–согласующий элемент волноводного тракта, 6 – волноводный тракт с рупорной антенной, 7– емкость с исследуемыми углеводородсодержащими отходами, 8 – емкость для слива воды, 9 – воздушное охлаждение блока питания СВЧ-генератора, 10 – блок управления генератором, 11 – устройство водяного охлаждения блоков 2 и 3, 12 – датчики температуры отходов.

Опытно-экспериментальная установка разрабатывалась для проверки адекватности математических моделей, описывающих процессы разделения фаз углеводородсодержащих отходов, нагрева больших объемов материала и исследования потерь в волноводном тракте.

Изначально нами проводились эксперименты по нагреву углеводородсодержащих смесей на частоте 2,4 ГГц при мощности 5 кВт с целью проверки адекватности математической модели СВЧ-нагрева нефтяных пластов. При этом нами был отмечен эффект разделения воды и углеводородов. После серии экспериментов из объема 1,8 м^3 углеводородсодержащих отходов с содержанием воды 41 %, было слито 0,32 м^3 воды, что составляет 17,7 % объема. Поскольку используемые в данном эксперименте щелевые и штыревые антенны излучают существенно неоднородно и проникают на глубину 10-12 см, т.е. обработке подвергается менее 0,01 м^3 нагреваемого объема, а средняя температура поднимается на 2 ºС за 2 часа, была выдвинута гипотеза о том, что замеченный нами эффект разделения является синергетическим. Основанием для этой гипотезы является и то, что в неиспользованном в экспериментах объеме углеводородсодержащих отходов, осаждение воды не наблюдалось за время проведения экспериментов в течение 6 месяцев.

Результаты по теоретическим исследованиям опубликованы в [4]. Приведем из данной статьи теоретическое обоснование, затем – первые результаты последних экспериментальных исследований, проведенных на близкой к расчетной частоте СВЧ-излучения. В наиболее общем виде связь между параметрами электромагнитного поля и среды, с которой оно взаимодействует, описываются уравнениями Максвелла [5].

Согласно первому уравнению Максвелла:

$$rotH = J_{cur} + (\partial D/\partial t), \quad (1)$$

где H – мгновенное значение вектора напряженности магнитного поля, А/м, Jcur -мгновенное значение вектора плотности электрического тока смещения, А/м^2, D–мгновенное значение вектора электрического смещения, Кл/м, t – время.

Магнитное поле H в среде возбуждается токами проводимости J пров и изменением во времени вектора электрического смещения D, который в общем случае определяется двумя составляющими:

$$D=\varepsilon_0 E + P, \quad (2)$$

где E – мгновенное значение вектора напряженности электрического поля, В/м, ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м, P – вектор поляризованности вещества, Кл/м.

Тогда изменение во времени вектора электрического смещения D (плотности тока смещения), определяется выражением:

$$\partial D/\partial t = e_0(\partial E/\partial t) + (\partial P/\partial t), \quad (3)$$

и связано с изменением во времени электрического поля, а также с поляризацией вещества, т.е. с ограниченным смещением связанных зарядов в диэлектрике или поворотом электрических диполей. Отсюда следует важный практический вывод: в водонефтяной эмульсии необходимо создать напряженность электрического поля E, достаточную для разрыва связанных зарядов, что приведет к разрушению глобул при соответствующей частоте электромагнитного поля. Можно предположить, что максимальная плотность тока смещения при прочих равных условиях будет на резонансной частоте собственных колебаний связанных зарядов и электрических диполей, каковыми являются молекулы воды. Резонансная частота молекул воды известна и составляет 30 ГГц.

Для определения минимальной напряженности СВЧ-поля, нами предложена простейшая модель, связывающая напряженность электрического поля с известными дипольными моментами связанных зарядов и электронной, атомной и релаксационной (ориентационной) поляризуемостью.

$$p = \alpha E_0 \quad (4)$$

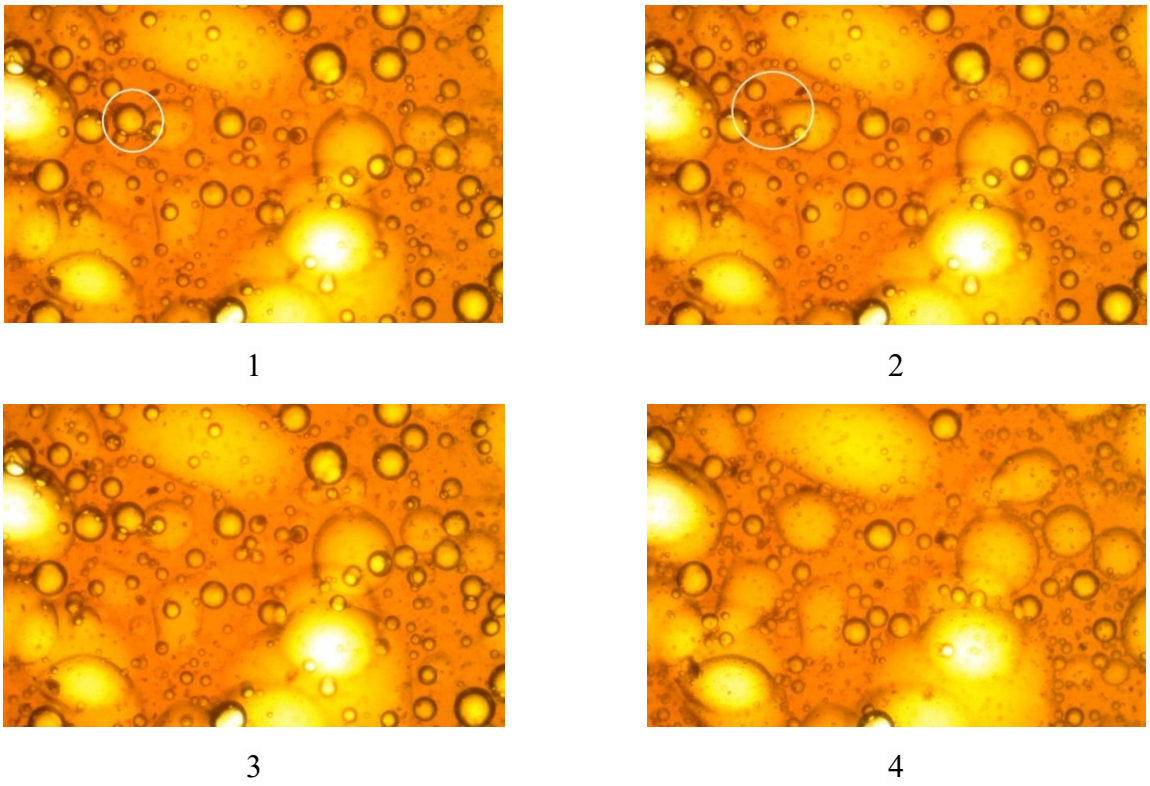
где p –дипольный момент молекул воды и связей типа водород – углерод, кислород – углерод, присутствующих в водонефтяной и нефтеводяной эмульсиях, Кл*м; α–поляризуемость, м^3 ; E_0 – амплитуда напряженности электрического поля, В/м.

Откуда E_0=p/α. Поскольку параметры p и α, разные для разных молекул и связей выбираем максимальное значение p max = 11.12 10^{-30} и минимальное αmin= 0.48 10^{-30} , что

определит минимально необходимую для разрушения эмульсии напряженность электрического поля, равную 23.1 В/м.

Для проверки адекватности этой модели предлагаемому способу была разработана экспериментальная установка. Испытуемый образец нефтешлама наносится на стекло и размещается на предметном столе, СВЧ-энергия по волноводу подводится к поверхности образца. Во время СВЧ- обработки производится видеозапись.Выходная мощность СВЧ-сигнала 2 Вт, частота 10 ГГц, напряженность электрического поля 20-30 В/м.

На рисунке 3 (1,2) приведены кадры, показывающие изменения во время обработки, на рисунке 3 (2,3) – расположение глобул нефтеводяной эмульсии до начала в конце обработки.



1 2

3 4

Рисунок 3 – Расположение глобул нефтеводяной эмульсии 1)до начала и 2)после разрушения; до начала 3) и в конце 4) обработки.

Выделенные области показывают глобулы до и после разрушения.

Таким образом, проверка адекватности математических моделей и экспериментальные исследования доказали возможность реализации процесса низкотемпературной СВЧ-переработки нефтешламовых отходов. Учитывая результаты проведенных исследований нами разработана экспериментальная установка, позволяющая осуществлять разделение фаз водонефтяной эмульсии непосредственно в технологическом потоке.

Осуществление процесса низкотемпературноого разделения эмульсии происходит за счет разрыва химических связей под воздействием электромагнитного поля, а не нагрева. Отметим, что при прочих равных условиях, если напряженность поля повысить в 100 раз, поверхность нагреется до 600 ^{0}C за 3 минуты, что недопустимо по соображениям безопасности и возможности коксования нефтешлама. Кроме того, нагрев в потоке также становится проблематичным, т.к. для нагрева только поверхности до 60 ^{0}C необходимо около 30 с и это при мощности 50 кВт (E_0 = 10000 В/м) и в условиях приближенных к идеальным. В действительности, противоречие между требованиями равномерного нагрева по объему и обеспечения необходимой скорости потока непреодолимы.

Низкотемпературное разделение эмульсии позволит устранить недостатки существующих методов, как сжигание «полезных» углеводородов, образование в больших объемах углекислого газа и других токсичных газов, низкая производительность,

невозможность использования при низких температурах, неприменимость для трудно расслаиваемых высоковязких нефтешламов. Кроме того, данная технология и техника могут использоваться в технологическом потоке нефтеперерабатывающих заводов, что существенно снизит объемы образующихся отходов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ No 18-29-24178

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qunxing Huang, Xu Han, Feiyan Mao, Yong Chi, Jianhua Yan. A model for predicting solid particle behavior in petroleum sludge during centrifugation/ Fuel, 2014, 117, 95-102

2. Xiao-Fei Wu, Hui-Bo Qin, Yi-Xuan Zheng, Yu Zhang, Wan Chen, Julian Y. Zuo, Chang-Yu Sun, Guang-Jin Chen. A novel method for recovering oil from oily sludge via water-enhanced CO_2 extraction. Journal of CO_2 Utilization 2019, 33, 513-520.

3. Ковалева Л.А., Зинатуллин Р.Р., Миннигалимов Р.З. Исследование разрушения водонефтяных эмульсий высочастотным элекромагнитным полем//Журнал: Труды института механики уфимского научного центра РАН –Уфа.– 2008. – Том: 6, 101-106.

4. R.I. Saitov, E.R. Abdeev, A.F. Khasanova, R.G. Abdeev, A.A. Rukomoynikov Development of Energy-Efficient Equipment and Technology for Environmentally Friendly Microwave Processing of Oil Sludge/ International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-9 Issue-4, April 2020, 1683-1687

5. Поляризуемость. Энциклопедия физики и техники // http://femto.com.ua/articles/part_2/3006.html. Цитируется 10 октября 2019 г.

УДК 620.9 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-391-393

ЭНЕРГОАУДИТ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
ENERGY AUDIT OF HEAT SUPPLY

Первак Галина Ивановна
Galina I. Pervak

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

Аннотация: Рассмотрены особенности энергетического аудита в теплоснабжении, его задачи, объекты для энергоаудита, развитие современного энергетического менеджмента. Анализ технико-экономической оценки и отбор технических решений на основании финансовых критериев.

Abstract: The features of energy audit in heat supply, its tasks, objects for energy audit, development of modern energy management are considered. Analysis of technical and economic evaluation and selection of technical solutions on the basis of financial criteria.

Ключевые слова: энергетический аудит, теплоснабжение, энергетика, объект, экономия, энергоресурсы, энергоиспользование, тепломеханическое оборудование.

Keywords: energy audit, heat supply, energetics, object, economy, energy resources, energy use, thermal mechanical equipment.

Энергетический аудит (энергоаудит) – это техническое инспектирование энергогенеративных и энергопотребляющих объектов с целью определения возможности экономии энергии и оказания помощи объекту в осуществлении энергоресурсоэффективных технологий и мероприятий, обеспечивающих экономию энергоресурсов на практике. В России энергетика является одной из наиболее развитых отраслей промышленности и подготовка специалистов энергетиков наиболее глубокая. Рассмотрим, почему вопрос энергоаудита так остро встал перед энергетикой. Раньше энергетика никогда не интересовалась экономикой, и

главными были проблемы бесперебойного функционирования теплообменного, насосного оборудования и техникой безопасности при его эксплуатации. Узкая специализация энергетиков не позволяла рассматривать объекты в целом как комплекс взаимосвязанных систем теплоснабжения [1]. Энергоаудит возник в начале 90-х годов на стыке энергетики, экономики и технологии, сюда же целесообразно отнести и экологию, особенно для производств, имеющих существенный вес в себестоимости готовой продукции.

Объектом для энергоаудита может являться предприятия коммунального хозяйства (районные, городские котельные, магистральные, распределительные тепловые сети, жилой фонд и общественные, административные здания). Сложность предприятия как объекта состоит в тесной взаимосвязи всех его систем. Например, предложение по экономии одного из энергоресурсов может повлечь за собой увеличение потребления другого или отразится на выпуске продукции. Задачи энергоаудита: выявление источника нерациональных энергозатрат, неоправданных потерь энергии, представление на основе технико-экономического анализа рекомендации по их ликвидации, предложение программ по экономии энергоресурсов и их рационального энергоиспользования, предложение очередности реализации предлагаемых мероприятий с учетом объемов затрат и сроков окупаемости. Общий порядок проведения энергоаудита – энергетического обследования следующий: 1.Энергоаудит системы электроснабжения и электропотребления. 2.Анализ режимов работы водоснабжения и водоотведения. 3. Энергоаудит теплотехнического оборудования (тепловых сетей, котельной, обследование систем отопления и ГВС, анализ режимов работы теплопотребляющего и теплоутилизационного технологического оборудования, тепловой баланс). 4.Обследование компрессионного оборудования, систем разводки и потребления сжатых газов. 5. Анализ режимов работы холодильного оборудования. Основная ценность этой части работы состоит в разработке энергетических балансов, позволяющих детализировать энергетические потоки по подразделениям и дать качественную оценку энергетическим потерям и указать участки и причины их возникновения. Трудоемкость работы аудитора зависит от степени детализации, которая обсуждается с заказчиком на стадии заключения договора. Величина погрешности или невязки баланса связана с отсутствием на предприятии приборов внутреннего учета тепла, аудитор должен иметь комплект портативного измерительного оборудования, позволяющего установить фактическое энергопотребление. Заключительный этап энергоаудита состоит в разработке рекомендаций по энергосбережению и их технико-экономическому обоснованию. Существует ряд известных типовых решений по повышению энергетической эффективности различных систем, и тогда аудитору требуется только сделать технико-экономическую оценку и осуществить отбор технических решений на основании финансовых критериев. Однако все тепломеханические предприятия уникальны и типовые решения охватывают только часть проблемы [1]. Поэтому разработка рекомендаций по экономии тепловой энергии является серьезным научным исследованием.

Все предлагаемые мероприятия разбиваются на три группы по степени требуемых капиталовложений: беззатратные, среднезатратные и капиталоемкие. Задачей аудитора является поиск новых решений или выбор между традиционными решениями. Несмотря на наличие стандартных методик, энергоаудит можно проводить многовариантно: внутритерриториально, степень достоверности внутреннего учета распределения энергоресурсов определяет трудоемкость и продолжительность работ по составлению балансов и программу приборных измерений. Величина потерь тепловой энергии может складываться за счет несовершенства энергетического хозяйства и нерационального использования тепловой энергии теплотехнологическим оборудованием. Энергетическая составляющая вносит ощутимый вклад в структуру себестоимости тепловой энергии, и отсутствие внутрипроизводственного учета энергоносителей не позволяет отделить постоянные издержки от переменных или разности затрат по разным видам продукции. Расчет удельной энергоемкости каждого вида продукции при большой номенклатуре изделий обычно не входит в программу энергоаудита, но по желанию заказчика может быть выполнен.

