РГУ
им. А.Н. Косыгина
ТЕХНОЛОГИИ. ДИЗАЙН. ИСКУССТВО

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ

ПЕРВЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
2017

VI-Й МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СИМПОЗИУМ
«СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ
СЭТТ – 2017»
ТОМ - 2

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ
ПЕРВЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2017

Тематика чтений
«СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК»

VI-Й МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СИМПОЗИУМ
«СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЭТТ – 2017»
проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований-проект № 17-08-20544

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
(ТОМ 2)

МОСКВА
11-12 ОКТЯБРЯ 2017 ГОДА

УДК 66.02(06)
С 56

СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК [Текст]: сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ – 2017» Международного научно-технического Форума «Первые международные Косыгинские чтения (11-12 октября 2017 года). Т. 2 / М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. – 307 с.

ISBN 978-5-87055-533-1
ISBN 978-5-87055-535-5

В сборник включены научные статьи российских и зарубежных ученых, представленные на Форум, в которых рассматриваются вопросы теории и математического моделирования, пути практической реализации современных эффективных процессов и аппаратов химической, текстильной, лёгкой, пищевой, деревообрабатывающей и других отраслей промышленности и агропромышленного комплекса.

Материалы сборника предназначены для преподавателей вузов, аспирантов, научно-технических и инженерно-технических работников различных отраслей промышленности и агропромышленного комплекса.

ISBN 978-5-87055-533-1
ISBN 978-5-87055-535-5
УДК 66.02(06)

© ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017
© Авторы статей, 2017
© Обложка. Дизайн. Денисов Д. А., 2017

ОРГАНИЗАТОРЫ МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ФОРУМА «ПЕРВЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК»» (МНТФ КОСЫГИН- 2017)

* Министерство образования и науки Российской Федерации;

* Министерство промышленности и торговли Российской Федерации;

* Российский Союз научных и инженерных общественных объединений;

* Российское химическое общество имени Д. И. Менделеева;

* Российская инженерная академия;

* Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);

* Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН РФ;

* Национальный исследовательский университет «МЭИ»;

* Комитет Российского Союза научных и инженерных общественных объединений по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов;

* Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна;

* Ивановский государственный политехнический университет;

* Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси;

* Всероссийское общество изобретателей и рационализаторов;

* Центр международного промышленного сотрудничества ЮНИДО в Российской Федерации.

Рабочие языки конференции: русский и английский.

Материалы публикуются в авторской редакции.

НАУЧНЫЙ ОРГКОМИТЕТ
МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ФОРУМА
«ПЕРВЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ
«СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК»»
(МНТФ КОСЫГИН- 2017)

Сопредседатели научного комитета Форума:

Ректор Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) профессор **Белгородский Валерий Савельевич;**

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

Директор Московской школы экономики МГУ имени М.В. Ломоносова, академик РАН **Некипелов Александр Дмитриевич;**

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

Президент Российской инженерной академии, чл.-корр. РАН **Гусев Борис Владимирович.**

Учёный секретарь научного комитета форума:

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

Информационное обеспечение Форума на сайтах

http://www.mgudt.ru, http://drying-committee.ru

Научный комитет Форума

От России:

проф. Александров А.А. (Москва); член-корр. РААСН Алоян Р.М. (Иваново); проф. Белгородский В.С. (Москва); проф. Блиничев В.Н. (Иваново); проф. Вошкин А.А. (Москва); проф. Гаряев А.Б. (Москва); проф. Гальбрайх Л.С. (Москва); акад. РАН Гвишиани А.Д. (Москва); акад. РАН Гуляев Ю.В. (Москва); член-корр. РАН Гусев Б.В. (Москва); проф. Демидов А.В. (С-Петербург); проф. Дорняк О.Р. (Воронеж); проф. Дьяконов С.Г. (Казань); проф. Карташов Э.М. (Москва); проф. Кащеев О.В. (Москва); проф. Кобраков К.И. (Москва), проф. Кошелева М.К. (Москва); проф. Кричевский Г.Е. (Москва); проф. Кулов Н.Н. (Москва); акад. РАН Леонтьев Л.И. (Москва); проф. Мартынов И.А. (Москва); акад. РАН Мешалкин В.П. (Москва); проф. Мищенко С.В. (Тамбов); акад. РАН Некипелов А.Д. (Москва); проф. Остриков А.Н. (Воронеж); проф. Разумеев К.Э. (Москва); проф. Рудобашта С.П. (Москва); д.т.н. Секанов Ю.П. (Москва); проф. Ситцев В.М. (Москва); д.т.н. Сорочинский В.Ф. (Москва); проф. Таран А.Л. (Москва); акад. РААСН Федосов С.В. (Иваново); акад. АХ РФ Церетели З.К. (Москва); акад. РАН Цивадзе А.Ю. (Москва), член-корр. РАН Чилингаров А.Н (Москва), з.д.и. Юдашкин В.А. (Москва)

Международный:

prof. A. Akulich (Belarus); prof. P. Akulich (Belarus); prof. O. Alves-Filho (Norway); prof. P. Ditl (Czechia); NAS of Ukraine academician A. Dolinsky (Ukraine); Ph.D. D. Gehrmann (Germany); prof. T. Kudra (Canada); prof. N. Mihailov (Bulgaria); prof. A. Mudjumdar (Singapore); prof. F. Rieger (Czechia); prof. G.D. Saravacos (Greece); NAS of Ukraine corresponding member Yu. Snezhkin (Ukraine); prof. Li Zhanyong (China)

ОГЛАВЛЕНИЕ

СЕКЦИЯ 3. «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (НАГРЕВ, ОХЛАЖДЕНИЕ, ВЫПАРИВАНИЕ, КОНДЕНСАЦИЯ, СУШКА, АДСОРБЦИЯ, ЭКСТРАГИРОВАНИЕ, АБСОРБЦИЯ, ЖИДКОСТНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ, РЕКТИФИКАЦИЯ, МЕМБРАННЫЕ И ИОНООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ)»..... 12

С. П. РУДОБАШТА, М. К. КОШЕЛЕВА
О РАБОТЕ КОМИТЕТА РОССИЙСКОГО СОЮЗА НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ОБЪЕДИНЕНИЙ ПО ПРОБЛЕМАМ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ..... 12

П. В. АКУЛИЧ, Н. В. ПАВЛЮКЕВИЧ, Д. С. СЛИЖУК
ТЕРМОГИДРОДИНАМИКА И ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ПРИ СУШКЕ РАСПЫЛЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ЭНЕРГОВОЗДЕЙСТВИЯ 17

С. В. ФЕДОСОВ , В. Е. РУМЯНЦЕВА, И. В. КРАСИЛЬНИКОВ, Н. А. ГРУЗИНЦЕВА
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖИЗНЕННЫХ ЦИКЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА . 22

А. Б. ГАРЯЕВ, О. Е. ПРУН, Е. С. РЕКУНЕНКО
ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТРУБ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОРЕБРЕНИЯ ОТОПИТЕЛЬНОГО КОНВЕКТОРА 28

С. В. ВОРОБЬЕВ, И. А. БЕЛЯЕВ, В. Н. БЛИНИЧЕВ
АНАЛИЗ РАСЧЁТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЧАСТИЦ 32

М. К. КОШЕЛЕВА
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИЗ ОКРАШЕННОЙ ТКАНИ 36

А. А. ЛИПИН, А. Г. ЛИПИН
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РЕАКТОРА ГИДРОЛИТИЧЕСКОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ КАПРОЛАКТАМА 39

Р. А. САДЫКОВ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ 43

А. В. АКУЛИЧ, В. М. ЛУСТЕНКОВ, А. А. АКУЛИЧ
НОВЫЕ СПОСОБЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВ И ГРУППОВЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ..... 47

С. И. БУХКАЛО, С. П. ИГЛИН, О. И. ОЛЬХОВСКАЯ
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ВСПЕНИВАНИЯ ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА 53