Большинство предприятий функционируют при недостаточности оборотных средств, поэтому финансы на модернизацию выделяются в не достаточных объемах и энергоаудитор должен расставить приоритеты в запланированных мероприятиях, чтобы они принесли наибольший экономический эффект-доход [1]. Следующим шагом будет реализация мероприятий рекомендованных энергоаудитором. Далее энергетические службы будут самостоятельно осуществлять непрерывный контроль за распределением энергоресурсов.

В задачу энергоаудита входит получение финансовой выгоды от реализации энергосберегающих технологий, разработанных по итогам энергетического обследования, инициация «энергоаудиторских фирм», в задачу которых входит проверка и внесение изменений в расчетные нагрузки теплопотребления, устройство коммерческих узлов учета тепло и воды. Фирма в соответствии с утвержденной методикой предлагает потребителю смету энергоаудита, в несколько раз превышающую размер оплаты невостребованной тепловой энергии. Есть финансовая выгода энергоаудита при низком фактическом уровне теплопотребления. Нужно преодолеть упрощенное представление об энергоаудите, как о комплексе измерений энергетических параметров с последующим составлением бизнес-планов внедрения мероприятий. Лучше говорить об энергосервисных задачах. Энергоаудит является одним из этапов в достижении целей. Энергосбережение – путь снижения издержек в основном технологическом продукте. Технологический анализ – основа совершенствования энергосберегающих решений. Производными от технологических систем являются инженерные системы – отопление, вентиляция, водоснабжение, газоснабжение на которые накладываются дополнительные требования воздушно-теплового комфорта, пожаровзрывобезопасности. Финансовый инжиниринг – главный фактор достижения целей энергосбережения. Это и анализ финансовых потоков, и поиск оптимальных схем получения инвестиций. Энергоаудит не разовое мероприятие, это – финансово-энергетический мониторинг – непрерывное совершенствование технологических, инженерных, организационных, финансовых систем объекта [1]. Задачи энергоаудита включает в себя: аналитический, определяющий методологию работ, разработку рекомендаций по теплоэнергетическому режиму инженерных систем, аудиторский, отвечающий за сбор и анализ информации и проведения измерений энергетических параметров, финансовый инжиниринг, формирующий экономическую основу решения задач. Задачи энергоаудита должны формироваться уже на стадии проектирования объекта и разработки строительных норм и правил.

Вывод: Энергоаудиторы составляют сформированную систему критериев, характеризующую положение предприятия на момент энергоаудита. Именно таким образом и должен развиваться современный энергетический менеджмент, цель которого решать оперативные задания, связанные с исправностью отдельных систем, и рационально управлять энергетическим хозяйством, используя в качестве критерия энергетическую составляющую себестоимости продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е.Я. Соколов Теплофикация тепловые сети.- М. Издательство МЭИ, 2001 г., 7-е изд.

УДК 536.12.33 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-394-397

ТЕПЛОЁМКОСТЬ МИКРОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ И МОНОЛИТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМ $CdSb$-$NiSb_2$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

HEAT CAPACINY OF VICROSIZED POWDERS AND MONOLITES OF SEMICONDUCTOR SYSTEMS CDSB-$NISB_2$ DEPENDING ON TEMPERATURE

Ёдалиева Зулфия Нуралиевна, Зарипова Мохира Абдусаломовна, Сафаров Махмадали Махмадиевич
Zulfiy N.Yodalieda, Mohira A. Zaripova, Mahmadali M. Safarov

Таджикский технический университет имени акад.М.С.Осими
Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
(e-mail: edalieva71@mail.ru, mohira.zaripova@list.ru, mahmad1@list.ru)

Аннотация: В данном статье приводится результаты исследования теплоемкости порошков и монолитов полупроводниковых систем ($CdSb$-$NiSb_2$), в зависимости от температуры. Расчеты показали, что максимальная общая относительная погрешность экспериментальных данных по теплоемкости при доверительной вероятности $\alpha = 0{,}95$ не превышает 4%.

Abstracts: This article presents the results of a study of the heat capacity of powders and monoliths of semiconductor systems ($CdSb$-$NiSb_2$), depending on temperature. Calculations have shown that the maximum total relative error of experimental data on heat capacity at a confidence level of $\alpha = 0{,}95$ does not exceed 4%.

Ключевые слова: теплоемкость, температура, полупроводник, порошок, сплав.
Keywords: heat capacity, temperature, semiconductor, powder, allow.

Исследование теплофизических и термодинамических свойств полупроводниковых материалов в зависимости от давления и температуры представляет одну из важных научных проблем, имеющих большую практическую значимость.

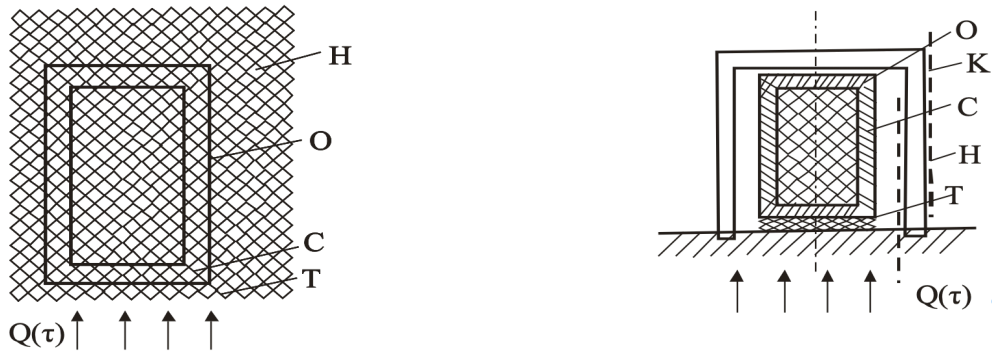
Прогресс во многих областях науки, техники и особенно технологии практически невозможен без необходимых достоверных данных, используемых в постановке задач для исследования, проектирования и эксплуатации материалов и изделий. Вещества, в которых при Т=0К верхняя из заполненных электронами энергетических зон (валентная зона) и нижняя из незаполненных электронами энергетических зон (зона проводимости) не пере-крываются, являются полупроводниками или диэлектриками. Вопросы надежности полупро-водниковых приборов, повышения процентов выхода годных изделий стабильности пара-метров остаются весьма актуальными. Обычно они решаются – на этапах изготовления – усовершенствованием технологических процессов, конструкции – в итоге – отбраковкой ненадёжных изделий. Комплексное изучение термодинамических и теплофизических свой-ств этих материалов в широкой области параметров состояния интересен тем, что как модельные объекты они являются удобными. Анализ экспериментальных данных иссле-дуемых веществ при высоких параметрах состояния дает возможность установить основные условия рассеяния и переноса теплоты как в чистых металлах, так и в отмеченных полупроводниковых материалах, а также позволяет проверить возможность применимости теорий.

Удельную теплоёмкость сплавов измеряли на установках, разработанных профес-сором Платуновым Е.С. и его учениками, изготовленных Актюбинским заводом ($ИТС_р$-400). Подробная схема, методика измерения и расчёт погрешности измеряемых величин представлены в работе [1].

Исследуемых прибор измеряет теплоёмкость и теплопроводность отдельно, и на основе этих данных рассчитывается температуропроводность исследуемых объектов. Промышленность стала проявлять большой интерес к научным разработкам.

Процесс измерения теплоёмкости заключается в следующем: образец (О) (рис 1(а,б).) размещается внутри металлического стакана (С) и вместе с ним монотонно разогревается за счет непрерывно поступающего в стакан через тепломер (Т) потока $Q(\tau)$. Тепломер контактирует только с одним стаканом. Открытые участки поверхности стакана отделены от среды устройством принудительной компенсации тепловых потерь (адиабатной оболочкой). Тепломер (Т) по принципу действия представляет тонкую кондуктивную стенку, которая разогревается в опыте совместно с образцом и стаканом и имеет по сравнению с ним малую теплоёмкость. Благодаря последнему обстоятельству, температурное поле внутри тепломера на протяжении опыта остаётся практически стационарным (тепловой поток, проходя через тепломер, практически не поглощается) и о величине поступающего к стакану потока удаётся однозначно судить по величине перепада $V_T(T)$ в тепломере.

Схема на рисунке 1а, в качестве одного из основных элементов содержит устройство для компенсации тепловых потерь, названное адиабатной оболочкой. Примером такой оболочки может служить изображенное на рисунке 1б, устройство, состоящее из металличес-кого колпака (К) с электрическим нагревателем (Н).



а) б)

Рисунок 1. а) - устройство для компенсации тепловых потоков, б) - измерительная ячейка.

Разработанный интерфейс на основе однокристального МП (микропроцес-сор) позволяет в автоматическом режиме следить за следующими параметрами:

1. Заданием нужного интервала температуры t_{min}: t_{max}:
2. Выбором интервала увеличения температуры Δt
3. Передачей измеряемых данных компьютера по сети;
4. Предварительным тестированием оборудования при включении;
5. Автоматической калибровкой тепломера.

Структурная схема автоматизированного теплофизического комплекса приводится ниже (рисунок 2). Приборный интерфейс (ПИ) – это аппарат програмного комплекса, который преобразует сигналы, поступающие от датчиков температуры (термопары), в цифровой сигнал и в формате последовательных данных передает эти данные через последовательный интерфейс RS 232 КРС (персональному компьютеру).

Программное обеспечение для стыковки контроллера с ПК (персональный компьютер) обеспечивает связь через COM port. Удобный интерфейс обеспечивает настройку параметров измерения. К дополнению ко всему автоматизированная система позволит не только произвести измерение теплоёмкости по методу монотонного разогрева, но и по методу постепенного охлаждения, что указывает на повторяемость опыта.

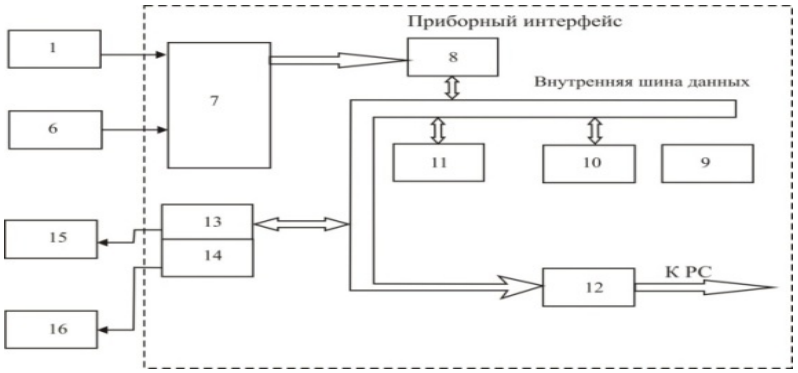


Рисунок 2 – Блок-схема автоматизированного теплофизического комплек-са:1-6 датчики температуры; 7-аналоговый коммутатор; 8-АЛУ (арифметическое–логическое устройство); 9-Flash память; 10-таймер; 11-логика управления; 12-UART-асинхронный последовательный приём о передатчик; 13.14 ЦАП (цифроаналоговый преобразователь): 15 – регулятор температур основания; 16- регулятор температур адиабатической оболочки.

Расчеты показали, что максимальная общая относительная погрешность экспери-ментальных данных по теплоемкости при доверительной вероятности $\alpha = 0{,}95$ не превышает 4%.

На основе экспериментальных измерений изобарной теплоемкости порошков и монолитов композитов полупроводниковых материалов систем: образец №1-96% CdSb + 4$NiSb_2$; образец №2-95%CdSb+5%$NiSb_2$; образец №3-93%CdSb+7%$NiSb_2$; образец №4-85%-CdSb+15%$NiSb_2$; образец №5-10% CdSb+90%$NiSb_2$, в широком интервале температуры получены результаты которые приведены в таблице 1 и на рисунке 3 [2-5].

Таблица 1 – Теплоёмкость (C_p, Дж/(кг · К)) микроразмерных порошков полупроводниковых систем CdSb-$NiSb_2$ (10мкм) в зависимости от температуры.

Т,К	**CdSb**	**№1**	**№2**	**№3**	**№4**	**№5**	**$NiSb_2$**
100	192,1	197,9	203,7	209,5	215,3	285,1	297,8
150	195,9	200,8	207,6	211,5	217,3	292,9	303,6
200	200,8	205,6	210,5	215,3	219,2	298,8	310,4
250	205,6	211,5	215,3	219,2	225,0	306,5	317,2
300	211,5	217,3	221,2	226,9	230,9	314,3	324,9
323	215,3	221,2	313,3	230,9	234,7	320,1	331,7
348	220,3	226,0	230,9	234,7	240,6	324,9	337,6
373	226,9	231,8	234,7	238,6	250,3	333,7	349,2
398	230,9	237,7	240,6	246,4	257,1	343,4	356,9
448	246,4	250,3	255,1	259,9	274,5	362,8	376,4
473	250,3	258,0	263,8	269,7	283,2	372,5	388,3
498	258,9	265,8	271,6	277,4	291,9	384,1	401,6
523	267,7	273,5	279,4	287,1	298,8	400,6	418,1
548	276,5	282,3	289,1	294,9	307,8	419,0	434,6
573	287,1	292,9	298,8	302,6	316,2	433,6	451,1
598	298,8	302,6	306,5	312,3	326,9	452,9	466,6
623	306,5	312,3	316,2	322,0	332,7	469,5	481,1
648	316,2	323,9	327,9	333,7	341,4	484,6	496,6
673	329,8	335,6	339,5	345,3	351,1	501,5	514,1

Как видно из таблица 1 и рисунок 3 теплоёмкость исследуемых образцов: №1-96% CdSb+4$NiSb_2$; №2-95%CdSb+5%$NiSb_2$; №3-93%CdSb+7% $NiSb_2$; №4-85%-CdSb+ 15% $NiSb_2$; №5-10%CdSb+90%$NiSb_2$, с ростом температуры увеличивается.

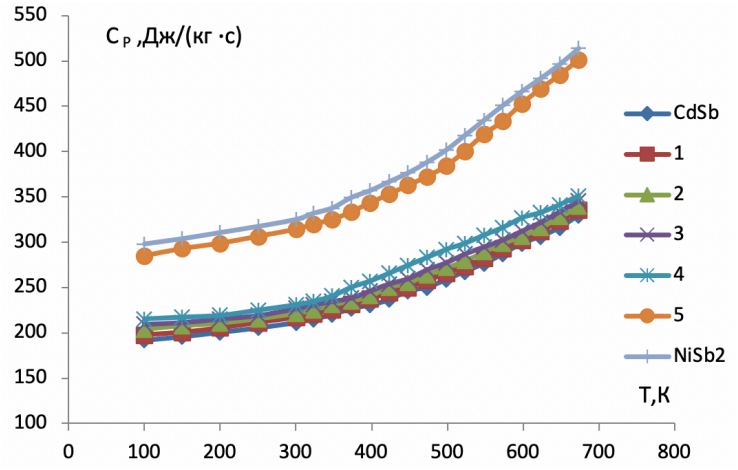


Рисунок 3 – Зависимость теплоёмкости порошков полупроводниковых материалов системы CdSb - $NiSb_2$ размерами 10мкм от температуры:1-образец N1; 2-образец N2; 3-образец N3; 4-образец N4; 5-образец N5; 6-образец N6.