Е. И. АКУЛИНИН, А. А. ИШИН, С. А. СКВОРЦОВ, Д. С. ДВОРЕЦКИЙ, С. И. ДВОРЕЦКИЙ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ И ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА 56

Н. Ф. МАЙНИКОВА, Н. П. ЖУКОВ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА СТАДИИ ОСТЫВАНИЯ В МЕТОДЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ..... 61

А. Н. ОСТРИКОВ, Е. Ю. ЖЕЛТОУХОВА, А. А. КАДАНЦЕВ, В. И. ЯНИЦКИЙ
ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО – КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ КАРТОФЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТЕПЛОПОДВОДЕ 65

М. К. КОШЕЛЕВА, О. Р. ДОРНЯК
АНАЛИЗ СОРБЦИОННО – СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕТКАНОГО МАТЕРИАЛА И АППРОКСИМАЦИЯ ИЗОТЕРМ СОРБЦИИ РАЗЛИЧНЫМИ УРАВНЕНИЯМИ 68

С. П. БОБКОВ, А. С. ЧЕРНЯВСКАЯ
ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА 71

С. П. РУДОБАШТА, Г. А. ЗУЕВА
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАГРЕВА ЧАСТИЦ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ ПРИ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕМ ИНФРАКРАСНОМ ЭНЕРГОПОДВОДЕ 75

Н. П. ЖУКОВ, Н. Ф. МАЙНИКОВА, И. В. РОГОВ
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В СИСТЕМЕ ДВУХ ТЕЛ НА СТАДИИ ОСТЫВАНИЯ 79

Е. Ф. СКУРЫГИН, Т. А. ПОРОЙКО
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ МАРАНГОНИ В ПРОЦЕССЕ АБСОРБЦИИ ГАЗОВ 82

Е. И. АКУЛИНИН, А. А. ИШИН, С. А. СКВОРЦОВ, Д. С. ДВОРЕЦКИЙ, С. И. ДВОРЕЦКИЙ
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДСОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ С ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ДАВЛЕНИЕМ 85

А. Л. ТАРАН, Ю. А. ТАРАН, Ю. И. СМИРНОВА
ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ГРАНУЛЯЦИОННЫЕ БАШНИ С ЗАМКНУТЫМ ЦИКЛОМ ПО ХЛАДОАГЕНТУ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОТЫ ГРАНУЛИРОВАНИЯ И СХЕМЫ ИХ РАСЧЁТА 90

В. Ф. СОРОЧИНСКИЙ, А. Л. ДОГАДИН
РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ЗЕРНА ПО ТЕМПЕРАТУРЕ И ВЛАЖНОСТИ ОТРАБОТАВШЕГО СУШИЛЬНОГО АГЕНТА 94

Г. А. НОСОВ, М. В. МИХАЙЛОВ, Б. К. ОРАЗОВ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ СМЕСЕЙ ПУТЕМ СОЧЕТАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕКТИФИКАЦИИ И ФРАКЦИОННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ 97

А. С. ВАНЦКУЛ, Е. М. ГОРЯЧЕВА, А. Б ГАРЯЕВ, В. Ф. СОРОЧИНСКИЙ
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВРЕМЯ ОХЛАЖДЕНИЯ СЛОЯ ЗЕРНА В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИЛОСАХ 101

О. Р. ДОРНЯК, В. М. ПОПОВ, А. Н. ВНУКОВ, Н. А. АНАШКИНА
РАСЧЕТ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ СУШКЕ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ 104

С. В. ФЕДОСОВ, В. Е. РУМЯНЦЕВА, В. С. КОНОВАЛОВА
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ 109

С. И. БУХКАЛО
НЕКОТОРЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ВСПЕНИВАНИЯ ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА 112

Р. Р. САФИН, А. Л. ТИМЕРБАЕВА, Р. Т. ХАСАНШИНА, Р. Р. ЗИАТДИНОВ, Е. А. БЕЛЯКОВА
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ В РЕАКТОРЕ ТАРЕЛЬЧАТОГО ТИПА 116