Выводы

Провдено экспериментальное исследование по теплоемкости порошков полупроводников системы CdSb - $NiSb_2$ в зависимости от температуры. Для измерения температурной зависимости теплоёмкости образцов при атмосферном давлении нами использован метод монотонного разогрева Установлено, что теплоёмкость исследуемых образцов с ростом температуры увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. Л.: Энергия,1973.-142

2.Ёдалиева З.Н. М.С. Сайдуллаева, Р.А. Кариева. Исследование Cd-Sb-Cr по разрезу CdSb - $CrSb_2$ //Вестник ТНУ, Душанбе 2007 - С. 70-74.

3.Ёдалиева З.Н. Э.Ш. Тауров, Х.С. Содыков, М.М. Сафаров, Дж.А. Зарипова Калориметрия и температуропроводность твёрдых полупроводниковых систем CdSb /З.Н. Ёдалиева, //МТФШ-9, Душанбе-Тамбов, 2014.-С.187-190.

4.Ёдалиева З.Н. Энтальпия и теплоёмкость нанопорошков двух–и трехкомпонентных непереходных металлов системы медь, никель, алюминий и кадмий /З.Н.Ёдалиева, И.Ш. Тауров, М.С. Сайдуллаева, Х.С. Содыков, Иман Бахром Маниш, С.Г. Ризоев, М.М.Сафаров. //МТФШ-9, Душанбе-Тамбов, 6-11 октября 2014.- С.299-303.

5.Ёдалиева З.Н. Теплопроводность, электропроводность и теплоёмкость полупроводни- ковых систем (CdSb-$NiSb_2$). /З.Н. Ёдалиева, М.С. Сайдуллаева, М.М. Сафаров. //Материалы республиканской научно-практической конференции «Инновация - эффективной фактор связи науки с производством» Душанбе-2008. -С. 118-124.

УДК 536.12.33 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-398-401

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ПО ТЕПЛОВЫМ СЕТЯМ
ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ENERGY TRANSMISSION THROUGH HEAT NETWORKS

Жмакин Леонид Иванович, Шарпар Николай Михайлович,
Полуцыган Елена Олеговна, Первак Галина Ивановна
Leonid I. Zhmakin, Nikolay M. Sharpar, Elena O. Polutsygan, Galina I. Pervak

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: В работе рассмотрены факторы, связанные с проблемами энергоресурсосбережения при передаче тепловой энергии на значительные расстояния. Подобными факторами являются тепловые потери на трассе, небольшой КПД насосных агрегатов и утечки теплоносителя при аварийных ситуациях. Предложены различные меры по их устранению в целях повышения энергоэффективности сетей.

Abstract: The paper considers the factors associated with the problems of energy saving in the transmission of thermal energy over long distances. Such factors are heat losses on the highway, low efficiency of pumping units and leakage of coolant in emergency situations. Various measures are proposed to eliminate them in order to improve the energy efficiency of networks.

Ключевые слова: тепловая сеть, гидравлические режимы, утечки теплоносителя, КПД, сетевые насосы, температурный график

Keywords: heat network, hydraulic modes, coolant leaks, efficiency, network pumps, temperature chart

Проблема энергосбережения при передаче энергии от источника к потребителям по тепловым сетям имеет комплексный характер и при ее решении нужно учитывать ряд факторов. В первую очередь, к ним относятся невысокие КПД сетевых насосов, линейные потери тепла по трассе, связанные со способом ее прокладки и эффективностью теплоизоляции, потери тела из-за несовершенства гидравлических режимов, а также утечки теплоносителя вследствие аварийных ситуаций [1, 2, 3]. Поэтому меры, направленные на повышение энергетической эффективности тепловых сетей, предполагают:

- использование импортного насосного оборудования с высоким КПД и частотно-регулируемого привода для управления скоростью вращения электродвигателей насосов;
- применение качественной тепловой изоляции сетей с предварительно изолированными теплопроводами [4, 5] (ППУ, Экофлекс и др.) и установка современной запорной арматуры. Помимо снижения потерь тепла это способствует росту надежности сетей, снижению утечек теплоносителя через сальники, аварийности и затрат на ремонт. Следует помнить, что альтернативным вариантом теплосети является монтаж крышной котельной у потребителя, которая работает в автоматическом режиме с КПД около 85…90%;
- наладка гидравлических режимов теплотрассы с тем, чтобы подключенные к ней потребители получали тепло по возможности равномерно;
- приготовление горячей воды непосредственно в индивидуальных тепловых пунктах зданий; для этого рекомендуется использовать циркуляционную систему включения с пластинчатыми теплообменниками, имеющими ряд преимуществ перед кожухотрубными.

В идеале потери тепловой энергии в сетях не должны превышать 5…7%; но фактически они гораздо выше и могут достигать 25% и более. Из вышеизложенного вытекает алгоритм действий, направленных на повышение эффективности передачи энергии по тепловым сетях.

Однако мы в своей статье проанализируем только одно из направлений, связанное с совершенствованием тепловой изоляцией теплопроводов.

Как известно, потери энергии в тепловой сети зависят от ее температурного графика, длины и температуры окружающей среды; они носят название линейных потерь тепла Q_l. Если источник тепла имеет мощность Q, а до потребителя доходит только Q_0, то за меру эффективности (или КПД) сети принимают отношение [1, 2]

$$\eta = Q_0 / Q = 1 - Q_l / Q \tag{1}$$

В простейшей модели сети источник тепла связан с потребителем двухтрубной тепловой сетью. Пусть температура воды в подающей трубе равна t_1 у источника тепла и t_1' – у потребителя. Соответственно, через t_2 и t_2' обозначим температуры в обратной трубе. Изменение температуры воды по длине трубы описывается простейшим дифференциальным уравнением

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{1}{c_p RG}(t - t_0), \tag{2}$$

где R – удельное тепловое сопротивление теплопередаче от теплоносителя к окружающей среде с температурой t_0, G – расход воды (без учета утечек), t – ее температура, x – текущая длина ($0<x<l$), а c_p – изобарная теплоемкость. Решение этого уравнения имеет вид

$$t = t_0 + (t_1 - t_0) \cdot \exp\left\{-\frac{x}{c_p RG}\right\}.$$

Конечные температуры воды определяются соотношениями

$$t_1' - t_0 = (t_1 - t_0)e^{-z}, \tag{3}$$

$$t_2 - t_0 = (t'_2 - t_0)e^{-z}, \tag{4}$$

где безразмерный параметр z равен

$$z = \frac{l}{c_p RG}.$$

Для подающего трубопровода линейные потери тепла составляют

$$Q_{1l} = c_p G(t_1 - t_1').$$

или с учетом формулы (3)

$$Q_{1l} = c_p G(t_1 - t_0)(1 - e^{-Z}) \tag{5}$$

Аналогично рассуждая, получим для обратного трубопровода

$$Q_{2l} = c_p G(t_2 - t_0)(e^{Z} - 1) \tag{6}$$

Тогда суммарные линейные потери тепла с учетом неизолированных участков и арматуры

$$Q_l = (1 + \beta)(Q_{1l} + Q_{2l}) \tag{7}$$

где β - нормативный коэффициент [3]. Дальнейшее преобразование этой формулы с учетом соотношений (3) и (4) приводит к следующей зависимости для линейных потерь

$$Q_l = (1 + \beta)c_p G[(t_1 - t_0)(1 - e^{-Z}) + (t_2 - t_0)(e^{Z} - 1)]. \tag{8}$$

Тепловая энергия, отпущенная источником в единицу времени, равна

$$Q = c_p G(t_1 - t_2), \tag{9}$$

а энергия, полученная потребителем,

$$Q_0 = c_p G(t_1' - t_2').$$

Поскольку $Q = Q_0 + Q_l$, то на основании определения (1) следует, что КПД сети

$$\eta(z,t_0) = 1-(1+\beta)(1-ch(z)+2sh(z)\cdot\frac{\tau_0-t_0}{t_1-t_2}), \quad (10)$$

где температура $\tau_0 = \frac{t_1+t_2}{2}$.

Формула (10) дает зависимость КПД тепловой сети η от ее температурного графика, безразмерного комплекса z и от температуры наружного воздуха. Если положить КПД равным стандартному значению, рекомендованному в нормативной литературе [4, 5], например, 0,94, то зависимость (10) превращается в уравнение, из которого можно найти секундный расход теплоносителя для данной температуры окружающей среды.

Для нахождения зависимости $G(\eta, t_0)$ строится система графиков $\eta(z, t_0)$ как функций от z при различных значениях t_0. Затем проводится прямая $\eta = const$, причем константа выбирается близкой к рекомендованному значению коэффициента энергетической эффективности тепловой сети. В точках пересечения этой прямой с кривыми $\eta(z, t_0)$ находятся координаты $z(t_0)$, по которым находятся величины

$$G(\eta,t_0) = \frac{l}{c_p z(t_0) R}.$$

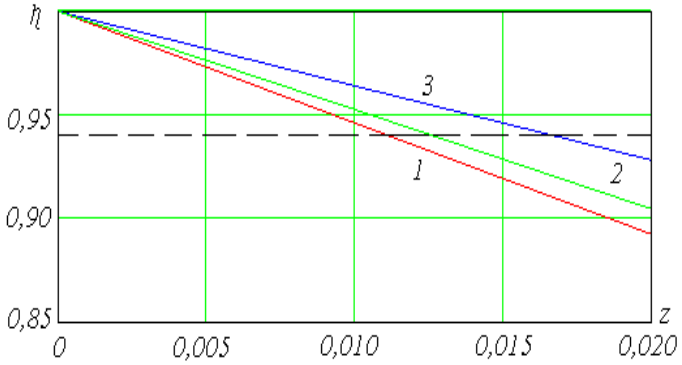


Рисунок 1 – Графический метод поиска расходов теплоносителя в сети

Семейство кривых $\eta(z, t_0)$ на рис. 1 построено для температурного графика сети 130/70°С, коэффициента местных потерь β = 0,2 и различных значений температуры окружающей среды (кривая 1 – t_0 = –35°С; 2 – t_0 = –20°С; 3 – t_0 = +10°С).; прямая соответствует нормативному КПД $\eta = 0{,}94$.

Для значений КПД сети η>0,8 параметр z<<1. Следовательно, входящие в формулу (10) гиперболические функции можно разложить в ряд и привести трансцендентное уравнение для определения массового расхода теплоносителя к алгебраическому уравнению. Ограничиваясь членами разложения, содержащими z в степени не выше второй, аппроксимируем кривые $\eta(z, t_0)$ параболами, а формулу (10) приведем к виду:

$$\eta(z,t_0) = 1+\frac{1}{2}(1+\beta)z\left(z-4\cdot\frac{\tau_0-t_0}{t_1-t_2}\right).$$

Полагая теперь $\eta(z, t_0) = \eta$, получим уравнение для аналитического определения массового расхода теплоносителя на единицу длины теплотрассы, решение которого

$$\frac{G}{l} = \frac{1}{c_p R}\sqrt{\frac{1+\beta}{2(1-\eta)}}\frac{\delta}{1-\sqrt{1-\delta^2}},$$

где

$$\delta = \frac{t_1-t_2}{\tau_0-t_0}\sqrt{\frac{1-\eta}{2(1+\beta)}}$$

- параметр, зависящий от температурного графика сети и температуры окружающей среды.

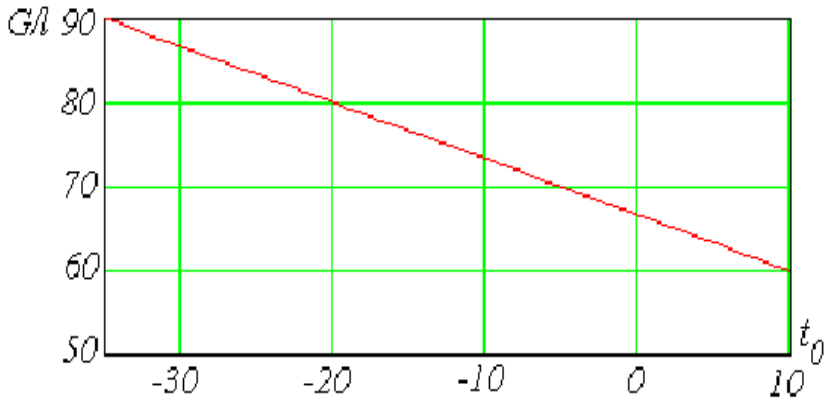


Рисунок 2 – Удельный расход $^{G}/_{l}$ в единицах $^{1}/_{c_p R}$ для температурного графика сети 130/70°С

Таким образом, на основе полученных зависимостей (10) и (11) можно решать целый комплекс задач, связанных с энергосбережением в тепловых сетях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е.Я. Соколов. Теплофикация и тепловые сети. М., Изд. МЭИ , 2001 г., 7е изд., 421 с.

2. Данилов О.Л., Гаряев А.Б., Яковлев И.В. и др., Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / Под ред. Клименко А.В. – М.:, ИД МЭИ, 2010, 423 с.

3. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. Справочник / Под ред. Клименко А.В. и Зорина В.М., кн. 4, М.: Изд. МЭИ, 2004, 630 с.

4. СНиП 2.04.14-88, Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов / Госстрой России, М: ГУП ЦПП, 2000, 64 с.

5. СНиП 2.04.07-86, Тепловые сети / Госстрой России, М: ГУП ЦПП, 2000, 48 с.

6. Особенности применения ОЦР-технологии на компрессорных станциях металлургических предприятий / И. С. Антаненкова, С. И. Светогор // Промышленные процессы и технологии. 2021. No 1. С. 61 – 76. DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-61-76

УДК 539.3:620.193:669 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-402-407

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ОБОЛОЧКИ ИЗ ТИТАНА
EFFECT OF HYDROGEN ON TITANIUM SHELLS

Кузнецова Виолетта Олеговна,
Violetta O. Kuznetsova

Тульский государственный университет, Россия, Тула
Tula State University, Russia, Tula
(kuznecova_violetta@mail.ru)

Аннотация: В данной статье рассмотрено построение математической модели, которая описывает влияние агрессивной водородной среды на НДС тонкой круговой цилиндрической оболочки, выполненной из титанового сплава, и нагруженной равномерно-распределённой нагрузкой.

Abstract: In this article, we consider the construction of a mathematical model that describes the effect of an aggressive hydrogen environment on the SSS of a thin circular cylindrical shell made of a titanium alloy and loaded with a uniformly distributed load.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, изотропный материал, разносопротивляемость, наводороживание, титановый сплав.

Keywords: cylindrical shell, isotropic material, different resistance, hydrogenation, titanium alloy.

Первой феноменологической моделью расчёта элементов конструкций, работающих в коррозионных водородосодержащих средах, с учётом изменения свойств материала во времени, была модель, предложенная в работах В.В.Петрова, И.Г.Овчинникова, А.Б.Рассады. В систему определяющих параметров кроме напряжения и деформации введены дополнительные параметры q_i, которые учитывают взаимодействие материала со средой [1].

Объектом исследования является круговая цилиндрическая оболочка из титанового сплава ВТ1-0, нагруженная внутренним давлением до 5 МПа, жёстко закрепленная по периметру. Местоположение любой точки на срединной поверхности цилиндрической оболочки определяется гауссовыми координатами α_1 и α_2, с учётом действия поперечной нагрузки q, как показано на рисунке 1. В рассматриваемом случае коэффициенты Ляме и главные кривизны имеют вид:

$$\tilde{A} = 1; \quad \tilde{B} = R; \quad k_1 = 0; \quad k_2 = R^{-1}, \tag{1}$$

где R – радиус оболочки.

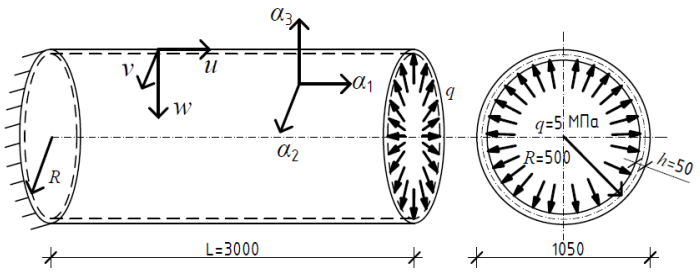


Рисунок 1 – Расчётная схема оболочки

Рассмотрим равновесие цилиндрической оболочки толщиной h, находящейся под действием поперечной осесимметричной равномерно-распределенной нагрузки q и водородосодержащей среды с концентрацией λ. Примем кинетический потенциал деформаций в виде:

$$W_1 = (A_e(\lambda) + B_e(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_e(\lambda) + D_e(\lambda)\xi + E_e(\lambda)\eta Cos3\varphi)\tau^2 + \\ + [(A_p(\lambda) + B_p(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_p(\lambda) + D_p(\lambda)\xi + E_p(\lambda)\eta Cos3\varphi)\tau^2]^n, \quad (2)$$

где $A_e(\lambda)$, $B_e(\lambda)$, $C_e(\lambda)$, $D_e(\lambda)$, $E_e(\lambda)$, $A_p(\lambda)$, $B_p(\lambda)$, $C_p(\lambda)$, $D_p(\lambda)$, $E_p(\lambda)$ – физические функции потенциала квазилинейной и нелинейной частей, зависящие от степени водородонасыщения. Зависимости механических свойств материала вычислены в результате полиномиальной интерполяции значений коэффициентов при заданном уровне концентрации среды λ (0; 0,01; 0,03 и 0,05%) и для сплава ВТ1-0 принимают вид:

$$V_{ek}(\lambda) = e_{0k} + e_{1k} \cdot \lambda + e_{2k} \cdot \lambda^2; \\ V_{pk}(\lambda) = p_{0k} + p_{1k} \cdot (p_{2k})^{\lambda}; \quad (3)$$

$$A_e(\lambda) = V_{e1}(\lambda); \quad B_e(\lambda) = V_{e3}(\lambda); \quad C_e(\lambda) = V_{e2}(\lambda); \quad D_e(\lambda) = V_{e4}(\lambda); \\ E_e(\lambda) = V_{e5}(\lambda); \quad A_p(\lambda) = V_{p1}(\lambda); \quad B_p(\lambda) = V_{p3}(\lambda); \quad C_p(\lambda) = V_{p2}(\lambda); \\ D_p(\lambda) = V_{p4}(\lambda); \quad E_p(\lambda) = V_{p5}(\lambda), \quad (4)$$

где e_{ik}, p_{ik} – коэффициенты полиномов i = 0...3; k = 1...3.

Связь тензоров деформаций и напряжений можно определить из потенциала деформаций (2) по формулам Кастильяно:

$$e_{ij} = \frac{\partial W_1}{\partial \sigma_{ij}}; \quad \gamma_{ij} = \frac{\partial W_1}{\partial \tau_{ij}}; \quad (i, j, k = 1,2,3); \\ e_{ij} = 2C_e(\lambda)\sigma_{ij}/3 + 2(A_e(\lambda) - C_e(\lambda))\sigma\delta_{ij}/3 + T_{ij}(\lambda), \quad (5)$$

где $T_{ij}(\lambda)$ - нелинейная составляющая уравнений состояния.

В теории цилиндрических оболочек [5] используются следующие зависимости:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5w_{,1}^2; \\ \varepsilon_2 = \nu_{,2} + k_2 w + 0,5(-w_{,2} + k_2\nu)^2; \\ \gamma = \nu_{,1} + u_{,2} - w_{,1}(w_{,2} + k_2\nu); \\ \chi_1 = -w_{,11}, \quad (6)$$

где ε_1, ε_2 – удлинения; γ – сдвиговые деформации; u – осевые перемещения; ν – касательные перемещения; w – радиальные перемещения.

Компоненты деформации в точках, отстоящих на расстоянии α_3 от срединной поверхности, выражаются через компоненты тангенциальных и изгибных деформаций:

$$e_{11} = \varepsilon_1 + \alpha_3\chi_1; \quad e_{22} = \varepsilon_2 + \alpha_3\chi_2; \quad \gamma_{12} = \gamma + 2\alpha_3\chi_{12}. \quad (7)$$

Принимая во внимание осесимметричность данной задачи и то, что оболочка нагружена внутренним давлением q, кинематические зависимости принимают вид:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5w_{,1}^2; \quad \varepsilon_2 = k_2 w; \quad \chi_1 = -w_{,11}; \quad e_{11} = \varepsilon_1 + \alpha_3\chi_1; \quad e_{22} = \varepsilon_2. \quad (8)$$

Связь между деформациями и напряжениями представим в виде:

$$\begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \end{Bmatrix} = [A]\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \end{Bmatrix}; \quad [A] = \begin{bmatrix} A_{11}A_{12} \\ A_{21}A_{22} \end{bmatrix}; \quad (9)$$

Обращая соотношения (9), получаем зависимость напряжений от деформаций:

$$\begin{Bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\end{Bmatrix}=[\mathrm{B}]\begin{Bmatrix}e_{11}\\ e_{22}\end{Bmatrix};\quad [\mathrm{B}]=\begin{bmatrix}B_{11}B_{12}\\ B_{21}B_{22}\end{bmatrix}, \tag{10}$$

где $[\mathrm{B}]=[\mathrm{A}]^{-1}$

Здесь A_{11}, A_{12}…– составляющие симметричной матрицы податливостей [A] – т. е. функции, содержащие функции потенциала W_1 (2).

Усилия, моменты и поперечную силу найдём через напряжения традиционным способом:

$$N_1=\int_{-h/2}^{h/2}\sigma_1 d\alpha_3;\quad N_2=\int_{-h/2}^{h/2}\sigma_2 d\alpha_3;\ M_1=\int_{-h/2}^{h/2}\sigma_1\alpha_3 d\alpha_3;$$
$$M_2=\int_{-h/2}^{h/2}\sigma_2\alpha_3 d\alpha_3;\ Q_1=M_{1,1}.$$

Связь моментов и усилий с компонентами деформаций оболочки приведём к виду:

$$N_1=D_{11}\varepsilon_1+D_{12}\varepsilon_2+P_{11}\chi_1;\quad N_2=D_{12}\varepsilon_1+D_{22}\varepsilon_2+P_{21}\chi_1;$$
$$M_1=P_{11}\varepsilon_1+P_{12}\varepsilon_2+B_{11}\chi_1;\quad M_2=P_{21}\varepsilon_1+P_{22}\varepsilon_2+B_{21}\chi_1,$$

где с учётом влияния степени наводороживания материалов при концентрации λ материальные функции имеют вид:

$$D_{ij}=\int_{-h/2}^{h/2}C_{ij}(\lambda)dz;\quad P_{ij}=\int_{-h/2}^{h/2}C_{ij}(\lambda)zdz;\quad B_{ij}=\int_{-h/2}^{h/2}C_{ij}(\lambda)z^2dz.$$

Ввиду тройной нелинейности поставленной задачи, производим построение разрешающих уравнений в линеаризованной форме с использованием двухшагового метода последовательных возмущений параметров:

$$\delta e_{11}=\frac{\partial e_{11}}{\partial\sigma_{11}}\delta\sigma_{11}+\frac{\partial e_{11}}{\partial\sigma_{22}}\delta\sigma_{22}+\frac{\partial e_{11}}{\partial\lambda}\delta\lambda;$$
$$\delta e_{22}=\frac{\partial e_{22}}{\partial\sigma_{11}}\delta\sigma_{11}+\frac{\partial e_{22}}{\partial\sigma_{22}}\delta\sigma_{22}+\frac{\partial e_{22}}{\partial\lambda}\delta\lambda; \tag{11}$$

Зависимости приращений деформаций в точке через приращения деформаций срединной поверхности $\delta\varepsilon_1$ и $\delta\varepsilon_2$ и кривизны срединной поверхности $\delta\chi_1$, представляются следующим образом:

$$\delta e_{11}=\delta\varepsilon_1+\alpha_3\delta\chi_1;\quad \delta e_{22}=\delta\varepsilon_2;$$

Рассмотрим задачу, в которой процесс воздействия коррозионной водородной среды на оболочку завершён. Здесь не требуется дифференцирование по параметру λ в выражениях приращений деформаций (11). Уравнения связи усилий с деформациями срединной поверхности в приращениях примут вид:

$$\delta N_1=D_{11}\delta\varepsilon_1+D_{12}\delta\varepsilon_2+P_{11}\delta\chi_1;\quad \delta N_2=D_{12}\delta\varepsilon_1+D_{22}\delta\varepsilon_2+P_{21}\delta\chi_1;$$
$$\delta M_1=P_{11}\delta\varepsilon_1+P_{12}\delta\varepsilon_2+B_{11}\delta\chi_1;\quad \delta M_2=P_{21}\delta\varepsilon_1+P_{22}\delta\varepsilon_2+B_{21}\delta\chi_1. \tag{12}$$

Принимая во внимание осевую симметрию конкретной рассматриваемой задачи и то, что оболочка нагружена внутренним давлением q, уравнения равновесия запишутся в виде:

$$\delta N_{1,1}=0;\ \ \delta M_{1,1}-\delta Q_{1,1}+w_{,1}\,\delta N_1+N_1\delta w_{,1}=0;.\ \ \delta Q_{1,1}-k_2\delta N_2+\delta q=0. \tag{13}$$

Проинтегрировав соотношения по толщине оболочки и подставив полученные зависимости для поперечной силы в уравнения равновесия, получаем три дифференциальных разрешающих уравнения в линеаризованной форме:

$$C_{11}(\lambda)[\delta u_{,1}+w_{,1}\,\delta w_{,1}]+D_{11}[\delta u_{,11}+w_{,11}\,\delta w_{,1}+w_{,1}\,\delta w_{,11}]+ \tag{14}$$

$$+C_{12}(\lambda)k_2\delta w+D_{12}k_2\delta w_{,1}-C_{11}(\lambda)z\delta w_{,11}-P_{11}\delta w_{1,11}=0;$$
$$C_{11}(\lambda)z[\delta u_{,1}+w_{,1}\,\delta w_{,1}]+P_{11}[\delta u_{,11}+w_{,11}\,\delta w_{,1}+w_{,1}\,\delta w_{,11}]+$$
$$+C_{12}(\lambda)zk_2\delta w+P_{12}k_2\delta w_{,1}-C_{11}(\lambda)z^2\delta w_{,11}-B_{11}\delta w_{1,11}-$$
$$-2C_{11}(\lambda)z[\delta u_{,11}+w_{,11}\,\delta w_{,1}+w_{,1}\,\delta w_{,11}]-C_{11}(\lambda)[\delta u_{,1}+w_{,1}\,\delta w_{,1}]-$$
$$-P_{11}[\delta u_{1,11}+w_{1,11}\,\delta w_{,1}+2w_{,11}\,\delta w_{,11}+w_{,1}\,\delta w_{1,11}]-2C_{12}(\lambda)zk_2\delta w_{,1}-C_{12}(\lambda)zk_2\delta w-$$
$$-P_{12}k_2\delta w_{,11}+2C_{11}(\lambda)z\delta w_{,11}+C_{11}(\lambda)z^2\delta w_{1,11}+B_{11}\delta w_{11,11}+$$
$$+w_{,1}\{D_{11}[\delta u_{,1}+w_{,1}\,\delta w_{,1}]+D_{12}k_2\delta w-P_{11}\delta w_{,11}\}+$$
$$+\delta w_{,1}\{D_{11}[u_{,1}+0{,}5w_{,1}^2]+D_{12}k_2w-P_{11}w_{,11}\}=0;$$

$$2C_{11}(\lambda)z[\delta u_{,11}+w_{,11}\,\delta w_{,1}+w_{,1}\,\delta w_{,11}]+C_{11}(\lambda)[\delta u_{,1}+w_{,1}\,\delta w_{,1}]+$$
$$-P_{11}[\delta u_{1,11}+w_{1,11}\,\delta w_{,1}+2w_{,11}\,\delta w_{,11}+w_{,1}\,\delta w_{1,11}]+$$
$$+2C_{12}(\lambda)zk_2\delta w_{,1}+C_{12}(\lambda)zk_2\delta w+P_{12}k_2\delta w_{,11}-$$
$$-2C_{11}(\lambda)z\delta w_{,11}-C_{11}(\lambda)z^2\delta w_{1,11}-B_{11}\delta w_{11,11}-$$
$$-D_{12}k_2[\delta u_{,1}+w_{,1}\,\delta w_{,1}]+D_{22}k_2^2\delta w-P_{21}k_2\delta w_{,11}+\delta q=0.$$

В процессе химической адсорбции водород распадается на атомы, которые затем проникают вглубь материала [5, 6]. Плотность потока J или количество вещества, проникающего за единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярную этому потоку, строго пропорциональна градиенту концентрации λ. Для малых перепадов концентрации водорода в среде возможно применение первого закона Фика, который гласит, что количество вещества, проникающее через воображаемое сечение, перпендикулярное направлению диффундирования, строго пропорционально величине градиента концентрации вещества в этом сечении, площади сечения и времени диффундирования:

$$J=-Dgrad\lambda=-D\frac{\delta\lambda}{\delta z} \tag{15}$$

где D – константа диффузии, z - координата в направлении диффузии.

В рассматриваемой задаче физически активная среда контактирует с оболочкой только по верхней или нижней поверхности, что приводит к одномерности процесса диффузии. Для поставленной одномерной задачи уравнение (15) запишется в виде первого закона Фика:

$$J=-D\delta\lambda_{,z},$$

Для титановых сплавов концентрация не влияет на коэффициент диффундирования, поэтому из первого закона Фика вытекает второй закон в виде:

$$\frac{\partial\lambda(z,t)}{\partial t}=D\frac{\partial^2\lambda(z,t)}{\partial z^2} \tag{16}$$

где t – текущее время.

Из выражения (16) очевидно, что скорость изменения процесса диффузии во времени зависит только от константы диффузии D. При процессе одностороннего диффундирования решение уравнения (16) имеет вид:

$$\lambda(z,t)=\lambda_1+(\lambda_2-\lambda_1)z/h+(2/\pi)\sum_{i=1}^{\infty}sin(i\cdot\pi\cdot z/h)\,exp(-F_o\pi^2i^2)\times$$
$$\times[\lambda_2\,cos(i\cdot\pi)-\lambda_1]/i \tag{17}$$

где $F_O=Dt/h^2$ – число Фурье; i – число членов ряда; λ_1 и λ_2 – краевые условия для концентрации среды сверху и снизу оболочки; h – толщина оболочки; z – координата по толщине оболочки.

Расчёты производились посредством пакетов математических прикладных программ Maple и MATLAB. Ниже представлены результаты расчёта цилиндрической оболочки, работающей в агрессивной водородной среде с разной концентрацией от 0 до 0,05%, с использованием предложенной модели.