Л. В. КОРОЛЕВ, Д. О. БЫТЕВ
МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБДИФФУЗИОННОГО ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕНОСА 121

Ю. П. СЕКАНОВ, М. А. СТЕПАНОВ
ВЛАГОМЕТРИЯ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ 123

М. П. ТЮРИН, Е. С. БОРОДИНА, А. И. ДОМБРОВСКАЯ
АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ЛИМИТИРУЮЩИХ РАБОТУ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ 128

М. А. КИПНИС, А. А. ЗАХАРОВА
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФИЛЬТРОВАЛЬНОЙ ПЕРЕГОРОДКИ В ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯТОРЕ ОЧИСТКИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ 132

Б. Г. САПОЖНИКОВ, А. М. ГОРБУНОВА, Ю. О. ЗЕЛЕНКОВА, Н. П. ШИРЯЕВА
ВНЕШНИЙ ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ВИБРОКИПЯЩИМ СЛОЕМ И ПРОДУВАЕМЫМ НАД НИМ ГАЗОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ 134

М. В. КОПЫЛОВ, И. Н. БОЛГОВА, А. А. АНИКИН, А. В. ГОРБАТОВА
ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ РАПСОВОГО МАСЛА НА ОДНОШНЕКОВОМ МАСЛОПРЕССЕ 138

В. А. АФАНАСЬЕВ, В. В. МАНУЙЛОВ
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДСТАРТЕРНЫХ КОМБИКОРМОВ ЗА СЧЕТ ВЛАГОТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНОВЫХ 140

М. П. ТЮРИН, Е. С. БОРОДИНА, А. И. ДОМБРОВСКАЯ
ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЗАКРЫТЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕРМОСИФОНОВ 142

Г. И. ХАЗАНОВ
ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРОМЫВКИ ПРЕССОВЫХ СУКОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОСТАВА «НОВОСТЬ» - СОДА 146

С. В. ШАХОВ, И. Н. СУХАРЕВ, С. Ю. ШУБКИН
УСТАНОВКА ДЛЯ КОПЧЕНИЯ МЯСНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ 149

О. А. ПОНОМАРЕВ
ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ВИХРЕВЫХ ТРУБАХ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ 152

В. С. ВАКУРОВА, Н. В. ХОМЧЕНКО
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА ПРИМЕРЕ ОДИНОЧНОГО ПЛОСКОГО РЕБРА 157

И. В. САПОЖНИКОВ, Н. В. СКУРАТОВ, Д. А. САМОЙЛЕНКО
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛАГОПРОВОДНОСТИ ПРИ СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ 161

А. А. НАДЕЕВ, А. В. БАРАКОВ, Ю. Н. АГАПОВ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В АППАРАТЕ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ 165

В. А. РЕЗЧИКОВ, С. В. САВЧЕНКО
СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА 168

А. Н. ОСТРИКОВ, И. Н. СТОЛЯРОВ
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССЕ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ 171

В. А. РЕЗЧИКОВ, С. В. САВЧЕНКО
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУШКИ ЗЕРНА 175

Л. Л. РУДНЕВА, С. И. БУХКАЛО
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УТИЛИЗАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОСКОВ 178

Е. С. БОРОДИНА, М. П. ТЮРИН, А. Л. ШУТОВА
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРЕБРЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ТЕРМОСИФОНА 182

В. Т. КАЗУБ, С. П. РУДОБАШТА, А. Г. КОШКАРОВА
ВОДНОЕ ЭКСТРАГИРОВАНИЕ СЫРЬЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ 185

В. Н. ВАСИЛЕНКО, Л. Н. ФРОЛОВА, И. В. ДРАГАН, Н. А. МИХАЙЛОВА, Д. А. ТАРКАЕВА
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ЗЕРНОВОГО МАСЛИЧНОГО СЫРЬЯ ... 190

В. Н. ХМЕЛЁВ, Г. А. БОБРОВА, Р. Н. ГОЛЫХ, В. А. НЕСТЕРОВ, С. Н. ЦЫГАНОК, А. В. ШАЛУНОВ
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ» 192