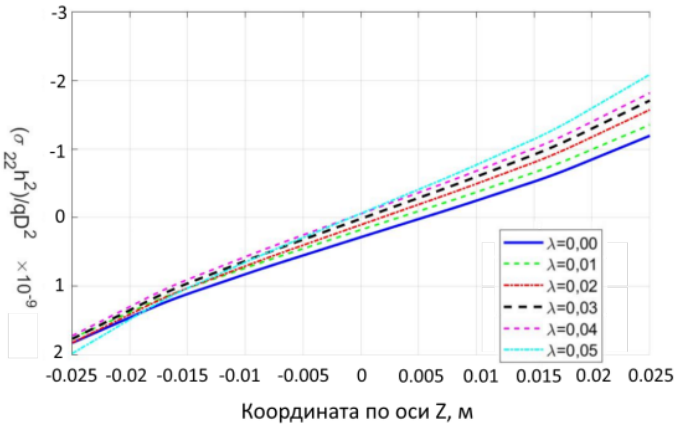


Рисунок 2 – Напряжения σ_{22} в точке края цилиндра (по толщине)

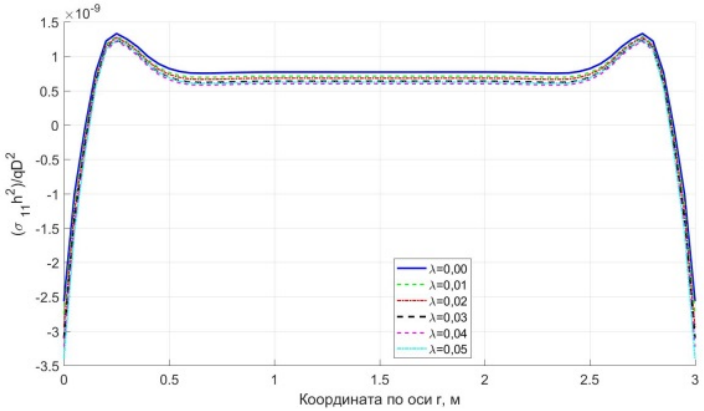


Рисунок 3 – Напряжения σ_{11} сверху вдоль образующей

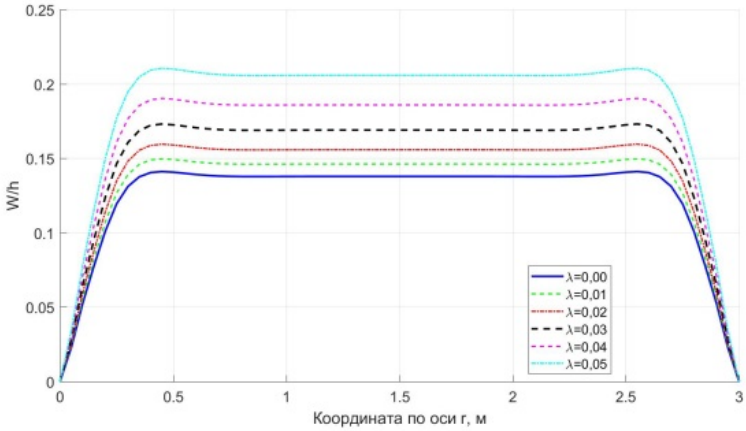


Рисунок 4 – Прогибы в оболочке

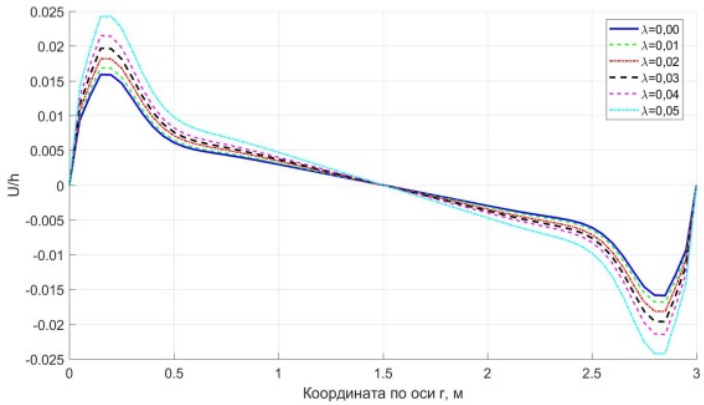


Рисунок 5 – Горизонтальные перемещения

Выводы

В результате исследования подтвердилась гипотеза, что в течение некоторого периода, соответствующего большим градиентам концентраций водорода, наблюдается интенсивное изменение характера напряженно-деформированного состояния, достигающее для напряжений 20% в сжатых и 24% в растянутых зонах. Колебания в напряжениях, полученных в работах Овчинникова И.Г., достигают иных величин и составляют 15% и 34%, соответственно. Количественные и качественные различия, полученные в результате сравнения, объясняются различными механизмами учета влияния вида напряженного состояния. В данном подходе используется достаточно гибкий механизм учета разносопротивляемости, и демонстрируется высокая точность согласования получаемых гипотез с экспериментальными данными по деформированию широкого круга материалов при сложных видах напряженного состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Овчинников, И.И. Модифицированная модель деформирования и разрушения материала, подвергающегося облучению // Строительная механика и расчёт сооружений, 2014. №1 С. 29-35.

3. Петров, В.В., Кривошеин И.В. Методы расчёта конструкций из нелинейно-деформируемого материала / Учебное пособие: – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. – 208 с.

4. Трещёв, А.А. Изотропные пластины и оболочки, выполненные из материалов, чувствительных к виду напряжённого состояния: монография / А.А.Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2013. – 249 с.

5. Трещёв, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведённой чувствительностью к виду напряжённого состояния. Определяющие соотношения: монография / А.А.Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 328 с.

УДК 532.546.6+66.047-912 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-408-412

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ ПЭТФ ОТ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА
STUDYING THE DEPENDENCE OF DUST FORMATION IN THE PROCESS OF DRYING BY PETS ON THE MODE PARAMETERS OF THE PROCESS

Геллер Юлия Александровна*, Антаненкова Ирина Сергеевна*,, Белоусов Александр Сергеевич****
Yulia A. Geller*, Irina S. Antanenkova*,, Alexandr S.Belousov****

** Национальный исследовательский университет "МЭИ", Россия, Москва*
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, Moscow
(e-mail: yul4@yandex.ru, antanenkovais@mail.ru)
***Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва*
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: as.belousov-2@yandex.ru)

Аннотация: Рассмотрены возможные способы пылеобразования при производстве гранулята полиэтилентерефталата и подготовке его к формованию. Выявлены особенности пылеобразования при сушке в активном гидродинамическом слое при различных скоростях и температурах.

Abstract: Possible methods of dust formation during the production of polyethylene terephthalate granulate and its preparation for molding are considered. The features of dust formation during drying in an active hydrodynamic layer at different speeds and temperatures are revealed.

Ключевые слова: пылеобразование, псевдоожиженный слой, гранулят полиэтилентерефталата

Keywords: dust formation, fluidized bed, polyethylene terephthalate granulate

Одним из побочных продуктов производства полиэтилентерефталата (ПЭТФ) является мелкодисперсный полиэфир, выход которого приводит к нарушению формования и прочностных свойств готового продукта. Основными местами (процессами) в технологической схеме, где образуется мелкодисперсный полиэфир, являются:

- грануляция аморфного ПЭТФ;
- предварительная кристаллизация гранулята;
- твёрдофазная поликонденсация ПЭТФ;
- хранение и фасовка ПЭТФ высоковязкого кристалличного;
- пневмотранспорт, переносящий гранулят из бункера;
- сушка, проходящая в активных гидродинамических режимах.

Гранулят аморфного ПЭТФ получается резанием жил полиэфира, образующихся в результате охлаждения водой струй расплава полиэфира, поступающих из фильер гранулятора. Процесс резания сопровождается образованием некоторого количества мелкодисперсного материала. Размер частиц составляет 100–800 мкм. В состав материала входят также более мелкие частицы неопределённой формы и некоторая часть крупных частиц с размером 1 мм и более. [1]

Предварительная кристаллизация происходит в режиме псевдоожижения, где гранулы проходят за 2-8 минут через активную зону с температурой 185–190°С. За это время острые грани гранул и налипшие на них частицы аморфного ПЭТФ начинают кристаллизоваться и твердеть, приобретая хрупкость, и отделяются в результате интенсивного движения и соударения.

Основной процесс кристаллизации, необходимый для достижения степени кристалличности 40%, развивается в кристаллизаторе в статических условиях при температуре 210–215 °С и при принудительном перемешивании валами-шнеками. При этом гранулят может испытывать механические нагрузки, которые приводят к частичной обратимой деформации и разрушению острых граней и углов гранул.

На стадии твёрдофазной поликонденсации в массе отдельно взятых гранул происходит рост длины цепей макромолекул ПЭТФ и выделение в результате реакции этиленгликоля (ЭГ). Этиленгликоль диффундирует к поверхности гранул, при этом скорость его диффузии больше скорости испарения.

Этиленгликоль, накапливаясь на поверхности гранул, частично вступает в реакцию гликолиза с макромолекулами ПЭТФ. В результате на поверхности гранул образуется тонкий слой олигомеров – молекул ПЭТФ, у которых число одинаковых звеньев n ≤6.

В процессе кристаллизации и поликонденсации плотность ПЭТФ повышается с 1,34 до 1,38 г/см3. Это приводит к уменьшению объёма гранул, и более хрупкий и непрочный олигомер отделяется с поверхности гранул в виде очень мелких (25–70 мкм) частиц, которые в результате реакции ЭГ превращаются в мелкодисперсный ПЭТФ.

Несмотря на то, что мелкодисперсный ПЭТФ соответствует по химическому составу грануляту, они не должны перерабатываться вместе, так как в итоге не получается гомогенного расплава.

Согласно [2] характеристическая вязкость пылевидных частиц (ПЧ) выше, чем основного полимера. По мнению [3], в процессе гранулирования и последующей сушки низкомолекулярные фракции ПЭТФ диффундируют к поверхности гранул, ухудшая их фрикционные свойства. Следует отметить, что по данным [2] кристалличность ПЧ выше, нежели полимерного субстрата гранул. Теплота плавления, Qпл, ПЧ составляет 20 кДж/кг, а гранулята ПЭТФ — 17,3 кДж/кг. Это обстоятельство приводит к уменьшению скорости плавления ПЧ при переводе ПЭТФ в расплав, следовательно, к снижению его гомогенности [4].

Статистический анализ пылеобразования при сушке гранулята ПЭТФ на производстве [5] синтетических комплексных нитей показал, что на каждую тонну переработанного гранулята образуется около 1,2 кг ПЧ, т.е. 0,12% (масс), причем в процессе сушки содержание ПЧ на гранулах увеличивается почти в 2 раза. В источнике [1] отмечено, что за весь технологический процесс пыли может выделиться до 0,7%. Известно, что уже при 0,2% пыли при формовании ухудшаются прочностные свойства готового изделия [2].

Было проведено исследование влияния скорости воздуха в вертикальных сушилках на динамику пылеобразования при сушке [5]. Эксперименты проводились для трех опытных партий гранулята (табл.1) при температурах 25°С и 165°С, в предположении, что до и после температуры стеклования полимер имеет разные фрикционные свойства.

Гранулы имеют форму цилиндра с эллиптическим сечением. Для расчетов используется диаметр равновеликого шара. Для более точных расчетов применяют коэффициент несферичности (фактор формы), равный отношению площади поверхности гранулы к площади поверхности равновеликого по объему шара f =Sr/Sш.

Таблица 1 – Гранулометрические характеристики опытных партий [6]

Характеристики	Образец		
	1	2	3
Геометрические размеры гранул:			
большая ось, a, мм	5,21	3,79	3,21
малая ось, b, мм	3,39	2,58	2,20
высота, h, мм	2,71	2,46	2,51
Диаметр равновеликого по объему шара, $d_э$, мм	4,16	3,30	2,98
Фактор формы, f *	1.19	1.18	1.17

Обработка статистических и экспериментальных данных дает возможность оценить влияние температуры, скорости движения осушающего агента, размеров частиц на пылеобразование.

Для характеристики гидродинамического режима через слой зернистого материала применяют модифицированный [7] критерий Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{w \cdot \overline{d_э}}{\nu} \qquad (1)$$

где $d_э$ – диаметр эквивалентного по объему гранулы шара.

Результаты эксперимента приведены на рис.1 (штриховые линии, соединяющие экспериментальные данные, приведены для наглядности).

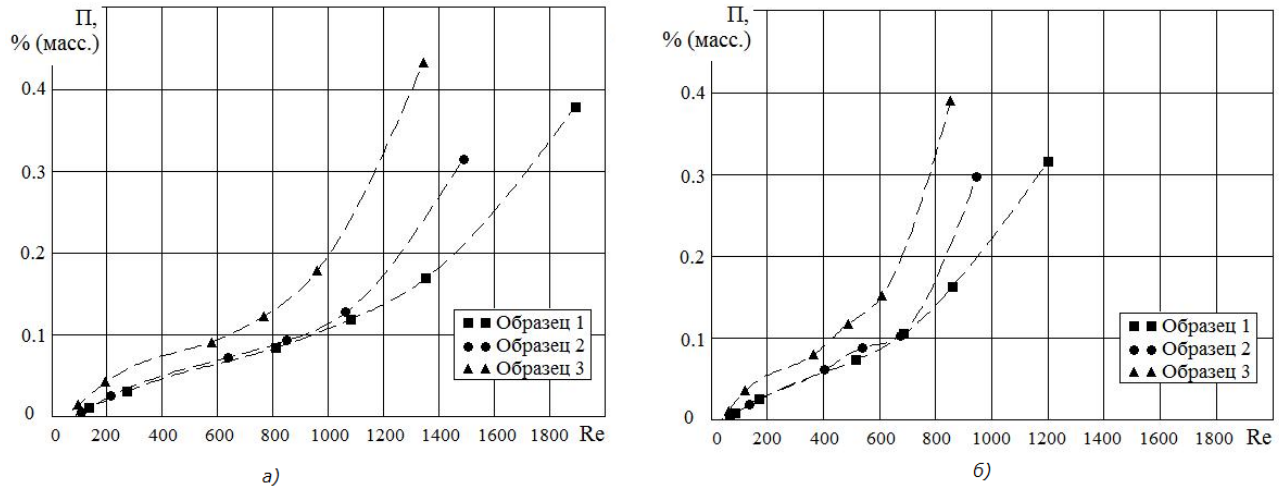


Рисунок 1 – Зависимость пылеобразования П,% от числа Re

Как видно из рисунка, при увеличении скорости воздушного потока, т.е. при интенсификации гидродинамических факторов при сушке, усиливается тенденция к пылеобразованию ПЭТФ. Также видно, что при 165 °С наблюдается отчетливая тенденция к некоторому уменьшению количества образующихся пылевидных частиц, что связано, по-видимому, с тем, что полимерный субстрат находится в высокоэластическом состоянии и способность гранулята к истиранию ослабляется [4]

Существенным фактором является также влияние на динамику пылеобразования гранулометрического состава, т.е. размера, формы и монодисперсности слоя.

Гранулы, наиболее склонные к пылеобразованию – наименьшего диаметра.

Как было указано выше, возможное количество пыли, которое не повлияет на дальнейший процесс – 0,2%. Такое выделение пыли обеспечивает скорость движения воздуха до начала витания. При этом, такая скорость обеспечит унос появившихся или уже существующих пылевидных частиц.