В. И. КУТЕЙНИКОВ, С. П. РУДОБАШТА
ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА 196

Б. Х. АХАЛАЯ, Ю. Х. ШОГЕНОВ
АВТОРЕГУЛИРОВАНИЕ ПОДАЧИ СЕМЯН В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ ВЫСЕВАЮЩЕМ АППАРАТЕ 199

Д. Б. ПРОСВИРНИКОВ, И. Р. АХМЕТШИН
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ГИДРОЛИЗЕ АКТИВИРОВАННОГО ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО МАТЕРИАЛА 201

М. Г. ЕРМОЧЕНКОВ
ЗАВИСИМОСТЬ КИНЕТИКИ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ ОТ ВЛАЖНОСТИ СРЕДЫ 205

Л. И. ГУДИМ, В. В. МАРКОВ
ВЫБОР ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ФИЛЬТРОВ 208

И. Н. СЁМОВ
ТЕХНИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ДОЗИРОВАНИЯ КАЛИБРОВАННЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ 214

Е. Ю. ЖЕЛТОУХОВА, В. С. ЧЕРНЕНКО, И. В. ЛАРИН
ИЗУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ КИНЕТИКИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ СУШКИ СТОЛОВОЙ СВЕКЛЫ 216

А. Г. МИРЗОМАМАДОВ, М. М. САФАРОВ, А. НЕЪМАТОВ, С. С. АБДУНАЗАРОВ
ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАЛЛА НА ИЗМЕНЕНИЕ СУММАРНОГО ОБЪЕМА ПОР И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОРИСТОЙ ГРАНУЛИРОВАННОЙ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ 219

Г. А. ЗУЕВА, Г. Н. КОКУРИНА, А. А. БАЛАШОВ
ЗАДАЧА О НАГРЕВЕ ВОЛОКНА С УЧЕТОМ ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИХ ТЕПЛООБМЕН ФАКТОРОВ 222

Н. И. ПОГОЖИХ, А. О. ПАК, А. В. ПАК
ИСКУССТВЕННЫЙ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС С ИНДУЦИРОВАННЫМ ТЕПЛОМАССООБМЕНОМ 224

М. К. ЗАХАРОВ, А. А. БОЙЧУК
ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА НАГРЕВА СМЕСИ В РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ 229

А. П. БУЛЕКОВ
АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ В СИСТЕМЕ «ТКАНЬ – ЖИДКОСТЬ» 233

Е. Ю. ШАМПАРОВ, И. Н. ЖАГРИНА, С. В. РОДЭ
ТЕПЛОВОЙ ПЕРЕНОС В ЛЕГКИХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ 236

Д. Е. ЗАХАРОВ, Р. Е. ГОЛЯКОВ, А. А. СИРОТКИН, В. В. КОРОТКОВ, С. В. НАТАРЕЕВ
ИОНООБМЕННЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИКАПРОАМИДНОГО ВОЛОКНА 240

И. Н. ЖАГРИНА, Е. Ю. ШАМПАРОВ, С. В. РОДЭ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ НЕТКАНЫХ УТЕПЛЯЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ 244

Б. А. АРУТЮНОВ, Е. В. РЫТОВА, Г. П. КАЛЫМБЕТ
КОРРЕЛЯЦИЯ ДАННЫХ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ И ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ В ОБОБЩЕННОЙ БЕЗРАЗМЕРНОЙ ФОРМЕ ДЛЯ УГЛЕВОДОРОДОВ 248

С. В. ШАХОВ, С. Ю. ШУБКИН, И. Н. СУХАРЕВ
ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА КОПЧЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ 251

С. А. ВЯЗОВОВ
ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОПТИЧЕСКОГО ОТБЕЛИВАТЕЛЯ ТЕТРА-СУЛЬФО-ТИПА 254

Д. Г. ФИЛЕНКО, Р. Ф. ДЖАФАРОВ, М. Н. ДАДАШЕВ, В. А. ВИНОКУРОВ
СВЕРХКРИТИЧЕСКАЯ ФЛЮИДНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ 259