Для определения критической скорости и скорости витания применяют известные формулы:

- для вычисления числа Архимеда

$$Ar = \frac{g \cdot d_э^3}{\nu^2} \cdot \frac{(\rho_м - \rho_г)}{\rho_г}; \qquad (2)$$

- для определения критического значения критерия Рейнольдса [8]

$$\mathrm{Re}_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5.22 \cdot \sqrt{Ar}}. \qquad (3)$$

Согласно данным работы [9] для f=1..1,5 скорость витания вычисляется по уравнению:

$$\mathrm{Re} = \left[\left[8100 + 22.18 \cdot \left(11 - \frac{10}{f}\right) \cdot Ar\right]^{0.5} - 90\right] \cdot \left[2.77 \cdot \left(11 - \frac{10}{f}\right)\right]^{-1} \cdot \quad (4)$$

Результаты расчета величин (2) – (5) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики взвешенного слоя гранулята ПЭТФ при различных температурах

dэ, мм	Характеристики при температуре									
	25°C					165°C				
	$Ar \cdot 10^6$	$Re_{кр}$	$w_{кр}$, м/с	$Re_{в}$	$w_{в}$, м/с	$Ar \cdot 10^6$	$Re_{кр}$	$w_{кр}$, м/с	$Re_{в}$	$w_{в}$, м/с
4,2	3.216	298.83	1,105	1880	6,95	1,292	176,18	1,028	1187	6,92
3,3	1.561	197.02	0,927	1324	6,229	0,627	113,32	0,841	834	6,2
2,98	1.151	164.39	0,857	1151	6,0	0,462	93,41	0,768	725	5,96

Размер пылевидных частиц в зависимости от их происхождения может быть от 20х70 мкм (при грануляции) до 50х800 мкм (в активных гидродинамических режимах сушки и кристаллизации). Соответственно, скорость их уноса будет находится в диапазоне от 0,04 м/с до 0,12 м/с, что даже меньше критической скорости псевдоожижения.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что минимизация содержания пылевидных частиц на гранулах необходима для обеспечения стабильного процесса формования полиэфирных волокон и нитей. В процессах с активными гидродинамическими режимами с помощью различных пылеулавливателей гранулят частично освобождается от пылевидных частиц. Но необходимо, чтобы в последующих процессах пыли практически не образовывалось. Поэтому, для уменьшения образования пылевидных частиц во время сушки в шахтных сушилках, к скорости сушильного агента необходимо предъявлять следующие требования – она должна быть:

1. выше критической скорости псевдоожижения;
2. ниже скорости витания;
3. выше скорости уноса пылевидных частиц.

Выводы

1. С увеличением температуры количество пылевидных частиц незначительно уменьшается.

2. До начала скорости витания частиц количество пыли остается в допустимых пределах, т.е. минимально влияет на процессы формования. После достижения этой скорости количество пыли резко увеличивается. Это подтверждается экспериментальными данными и при температуре 25°C, и при 165°C.

3. Зависимость пылеобразования от гидродинамического режима имеет смысл описывать отдельными зависимостями: в пределах до $Re_{кр}$, от $Re_{кр}$ до $Re_{в}$, более $Re_{в}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химия и технология производства полиэтилентерефталата: уч. пособие / У. Р. Урманцев, Грудников И.Б., Табаев Б.В., Лакеев С.Н., Давыдова О.В.-2015. – 130 с.

2. Геллер В.Э. Высокоскоростное формование полиэфирных нитей. – Тверь, ТО К-ЖИ, 2000, 136 с.

3. Перепелкин К.Е. Полиэфирные волокна на рубеже третьего тысячелетия//Хим. Волокна, 2001, №5, с.3-7

4. Геллер Ю.А. Исследование и разработка инженерного метода расчета процесса глубокой сушки гранулированного полиэтилентерефталата дис. канд. тех. наук. Моск. гос. университет им. А.Н. Косыгина, Москва, 2002.

5. Реутский В.А., Булеков А.П., Геллер Ю.А. Влияние скорости воздушного потока при сушке на пылеобразование полиэтилентерефталата/ Сборник трудов ВНТК «Современные технологии и оборудование текстильной промышленности» (Текстиль-2002). - М., МГТУ, 2002

6. Акулич А.В., Гидродинамика шахтной сушки гранулированного полиэтилентерефталата//Акулич А.В., Геллер Ю.А.//Химические волокна. 2002. № 1. С. 37-40.

7. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты.–М.: Химия, 1995.–400 с.

8. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. – л.: Химия. 1981. – 296 с.

9. Муштаев В.И., Тимонин А.С., Лебедев В.Я. Конструирование и расчет аппаратаов со взвешенным слоем. – М.: Химия. 1991. – 344 с.

УДК 66.081.2.069.82: 532.529.5: 66.069.82: 66.074.51 DOI: 10.37816/eeste-2021-1-412-423

ТЕНДЕНЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕННЫХ АППАРАТОВ И ПЕННОГО РЕЖИМА
RESEARCH TRENDS IN SIEVE TRAYS AND DISTILLATION AND ADSORBTION EQUIPMENTS

Равичев Леонид Владимирович, Трушин Александр Михайлович, Яшин Виктор Евгеньевич
Leonid V. Ravichev, Alexander M. Trushin, Victor E. Yashin

Российский химико-технологический университет – РХТУ имени Д. И. Менделеева, Россия, Москва
Mendeleev University of Chemical Technology, Russia, Moscow
(e-mail: ravichevlv@muctr.ru)

Аннотация: Обзор публикаций по газожидкостным аппаратам с пенным режимом, вышедшим с 2000 г., обобщения основных направлений, интересующих исследователей и достигнутых результатов. Основным методом исследования пенного слоя стала вычислительная гидродинамика, однако наиболее распространённые модели основаны на эмпирических уравнениях для перекрестноточных тарелок с круглыми отверстиями Универсальные модели VOF-LES, из-за высокой требовательности к вычислительным ресурсам мало распространены. Аппараты с подвижной насадкой и центробежные пенные аппараты – две области вызывавшие особый интерес в РФ, но не получили распространения в мире. В исследованиях используются новые измерительные методы: гамма-сканирование, допплеровская интерферометрия и цифровая обработка высокоскоростных фотографий, пространственные зонды для определения структуры пенного слоя на тарелках промышленного масштаба.

Abstract: A review of publications on gas-liquid devices with a foam regime, published since 2000, generalizations of the main directions of interest to researchers and the results achieved. The main method for studying the foam layer has become computational fluid dynamics, however, the most common models are based on empirical equations for cross-flow trays with round holes. Apparatus with a movable nozzle and centrifugal foam apparatus - two areas of particular interest in the Russian Federation, but did not gain popularity in the world. The research uses new measuring methods: gamma scanning, Doppler interferometry and digital processing of high-speed photographs, spatial probes to determine the structure of the foam layer on industrial-scale trays.

Ключевые слова: пенный режим, пенный аппарат, тарелка колоны, контактные устройства, брызгоунос, CFD

Keywords: sieve trays, mixture mode, entrainment, CFD

Введение

Взаимодействие газов и жидкостей, весьма обширная и актуальная область исследований в химической технологии. В процессах дистилляции, абсорбции, пылеулавливания, выпаривания, теплообмена, требуется обеспечить интенсивное взаимодействие, и как можно более полное разделение жидкостей и газов. Исследование этих процессов продолжаются более ста лет и по-прежнему сохраняют актуальность [1].

Процессы взаимодействия газа и жидкости движущихся в разных направлениях на перфорированных преградах, было выделено в особый раздел химической технологии как науки в СССР [2], как «пенный режим и пенные аппараты», настоящая статья посвящена анализу проводимых исследований и проблем этой области.

В российской химической промышленности, основными источниками сведений о пенных аппаратах используемыми при проектировании являются [2, 3, 4], написанные в конце 80-х гг. прошлого века. В русскоязычной научно-технической литературе, за последние 30 лет не появилось сопоставимых трудов, обобщающих и систематизирующих результаты исследований по данной тематике, этим можно объяснить различия в популярности выбираемых направлений исследований по сравнению с мировыми, и различия в подходах к проектированию пенных аппаратов.

В англоязычной литературе, публикуются обзорные обобщающие работы по дистилляции и абсорбции, по которым можно составить представление о развитии знаний о пенных режимах и пенных аппаратах в последнее время [1, 5]. В русскоязычных изданиях не удалось обнаружить обобщающих обзорных работ по исследованиям пенного слоя и пенного режима.

Результаты поиска

Как замечено в [1], результаты поиска по электронным базам данных научных статей, зависят от ключевых слов в поисковом запросе. Примем во внимание, что в англоязычных источниках [6, 7], аппараты с пенным режимом не выделены в отдельную область исследований с чёткими границами, рассматриваются в целом направление «дистилляция и абсорбция», внутри которого существует область проблем ситчатых лотков (перфорированных тарелок колонным аппаратов).

Результаты поиска в scholar.google.ru, ebibrary.ru, ciberleninka.ru по ключевым словам «пенный слой», «пенный аппарат», «подвижная насадка», представлены в таблице 1. Результаты поиска в sciencedirect.com, scholar.google.ru по ключевым словам «sieve tray» представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты поиска по ключевым словам «пенный слой», «пенный аппарат».

Характерная область исследований	Кол.	Ссылки
Теоретическое описание процессов в пенном слое пылеулавливания, абсорбции, тепломассообмена	5	[8, 9, 10, 11, 12]
Пенные аппараты с подвижной насадкой: новые виды насадочных тел, влияния свойств жидкости и газа на эффективность процесса	6	[13, 14, 15, 16, 17, 18]
Теория численного моделирование пенного слоя	1	[19]
Центробежные пенные аппараты	1	[20]
Новые конструкции тарелок пенных аппаратов	1	[21]
Гидродинамические режимы работы пенных тарелок, щелевых, из труб круглого сечения.	1	[22]

Таблица 2 – Результаты поиска по ключевым словам «sievetray».

Характерная область исследований	Кол.	Ссылки
Моделирование пенного слоя методами вычислительной гидродинамики (CFD).	19	[23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41]
Новые конструкции тарелок пенных аппаратов	10	[42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51]
Исследования брызгоуноса	8	[52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59]
Исследования эффективности дистилляционной тарелки	4	[60, 61, 62, 63]
Исследование структуры пенного слоя на тарелке промышленного масштаба	2	[64, 65]

Моделирование пенного слоя методами CFD

В работах [23, 24, 25], была предложена методика моделирования пенного слоя CFD, на основе решения системы уравнений Навье-Стокса осреднённых по Рейнольдсу (RANS) методом конечных объемов, в дальнейшем получившая распространение во многих работах. Корреляция экспериментальных данных по высоте пенного слоя на перекрестноточной (с переливом) ситчатой тарелке с круглыми отверстиями, известная как корреляция Бенета 1983г.:

$$\varepsilon_L^B = exp\left(-12{,}55\left(U_G\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L-\rho_G}}\right)^{0{,}91}\right) \qquad (1)$$

$$\varepsilon_G^B = 1-\varepsilon_L^B$$

где ε_L^B – объемная доля жидкости в пенном слое, ε_G^B – объемная доля газа в пенном слое U_G – скорость газа, приведённая к свободному сечению аппарата, м/с, ρ_G – плотность газа кг/м^3, ρ_G – плотность жидкости кг/м^3. Принимая скорость движения газового пузырька в пенном слое постоянной, из равенства силы Архимеда и силы сопротивления получаем:

$$C_D = \frac{4}{3}\frac{\rho_L-\rho_G}{\rho_G}\mathrm{g}\cdot d_G\frac{1}{{V_{slip}}^2} \qquad (2)$$

$$V_{slip} = U_G/\varepsilon_L^B$$

где C_D – коэффициент лобового сопротивления пузырька, g – ускорение свободного падения, d_G – диаметр пузырька. Уравнение (2) дает весьма малые значения C_D в зонах с высокой долей газа и скоростью газа, значительно ниже характерного значения 0,4 для одиночной обтекаемой сферы, что отражает характер течения где газ движется в виде струй или плотных групп сливающихся и дробящихся пузырей, с малым сопротивлением со стороны жидкости.

Уравнение обмена импульсами между фазами, для двухфазной модели взаимопроникающих сред Эйлера:

$$\overrightarrow{M_{L,D}} = \frac{3}{4}\rho_L\cdot\frac{\varepsilon_G^B}{d_G}\cdot C_D\cdot\left(\overrightarrow{U_G}-\overrightarrow{U_L}\right)\left|\overrightarrow{U_G}-\overrightarrow{U_L}\right| \qquad (3)$$

В уравнении (1) используются усреднённые значения по тарелке, и формулам (2) и (3) вычисляются локальные переменные во всей расчетной области, тем не менее, результаты моделирования показывают распределение газа и жидкости по модели весьма близкое к пенному режиму. Так же, из (2) и (3) можно видеть, что методика не чувствительна к задаваемому диаметру пузырька d_G, что позволяет подбирать этот параметр, добиваясь соответствия модели другим параметрам реального процесса.

Данный метод не может дать новых данных по высоте чистой жидкости на тарелках других конструкций (т.к. основан на корреляции экспериментальных данных для ситчатой тарелки с круглыми отверстиями), однако широко используется для уточнения времени пребывания жидкости на тарелке, моделировании процесса с учетом массообмена,

пылеулавливания. В работе [26], вышеназванная методика моделирования пенного слоя, реализована в программе Ansys, которая использована в большей части работ.

В работах [27, 28], вышеназванная методика используется исследования и проектирования колонны с внутренней разделительной стенкой (DWC - колона), проводятся оптимизация размеров внутренних устройств.

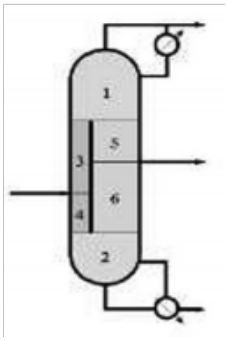


Рисунок 1 – Колонна с внутренней стенкой (DWC).

В работе [29], используются различные уравнения для C_D в расчетной области, для пространства над тарелкой [25], для зоны под тарелкой полуэмпирическая зависимость коэффициента лобового сопротивления для одиночной частицы. При этом исследуются структура потока жидкости на тарелке, отмечается неравномерный и колебательный характер распределения зон с большим содержанием жидкости на тарелке и зон провала жидкости.

В работе [30], исследуются пенные тарелки с «неподвижными клапанами», по аналогичной методике, однако коэффициенты эмпирического уравнения (1) изменены на основании экспериментальных данных для данной конкретной конструкции тарелки. Проведена оптимизация конструкции тарелки.

В работах [31], [32], [33] аналогичная двухфазная CFD модель реализована с учетом массообмена между фазами. Моделируется дистилляция метанол-пропанольной смеси [31], [32], и абсорбция окиси углерода жидким азотом [33].

В работе [34], проведено моделирование лотка колоны реактивной дистилляции (процесс получения метилацетата из уксусной кислоты и метанола в процессе ректификации сопровождающейся химическими реакциями). Примечателен ряд приемов, упрощающих растет такой сложной модели: выбрана самая простая геометрическая модель 2,5D средняя между 2D и 3D геометрической моделью, весьма грубая сетка, модель многофазная Эйлера модель турбулентности RAS k-e, расчет массообмена проводился в два этапа – сначала моделируются химические реакции, результаты затем используются как начальные условия для моделирования с учетом испарения-конденсации).

В работе [35] проведено моделирование улавливания частиц в однополочном пенном абсорбере с перекрестноточной пенной тарелкой. Фазы жидкости и газа используют модели Эйлера, частицы модель Лагранжа. Определена эффективность улавливания, как доля частиц покидающая аппарат вместе с жидкостью.

Недостаток данной методики заключается в том, что она основана на экспериментальных данных конкретной конструкции пенной тарелки, полученных в узком диапазоне нагрузок по жидкости и газу. Так в работах [36, 37], моделируется процесс улавливания SO_2 раствором MgOH, в колоне с противоточными перфорированными тарелками, при этом режим работы колоны (скорость газа 1,6 м/с, площадь перфорации тарелок 34,3%, отношение массовых расходов жидкости и газа 4,8 и 3,2 кг/кг), соответствуют режиму работы тарелки, при котором на ней не образуется пенного слоя. Поэтому для лобового сопротивления, оправдано используется уравнения для одиночной капли:

$$C_D = max\left(\frac{24\left(1 + 1{,}5Re_r{}^{0{,}687}\right)}{Re_r}, 0{,}4\right)$$
$$Re_r = \frac{\rho_G|U_G - U_L|d_L}{\mu_G} \quad (4)$$

где d_L= 500 мкм диаметр капли, подобранный авторами для моделирования, μ_G – вязкость газа, Па·с.

Представляют интерес методы моделирования, в которых уравнения межфазного взаимодействия не основаны на экспериментальных данных, связанных с конкретной

конструкцией пенной тарелки, что позволило бы применять их в более широком диапазоне конструкций внутренних устройств пенных аппаратов.