О. Р. ДОРНЯК, М. К. КОШЕЛЕВА, Т. А. НОВИКОВА
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕХОДНОГО И СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ СУШКЕ ТКАНЕЙ 261

Ф. В. НАЗИПОВА, Р. Р. ЗИАТДИНОВ, Р. Р. САФИН
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЭКСТРАКЦИИ В ПРОЦЕССАХ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДРЕВЕСНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 265

В. А. ПОТАПОВ, В. В. ЕВЛАШ, Н. М. ЦУРКАН
ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА СУШКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДИЕТИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ «НУТРИО-ГЕМ» 268

Н. П. ДЯЧЕНКО, Э. П. ДЯЧЕНКО, И. Ю. АЛЕКСАНЯН
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕН РАСТВОРОВ АЛКИЛБЕНЗОЛСУЛЬФОНАТА КАК ОБЪЕКТОВ СУШКИ 272

И. В. ЯКОВЛЕВ, И. В. ПАРЁХИНА, А. В. ХАНИН
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОТИ ТЕПЛООБМЕННИКА В СИСТЕМЕ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХА БАССЕЙНА 276

Д. Ф. СОБИРОВ, М. М. САФАРОВ
ТЕПЛО- И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКА GeTe В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ 280

Ш. Ф. ФАЙЗРАХМАНОВ, И. Х. МАСАЛИМОВ
МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА 283

Д. Л. КАРЕЛИН
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕКОТОРЫХ РАБОЧИХ АГЕНТОВ ДЛЯ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ 286

Ю. Н. АНДРЕЕВА
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОРЕГУЛИРУЮЩИХСЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ 289

Г. И. КАСЬЯНОВ, А. В. ХРИСТЮК
ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ КРИОПОРОШКОВ ИЗ ПЛОДОВ И ЯГОД 293

А. К. ЛАЗАРЕНКО
ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КВАЛИФИКАЦИЙ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ 297

И. А. ПОПОВ
УЛАВЛИВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В АППАРАТАХ СО ВСТРЕЧНЫМИ ЗАКРУЧЕННЫМИ ПОТОКАМИ 301

А. В. АНИСИМОВ, В. И. САЛЧИНСКИЙ
О МЕРОПРИЯТИЯХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ОБЪЕДИНЕНИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ НА СРЕДНЕМ УРАЛЕ 304

СЕКЦИЯ 3. «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (НАГРЕВ, ОХЛАЖДЕНИЕ, ВЫПАРИВАНИЕ, КОНДЕНСАЦИЯ, СУШКА, АДСОРБЦИЯ, ЭКСТРАГИРОВАНИЕ, АБСОРБЦИЯ, ЖИДКОСТНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ, РЕКТИФИКАЦИЯ, МЕМБРАННЫЕ И ИОНООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ)»

УДК 66.015.23

О РАБОТЕ КОМИТЕТА РОССИЙСКОГО СОЮЗА НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ОБЪЕДИНЕНИЙ ПО ПРОБЛЕМАМ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
ABOUT THE WORK OF THE COMMITTEE OF THE RUSSIAN UNION OF SCIENTIFIC AND ENGINEERING PUBLIC ASSOCIATIONS OF THE PROBLEMS OF DRYING AND HYDROTHERMAL PROCESSING OF MATERIALS

Станислав Павлович Рудобашта*, Мария Константиновна Кошелева**
Stanislav P. Rudobashta*, Marya K. Kosheleva**

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

Аннотация: В статье приводятся основные результаты работы одного из Комитетов Российского Союза научных и инженерных общественных объединений – Комитета по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов за последние 14 лет его деятельности.

Abstract: The article presents the main results of the work of one of the Committees of the Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations - the Committee of Drying and hydrothermal processing of materials for the last 14 years of its activity.