В работе [38], для пенного моделирования пенного слоя используется алгоритм на основе решёточных уравнений Больцмана, характер смоделированного газо-жидкостного режима близки к экспериментальным данным.

В работе [39], проведено CFD моделирование перекрестноточной тарелки методом объемной доли жидкости (VOF) с моделированием турбулентности методом больших вихрей (LES) и проведено сравнение с известными корреляциями, экспериментальными данными и результатами моделирования методом RAS. Проведен анализ корректности использования модели по доле турбулентной кинетической энергии, моделируемой в надсеточном масштабе (выше 80%). Проведен анализ размеров полученных при моделировании крупных капель жидкости (DSD), размером не менее размера конечного элемента и не более 50 мм, и зависимость распределения размеров от гидродинамических режимов тарелки.

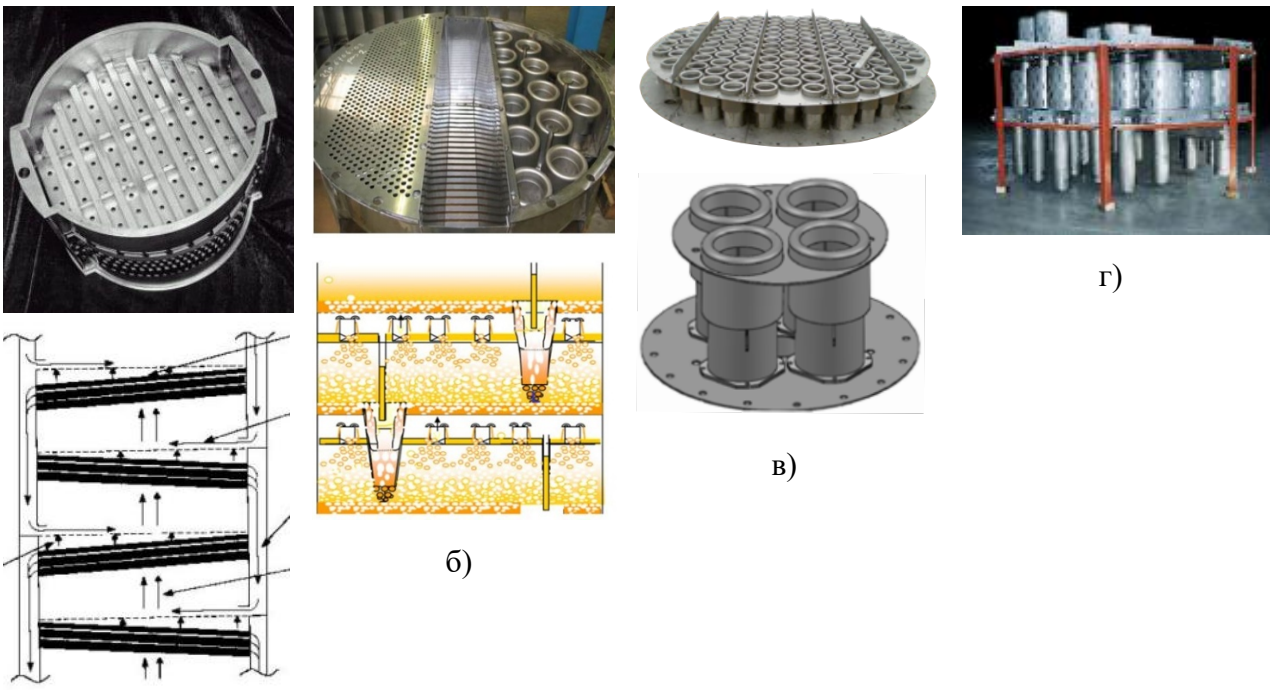
В работе [40], CFD моделирование используется для определения характерных значений диаметра пузырьков газа и скорости всплытия, которые затем использованы в полуэмпирической модели эффективности пенной тарелки. Используется двухфазная модель VOF с моделью турбулентности k-ε.

В работе [41] рассматриваются методы подавления нежелательного пенообразования на пенных тарелках, возникающего из-за присутствия поверхностно-активных веществ, методами CFD моделируется распространение ультразвуковых колебаний в пространстве между тарелками и над зоной «сухой» пены в которой жидкость присутствует в виде тонких плоских пленок, использована модель VOF.

В целом, моделирование VOF-LES используется гораздо реже из-за значительно более высоких требований к вычислительным ресурсам.

Новые конструкции пенных тарелок

В работах [42], [43] проводится обзор конструкций высокоэффективных пенных тарелок Shell Swirltube, Jaeger COFLO, Koch-Glitsch ULTRA-FRAC, Shell ConSep, предлагаемыми известными производителями промышленного оборудования (рисунок 2).



а) б) в) г)

Рисунок 2 – Новые конструкции пенных тарелок, промышленное применение:
а) Jaeger COFLO, б) Shell ConSep Sulzer, в) Shell Swirltube Sulzer, г) Koch-GlitschULTRA-FRAC.

Показано, что эффективность тарелок, в целом соответствует известной корреляции эффективности ступени О'Конела, 1946 г., полученной для ситчатых тарелок с круглыми отверстиями:

$$E_{OC} = 0{,}492(\mu_L \alpha)^{-0{,}245} \quad (5)$$

где, μ_L – вязкость жидкости, α – относительная волатильность.

Таблица 3 – Эффективность ступени новых тарелок.

Конструкция лотка	Процесс	Эффективность ступени (%)	
		Эксперимент	Уравнение (5)
Shell ConSep Sulzer	IC4/nC4, 11 bar	89	82
Jaeger COFLO	C6/C7, 0,33 bar	60	55
	C6/C7, 1,06 bar	70	58
	C6/C7, 1,66 bar	75	63
Koch-GlitschULTRA-FRAC	Деэтанизация	85	82
	Депропанизация	78 .. 82	79
	Дебутанизация	75 .. 85	69

В работах [44, 45] предлагается новая тарелка, имеющая меньший перепад давления и большую эффективность по сравнению с тарелками известных конструкций (рисунок 3а, 3б). В работах [46, 47], предлагается газожидкостный аппарат, который может быть использован как пенный абсорбер с противоточными тарелками (рисунок 3г). В работе [48] исследуется пенный режим на тарелке их вспененного карбида кремния с открытой пористостью, данный материал может представлять интерес в процессах, где требуется высокая коррозионная и термическая стойкость, рисунок 3в.



а) б) в) г)

Рисунок 3 – Новые конструкции пенных тарелок, проектируемые:
а) тарелка FJPT, б) тарелка NVST, в) тарелка из вспененной керамики (SiC), г) тарелка TRST

В работе [49], исследуется дистилляционная колона с интегрированным нагревом (HIDiC). Для интенсификации процесса дистилляции осуществляется подвод или отвод тепла непосредственно к ситчатой тарелке, внутри которой выполнены каналы для теплоносителя. Показано что охлаждение тарелки не оказывает заметного влияния не эффективность массообмена, тогда как нагрев тарелки увеличивает эффективность.

В работе [50], исследовано влияние гидрофильных и гидрофобных покрытий ситчатой тарелки пенного аппарата. Предложен лоток с комбинированным покрытием, гидрофильным на верхней (плоской) поверхности тарелки, и гидрофобным внутри перфорационных отверстий и на нижней поверхности. Показано что такой лоток имеет меньший расход провала жидкости в отверстия по сравнению с полностью гидрофильными или гидрофобными покрытиями.

В работе [51], предлагается новая конструкция тарелки ситчато-клапанная. На основе экспериментальных исследований показано, что тарелка имеет более высокий верхний предел скорости газа на 20% и эффективность на 7% выше известных видов клапанных тарелок. Заявлено промышленной использование для перегонки высоковязких смесей.

В работе [21] предлагается пенная тарелка, с элементами - завихрителями, установленными в перфорационных отверстиях.

Исследование брызгоуноса с пенных тарелок

В работе [52], исследуется брызгоунос из пенного слоя на тарелках различных конструкций. Предлагается использовать две различные зависимости для режимов работы тарелки с малой нагрузкой по жидкости («Низкой пены»), и режима с большой нагрузкой по жидкости («Высокой пены»), т.к. в этих режимах характер зависимости расхода брызгоуноса от скорости газа различный. Похожий подход использован в работе [53] в которой предложена полуэмпирическая методика расчета брызгоуноса из пенного слоя на основе представлений о трехзонной структуре пенного слоя на тарелке: зона струй вблизи поверхности тарелки, выше неё зона смеси, верхняя – зона брызг, причем в зависимости от нагрузки трехзонная структура может переходить к двухзонной с исчезновением зоны смеси.

В серии работ [54, 55, 56], приведены результаты экспериментов по измерению брызгоуноса с пенной тарелки, для нескольких видов жидкостей и газов. Исследовалось влияния свойств жидкостей и газов (плотности, вязкости, поверхностного натяжения) на расход брызгоуноса. Показано что известные корреляции, хорошо предсказывают величину уноса для воды и воздуха, но недостаточно точно предсказывают унос для других сред. В работе [57] исследовано влияние диаметра отверстий в тарелке. Предложены коррективы в эмпирические корреляции брызгоуноса, учитывающие свойства жидкости и газа.

В работе [58], исследуется брызгоунос из пенного слоя, с использованием автоматической обработки цифровых скоростных фотографий. Так же в данной работе исследовано различие «традиционных» ситчатых тарелкок от тарелок с «неподвижными клапанами» (рисунок 4).

Показано, что для идентичных нагрузок по газу и жидкости, брызгоунос для таких тарелок ниже, чем для тарелок с простыми круглыми отверстиями.

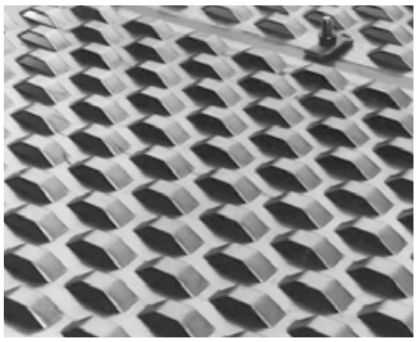


Рисунок 4 – Пенная тарелка с неподвижными клапанами.

Работа [59] представляет интерес новым методом исследования дисперсного состава брызгоуноса из распылительной колоны, который может быть применён и к пенным аппаратам. Размер и скорость аэрозольных частиц анализируется методом доплеровской интерферометрии (так же известным как лазерная дифракция дисперсных частиц).

Работы [58], [59], стали первыми за долгое время исследованиями дисперсионного состава аэрозольный частиц уноса, основанными на новых возможностях измерительной техники, что позволяет точно прогнозировать эффективность туманоуловителя (брызгоуловителя) колонного аппарата на стадии проектирования, и определять конечное содержание выбросов из пенных абсорберов.

Эффективность тарелки

В работе [60], проводится обзор известный корреляций эффективности клапанных тарелок и проведен анализ, прогнозирующий точность корреляций по экспериментальным данным базы данных FRI.

В работе [61] предлагается новая эмпирическая формула определения эффективности тарелки, учитывающая: высоту сливного порога, длину тарелки, диаметр отверстий и площадь свободного сечения. Модель протестирована на базе экспериментальных данных научно-коммерческого партнёрства FRI.

Отмечается [61, 60], что в практических инженерных расчетах, и в программных пакетах для технологического моделирования для оценки эффективности процессов ректификации и абсорбции, чаще всего применяют либо постоянную величину КПД Мерфри, либо весьма простые уравнения (5) При этом, хотя расчеты дают заниженное значение эффективности, оно является более достоверным и проверенным.

В работе [62] предложена новая оценка эффективности тарелки, на основе экспериментальных данных для диапазона вязкости жидкости от 0,2 до 4,2 мПа*с, с учетом диаметра отверстия тарелки и высоту перелива.

В работе [63], используя модель трехслойной пены. Предложена методика расчета эффективности ситчатой тарелки, которая более точно совпадает с экспериментальными данными для углеводородных смесей (циклогексан/n-гептан, изобутан/n-бутан).

Теоретические исследований пенного слоя

В работе [8] предложена полуэмпирическая формула для расчета эффективности очистки воздуха в пенном слое от частиц пыли, на основе энергетических показателей взаимодействия частиц пыли с поверхностью пузырька пены. В работах [9, 10] предложены полуэмпирические формулы расчета коэффициентов массообмена и теплообмена в пенном слое для центробежных пенных аппаратов и пенных аппаратов с решётками с круглыми отверстиями. В работе [11] предлагается полуэмпирическое выражение для величины удельной межфазной поверхности и размера пузырей центробежного пенного аппарата. В работе [12] предлагается теоретическое выражение для КПД тарелки колонного аппарата.

Пенные аппараты с подвижной насадкой

В работе [13], показано, что использование насадочных тел сложной формы с большим соотношением площади поверхности к объему, по сравнению со сферической формой, увеличивает удельную поверхности контакта фаз газа и жидкости. В работе [14] приводится методика расчета двухполочного абсорбера с подвижной насадкой, которую предлагается использовать для оптимизации конструктивных параметров. В работе [15] исследуется поверхность контакта фаз в аппарате с подвижной насадкой. В работе [16], утверждается что эффективность улавливания пыли в аппарате с подвижной насадкой не зависит от размера частиц пыли в диапазоне 1,5..100 мкм. В работе [17] экспериментально исследуется влияние размеров насадочных тел на интенсивность процесса абсорбции в аппарате с подвижной насадкой оригинальной конструкции. В работе [18] разработан новый вид насадочных тел для абсорберов с подвижной насадкой в виде шарообразных сетчатых тел.

Исследования пенного слоя на тарелках промышленного масштаба

В работе [64] исследуется время пребывания жидкости на тарелке, с помощью оригинального сетчатого зонда, расположенного по всей площади тарелки колоны диаметром 800 мм, измеряющего наличие индикатора в жидкости который импульсно вводится в поток жидкости в установившемся режиме работы. Показано что скорости движения жидкости по тарелке имеют устойчивый неоднородный характер, по центральной оси жидкость наиболее быстро покидает тарелку, ближе к стенкам скорости жидкости снижаются.

В работе [65] представлены экспериментальное измерение усреднённой по времении доли жидкости в пенном слое на тарелке в трех измерениях. Проведена визуализация распределения вводимого индикатора по структуре пенного слоя.

Остальные исследования

В работе [19] предложена методика численного моделирования пенного слоя на основе теории случайных блужданий. В работе [20] предлагается полуэмпирическая зависимость для расчета сопротивления центробежных пенных аппаратов. В работе [22] приводятся эмпирические формулы высоты пенного слоя на противоточных трубчатых решётках полученные для диапазона скоростей газа до 3,6 м/с.

Выводы

Вычислительная гидродинамика, стала одним из основных методов исследования пенных аппаратов, при том что в русскоязычных научных публикациях мало представлена. Большая часть работ CFD, двухфазная взаимопроникающих сред модели турбулентности RANS, основаны на корреляции эмпирических данных по высоте чистой жидкости на определённой конструкции тарелки, и не имеют универсального характера, хотя могут использоваться для моделирования массообмена на тарелке. Универсальные модели VOF-LES, из-за высокой требовательности к вычислительным ресурсам мало распространены, хотя

могут использоваться для предсказания чистой высоты жидкости на тарелке при неполноте экспериментальных данных.

При сравнении с обзорами исследований в англоязычных журналах видно, что аппараты с подвижной насадкой и центробежные пенные аппараты – два вида аппаратов вызывающих особый интерес в РФ. Известно, что абсорберы с подвижной насадкой, установленные на российских химических производствах, были реконструированы на аппараты с ситчатыми тарелками из-за разрушения насадочных тел от износа, и трудностей с их заменой.

Расширение диапазона допустимых нагрузок пенных аппаратов, за счет усложнения конструкции пенных тарелок, позволяет снижать диаметры колонных аппаратов, но эффективность ступени таких тарелок, особенно в проектных расчётах, остается почти на прежнем уровне.