Ключевые слова: Российский Союз научных и инженерных общественных объединений, Комитет, сушка, термовлажностная обработка материалов

Keywords: Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations, Committee, drying, hydrothermal processing of materials

По инициативе ученого с мировым именем академика РАН А.В. Лыкова в 1956 году при ВСНТО был создан Комитет по сушке, бессменным руководителем которого академик А.В. Лыков являлся долгие годы. Затем Комитет по сушке возглавлял ученик А.В. Лыкова академик РАСХН В.В. Красников, однако после распада СССР Комитет по сушке прекратил свое существование. В 2003 году решением Координационного совета Российского Союза научных и инженерных общественных объединений (РосСНИО) Комитет был воссоздан. **Комитет РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов является продолжателем дел Комитета по сушке при ВСНТО и решает те же задачи**.

Комитет является одним из Комитетов РосСНИО, Президентом которого является член Президиума РАН, академик РАН Ю.В. Гуляев.

С 2003 года и по настоящее время Комитет возглавляет его **Председатель** - Лауреат Международной Премии имени А.В.Лыкова, заслуженный деятель науки и техники РФ,

д.т.н., профессор С.П. Рудобашта. Учёным секретарём Президиума Комитета является лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, профессор РГУ имени А.Н. Косыгина М.К. Кошелева.

Деятельность Комитета организует **Президиум Комитета**. В руководство Президиума, кроме председателя и учёного секретаря, входят заместители председателя Президиума Комитета: д.т.н., профессор В.Ф. Сорочинский и д.т.н., профессор А.Б. Гаряев.

Комитет включает в себя девять секций: «Теория сушки и термовлажностной обработки материалов», «Энергосбережение при сушке и термовлажностной обработке материалов», «Техника и технология сушки и термовлажностной обработки материалов в химической, текстильной и легкой промышленности», «Техника и технология сушки и термовлажностной обработки материалов в пищевой промышленности и сельскохозяйственном производстве», «Техника и технология сушки и термовлажностной обработки материалов в микробиологической и медицинской промышленности», «Техника и технология сушки и термовлажностной обработки материалов в деревообрабатывающей промышленности», «Техника и технология сушки и термовлажностной обработки материалов в строительной и керамической промышленности», «Контроль, управление, информатизация при сушке и термовлажностной обработке материалов», «Сотрудничество с регионами и зарубежными странами, с общественностью и средствами массовой информации».

В Президиум Комитета входят ученые и практики в области сушки и термовлажностной обработки материалов, представляющие различные отрасли промышленности и АПК и различные регионы страны. В состав Президиума Комитета входят не только Российские учёные, но и видные ученые Союзного государства Р. Беларусь: академик НАН Р. Беларусь Н.В. Павлюкевич, д.т.н., профессор П.В. Акулич (ИТМО имени А.В. Лыкова НАН Р. Беларусь), д.т.н., профессор А.В. Акулич (Могилевский технологический институт).

Комитет конструктивно сотрудничает с учеными, инженерными работниками и научно-техническими организациями, чьи профессиональные интересы лежат в области проблем сушки и термовлажностной обработки материалов.

Необходимо отметить, что Комитет по сушке всегда играл и играет важную роль в деле объединения усилий ученых и практиков страны по решению актуальных задач развития теории сушки, техники и технологии сушки в различных отраслях промышленности. Он координирует действия специалистов, работающих в этой области, проводит научно-технические конференции, симпозиумы, совещания разного уровня, знакомит научно-техническую общественность с отечественными и зарубежными достижениями в области сушки, разрабатывает рекомендации по развитию актуальных направлений теории, техники и технологии сушки и т.д.

Основанная академиком А.В. Лыковым отечественная научная школа в области сушки широко известна в мировых кругах и пользуется заслуженным авторитетом.