Продолжается накопление и анализ экспериментальных данных параметров пенного режима, для более широкого диапазона свойств сред, конструкций тарелок, нагрузок.

В исследованиях пенного режима используются новые измерительные методы: гамма-сканирование для определение высоты пенного слоя в промышленных аппаратах, допплеровская интерферометрия и цифровая обработка высокоскоростных фотографий для измерения дисперсионного состава брызгоуноса, пространственные зонды для определения структуры пенного слоя на тарелках промышленного масштаба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taylor R. Still modeling after all these years: a view of the state of the art. The international conference Distillation and Absorption. London, UK, 2006.

2. Тарат Э.Я., Мухлёнов И.П., Туболкин А.Ф., Тумаркина Е.С. Пенный режим и пенные аппараты. // Л. : Химия, 1977.

3. В.М. Рамм. Абсорбция газов. Изд. 2-е, переработ. и доп. // М. : Химия, 1976.

4. Заминян А.А., Рамм В.М. Абсорберы с псевдоожиженной насадкой. // М. : Химия, 1980.

5. Z. Oluji, M. Jödecke, A. Shilkin, G. Schuch, B. Kaibel. Equipment improvement trends in distillation. Chemical Engineering and Processing 48 (2009) 1089–1104.

6. Binay K. Dutta. Principles of mass transfer and seperation processes. PHI Learning Pvt. Ltd., 2007.

7. Andrzej Gorak, Zarko Olujic. Distillation: Equipment and Processes. Academic Press is an imprint of Elsevier. 2014.

8. Беспалов В.И., Гурова О.С. Математическое описание результирующих параметров процесса обеспыливания отходящих газов и вентиляционного воздуха слоем пены. Символ науки. 2015, №3. С. 79-82.

9. Шиляев М.И., Толстых А.В. Моделирование процессов абсорбции газов в барботажных аппаратах. Теплофизика и аэромеханика. 2013, том 20 № 5. С. 1-14.

10. Шиляев М.И., Толстых А.В., Хромова Е.М. Уточнение моделей тепломассообмена в пузырях, формирующихся на отверстиях газораспределительных решёток пенных и центробежно-барботажных аппаратов. Теплофизика и аэромеханика, 2006, том 13, № 1. С. 107-113.

11. Кисс В.В. Теоретическое описание величины поверхности контакта фаз при интенсивном барботаже. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия "Процессы и аппараты пищевых производств". 2014, № 2. С. 1-5.

12. Елизаров В.И., Елизаров Д.В., Мерзляков С.А., Дьяконов С.Г. Определение эффективности колонных массообменных аппаратов на основе аналогии переноса импульса и массы в барботажном слое на тарелках. Теоретические основы химической технологии. 2012, том 46, №5. Стр. 483.

13. Данько В.П., Карнаух В.В. Исследование влияния концентрации раствора абсорбента на охлаждающую способность тепломассообменных аппаратов с подвижной насадкой. Вестник международной академии холода. 2016, №3, стр. 73-76.

14. Беккер В.Ф., Киссельман И.Ф.. Математическое моделирование абсорбции аммиака в колонне с вращающейся подвижной насадкой. Научно-технический вестник поволжья. 2011, №1, стр. 76-85.

15. Беккер В.Ф. Выбор формы внешней поверхности насадочных тел в аппарате с вращающейся подвижной насадкой. Научно-технический вестник поволжья. 2011, №6, стр. 100-102.

16. Садырева Ю.А., Киссельман И.Ф., Беккер В.Ф. Обеспыливание промышленных абгазов в аппаратах с подвижной насадкой. Научно-технический вестник поволжья. 2014, №3, стр. 221-224.

17. Леонтьев В.К., Барашева М.А. Оценка эффективности работы газожидкостного эжекционного аппарата с подвижной насадкой. Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология. 2013, №2. Стр. 111-114.

18. Кузнецова Н.А. Интенсификация абсорбционной очистки газовых выбросов в аппаратах с объемной сетчатой псевдоожиженной насадкой. Автореферат диссертации на соискание уч. степени кандидата наук. Ивановский государственный химико-технологический университет. 2007.

19. В.Е. Алемасов, М.Х. Бренерман, А.Р. Кессель, Я.И. Кравцов. Моделирование процессов в "слабо" перемешенных многофазных средах с помощью случайных блужданий. Модели «блуждающих фаз» и «блуждающих волн». Математическое моделирование. 1996, том 8, №5, стр. 37-50.

20. Заварухин С.Г., Кувшинов Г.Г., Кузнецов М.А., Смирнов Н.П. К вопросу о сопротивлении центробежно-барботажных аппаратов. Теплофизика и аэромеханика. 1999, том 6, № 1, стр. 95-104.

21. Спинов В.В., Афтанюк В.В. Экспериментальные исследования кинетики мокрого пылеуловителя. Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2011, №84. Стр. 32-36.

22. Бабенко В.Н., Деменкова С.Д. Исследование гидродинамических режимов работы пенного аппарата на трубчатых решётках со стабилизатором пены. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2009, 4/g (40), стр. 4-6.

23. R. Krishna, J. M. Van Baten, J. Ellenberger, A. P. Higler, R. Taylor. CFD simulations of sieve tray hydrodynamics. Institution of Chemical Engineers. Trans IChemE, Vol 77, Part A, October 1999.

24. J. M. Van Baten, R. Krishna. Modelling sieve tray hydraulics using computational fluid dynamics. Chemical Engineering Journal 77 (2000) 143–151.

25. R. Krishna and J. M. Van Baten. Modelling sieve tray hydraulics using computational fluid dynamics. Institution of chemical engineers. Trans IChemE, Vol 81, Part A, January 2003.

26. Ali Zarei, Seyyed Hossein Hosseini, Rahbar Rahimi. CFD study of weeping rate in the rectangular sieve trays. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 44 (2013) 27–33.

27. Mitra Sadat Lavasania, Rahbar Rahimib, Mortaza Zivdarb. Hydrodynamic study of different configurations of sieve trays for a dividing wall column by using experimental and CFD methods. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification 129 (2018) 162–170.

28. Mario A. Rodríguez-Ángeles, Fernando I. Gómez-Castro, Juan G. SegoviaHernández, Claudia Gutiérrez-Antonio, Abel Briones-Ramírez. Mechanical Design and Hydraulic Analysis of Sieve Trays in Dividing Wall Columns. Proceedings of the 24th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE24 June 15-18, 2014, Budapest, Hungary.

29. Ali Zarei, Seyyed Hossein Hosseini, Rahbar Rahimi. CFD and experimental studies of liquid weeping in the circular sieve tray columns. chemical engineering research and design 91 (2013) 2333–2345.

30. Hongkang Zhao, Lun Li, Junsu Jin, Qunsheng Li . CFD simulation of sieve-fixed valve tray hydrodynamics. Chemical Engineering Research and Design 129 (2018) 55–63.

31. Rahbar Rahimi, Maryam Mazarei Sotoodeh, Elahe Bahramifar. The effect of tray geometry on the sieve tray efficiency. Chemical Engineering Science 76 (2012) 90–98.

32. Sadegh Abbasnia, Zarrin Nasria, Mohammad Najafi. Comparison of the mass transfer and efficiency of Nye tray and sieve tray by computational fluid dynamics. Separation and Purification Technology 215 (2019) 276–286.

33. Zhang Haonan, Zhang Cunquan, Zhang Meng, Song Peng-cheng. Simulation of heat-mass transportation characteristics for removal of CO in a liquid nitrogen wash sieve plate column. Cryogenics 106 (2020) 103022.

34. Galih Bangga, Felicia Januarlia Novita, Hao-Yeh Lee. Evolutional computational fluid dynamics analyses of reactive distillation columns for methyl acetate production process. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification 135 (2019) 42-52.

35. Siao-Han Huang, Jia-Lin Kang, David Shan-Hill Wong, Shi-Shang Jang, Chao-An Lin. Particle-Scavenging prediction in sieve plate scrubber via dimension reduction in computational fluid dynamics. Chemical Engineering Research and Design 160 (2020) 540–550.

36. Chien-Chou Tseng, Cheng-Jui Li. Eulerian-Eulerian numerical simulation for a flue gas desulfurization tower with perforated sieve trays. International Journal of Heat and Mass Transfer 116 (2018) 329–345.

37. Chien-Chou Tseng, Cheng-Jui Li. Numerical investigation of the inertial loss coefficient and the porous media model for the flow through the perforated sieve tray. chemical engineering research and design 106 (2016) 126–140.

38. Noelia Llorente-Remartínez and Santos Galána. CFD simulation of sieve tray hydraulics using the lattice Boltzmann method. Proceedings of the 27th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 27. October 1st - 5th, 2017, Barcelona, Spain.

39. Aldo Malvin, Andy Chan, Phei Li Lau. CFD study of distillation sieve tray flow regimes using the droplet size distribution technique. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 45 (2014) 1354–1368.

40. Mayra Margarita May-Vázquez, Mario Alberto Rodríguez-Ángeles, Fernando Israel Gómez-Castro, Jesús Espinoza-Zamora, Edilberto Murrieta-Luna. Development of a mass transfer model for the rate-based simulation of a batch distillation column. Computers and Chemical Engineering 140 (2020) 106981.

41. Mazen A. Alhodali. Description of the Preliminary Proposals and Modeling for Applying the Mechanical Foam Breakers Techniques in the Processing Trays Columns. Journal of Environmental Chemical Engineering 8 (2020) 104344.

42. P. Wilkinson, E. Vos, G. Konijn, H. Kooijman, G. Mosca, L. Tonon. Distillation trays that operate beyond the limits of gravity by using centrifugal separation. Chemical Engineering Research and Design. Trans IChemE, Part A, January 2007.

43. Yang Quan, Giuseppe Mosca and Mario Roza. Characteristics of Trays Using Inertial Separation Technology. Chinese Journal of Chemical Engineering, 18(6) 954—961 (2010).

44. Miao Zhang, B.Y. Zhang, H.K. Zhao, Yue Zhao, Jun Sun, Z.Q. Ren, Q.S. Lia. Hydrodynamics and mass transfer performance of flow-guided jet packing tray. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification 120 (2017) 330-336.

45. Hongkang Zhao, Lun Li, Baohua Wang, Dan Yu, Qunsheng Li. Hydrodynamics performance and tray efficiency analysis of the novel vertical spray packing tray. Chinese Journal of Chemical Engineering 26 (2018) 2448–2454.

46. Meng Tang, Shaofeng Zhang, Dewu Wang, Yan Liu, Yishuo Zhang, Hongkai Wang, Kun Yang. Hydrodynamics of the tridimensional rotational flow sieve tray in a countercurrent gas-liquid column. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification 142 (2019) 107568.

47. Meng Tang, Shaofeng Zhang, Dewu Wang, Yan Liu, Lusha Wang, Chen Liu. Experimental study and modeling development of pressure drop in concurrent gas-liquid columns with a tridimensional rotational flow sieve tray. Chemical Engineering Science 191 (2018) 383–397.

48. Xin Gao, Xingang Li, Xia Liu, Hong Li, Zhenming Yang, Jinsong Zhang. A novel potential application of SiC ceramic foam material to distillation: foam monolithic tray. Chemical Engineering Science 135 (2015) 489–500.

49. M. Kaeser and C. L. Pritchard. Heat transfer at the surface of sieve trays. Institution of Chemical Engineers. Trans IChemE, Part A, August 2005.

50. Xingang Li, Peng Yan, Sida Zhao, Hong Li, Xin Gao. Fabrication and hydrodynamics performance of modified sieve tray with Janus feature. Separation and Purification Technology 216 (2019) 74–82.

51. Qunsheng Li, Manxia Zhang, Xiaofei Tang, Lun Li, Zhigang Lei. Flow-guided sieve-valve tray (FGS-VT) – A novel tray with improved efficiency and hydrodynamics. chemical engineering research and design 9 1 (2 0 1 3) 970–976.

52. A. H. VAN SINDEREN, E. F. WIJN and R. W. J. ZANTING. ENTRAINMENT AND MAXIMUM VAPOUR FLOW RATE OF TRAYS. Institution of Chemical Engineers, Vol 81, Part A, January 2003.

53. A.H.Van Sinderen, E.F.Wijn, R.W.J.Zanting. Entrainment and maximum vapour flow rate of trays. Chemical Engineering Research and Design. Volume 81, Issue 1, January 2003, Pages 94-107.

54. Ehbenezer C. Uys, Cara E. Schwarz, Andries J. Burger, Johannes H. Knoetze. New froth behaviour observations and comparison of experimental sieve tray entrainment data with existing correlations. chemical engineering research and design 90 (2012) 2072–2085.

55. Ehbenezer C. Uys, Andries J. Burger, Louis J. Du Preez, Johannes H. Knoetze. The influence of gas physical properties on entrainment inside a sieve tray column. chemical engineering research and design 104 (2015) 429–439.

56. Ehbenezer C. Uys, Andries J. Burger, Louis J. Du Preez, Johannes H. Knoetze. The influence of liquid physical properties on entrainment inside a sieve tray column. chemical engineering research and design 117 (2017) 205–217.

57. R.K. Moses, A.J Burger and J.H. Knoetze. The Effects of Fluid Physical Properties and Tray Geometry on Entrainment and Weeping in Sieve Tray Columns. 10th International Conference on DISTILLATION & ABSORPTION 2014. 14 – 17 september 2014 Friedrichshafen, Germany.

58. Jonas Schulz, Hans-Jörg Bart. Analysis of entrained liquid by use of optical measurement technology. Chemical Engineering Research and Design 147 (2019) 624–633.

59. B.King, T.Cai, M.Resetarits, K.McCarley, R.Whiteley, Y.Tamhankar, C.P.Aichele. Characterization of liquid entrainment in a counter flowing gas using Phase Doppler Interferometry. Chemical Engineering Research and Design. Volume 121, May 2017, Pages 295-304.

60. Anand N. Vennavelli, James R. Whiteley, Michael R. Resetarits. Predicting valve tray efficiency. chemical engineering research and design 92 (2014) 2148–2152.

61. Markus Duss, Ross Taylor. A new simplified tray efficiency model with improved accuracy for sieve trays. Chemical Engineering Research and Design 146 (2019) 71–77.

62. Raj Ganesh Manivannan, Tony Cai, Ken McCarley, Anand Vennavelli, Clint P. Aichele. Evaluation of the validity of tray and point efficiency correlations at elevated liquid viscosities and proposal of an improved point efficiency correlation. Chemical Engineering Research and Design 159 (2020) 27–35.

63. S. R. Syeda, A. Afacan, and K. T. Chuang. A fundamental model for prediction of sieve tray efficiency. Chemical Engineering Research and Design. Trans IChemE, Part A, February 2007.

64. Markus Schubert, Michael Piechotta, Matthias Beyer, Eckhard Schleicher, Uwe Hampel, Jürgen Paschold. An imaging technique for characterization of fluid flow pattern on industrial-scale column sieve trays . chemical engineering research and design 111 (2016) 138–146.

65. Vineet Vishwakarma, Eckhard Schleicher, André Bieberle, Markus Schubert, Uwe Hampel. Advanced flow profiler for two-phase flow imaging on distillation trays. Chemical Engineering Science. Accepted Date: 3 November 2020.

Научное издание

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОСЫГИНСКИЙ ФОРУМ
СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СИМПОЗИУМ
«ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»,
ПОСВЯЩЕННЫЙ 110-ЛЕТИЮ А.Н. ПЛАНОВСКОГО
(ISTS «EESTE-2021»)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
(ТОМ 1)

20 и 21 октября 2021 года

Технический редактор Бородина Е. С.
Компьютерная верстка и макет Бородина Е. С.

Материалы публикуются в авторской редакции.