С течением времени роль и значение процесса сушки в промышленных технологиях не снижается. Это объясняется ее широким распространением в различных технологических процессах, большой энергоемкостью, значительным влиянием этого процесса на качество получаемых продуктов. Поэтому в мире уделяется большое внимание вопросам теории, техники и технологии сушки. В Канаде издается специализированный международный журнал Drying Technology, статьи по сушке постоянно публикуются в международных и центральных национальных научно-технических журналах (International Journal of Heat and Mass Transfer, Теоретические основы химической технологии, Известия академии наук, серия Энергетика, Инженерно-физический журнал, Известия вузов, Промышленная теплотехника, Chemical Engineering, Chemie-Ingenieur Technik и др.). Регулярно проводятся международные конференции, либо полностью посвященные вопросам сушки, либо выделяющие под нее одну из своих секций. В качестве примера можно привести: International Drying Symposium (IDS), который проводится каждые два года, Nordic Drying

Conference (NDC), Минский международный форум по тепломассообмену (MIF), проводимый раз в 4 года (работает секция по сушке); International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA), проводится каждые два года (работает секция по сушке) и ряд других.

На заседаниях Президиума Комитета регулярно заслушиваются аналитические доклады о состоянии и перспективах развития техники и технологии сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях, в течение последних лет в докладах рассмотрены следующие доклады: Состояние техники и технологии в области сушки и термовлажностной обработки материалов в текстильной и лёгкой промышленности; Современное состояние техники и технологии в зерносушении для обеспечения и сохранения качества зерна; Конкурентоспособность продукции растениеводства в связи с качеством управления процессами сушки; Энергосбережение в процессах сушки и термовлажностной обработки материалов; Сушка и термовлажностная обработка древесных материалов; Инновационные разработки НИИХИММАШ в области сушки и термической обработки материалов; Энергосервисные контракты: проблемы реализации и пути их решения.

С аналитическими докладами Президиум Комитета знакомит научную общественность путем размещения их на сайте Комитета **(http://drying-committee.ru/).**

Много внимания Комитет уделяет международному сотрудничеству. Так, в 2013 году был проведен Международный научный семинар на тему «Искусство обучения в вузах» и расширенное заседание Совета Президиума Комитета РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки. В этих мероприятиях приняли участие профессор кафедры энергии и технологических процессов Норвежского университета науки и технологий Одилио Алвес-Фильо, известный специалист в области сушки и энергосберегающих технологий, и проректор по образованию Бразильского Федерального университета Минас Жерайс профессор Оямо Ромальо, известный своими работами в области статистики и экспериментальной психологии. Большой интерес вызвал доклад на семинаре профессоров Одилио Алвес- Фильо и Оямо Ромальо «Искусство обучения», в котором была представлена информация о системе сравнительной оценки вузов в Бразилии и Норвегии, о совершенствовании преподавания технических дисциплин.

Кроме того, профессор Одилио Алвес – Фильо сделал сообщение о научных разработках в области сушки и энергосбережения, проводимых на кафедре энергии и технологических процессов Норвежского университета науки и технологий, который в 2012 году был признан лучшим техническим университетом Северной Европы.

Важным направлением работы Комитета является участие членов его Президиума в Оргкомитетах конференций разного уровня, в том числе зарубежных и Всероссийских, по профилю Комитета, а также участие в качестве докладчиков на этих конференциях.

Члены Президиума Комитета принимали участие в выполнении работ в соответствии с Государственным контрактом по проекту «Экспертно-аналитическое и экспертно-методическое сопровождение мероприятия «Распространение во всех субъектах РФ современных проектов энергосбережения в образовательных учреждениях» на первом этапе реализации Федеральной целевой программы развития образования на 2011-2015 годы», в том числе в качестве экспертов, отобранных на конкурсной основе.

Выполнен ряд работ, связанных с совершенствованием процессов сушки и термовлажностной обработки, в частности для Верхневолжского кирпичного завода, работы, связанные с сушкой биоотходов птицефабрик. На одном из заседаний был рассмотрен вопрос о создании «Межведомственного метрологического центра в области влагометрии». Принято решение о поддержке его открытия Президиумом Комитета, поскольку функционирование такого центра будет способствовать эффективной практической реализации работ в области сушки и термовлажностной обработки материалов, что и составляет одну из главных целей Комитета. Проводятся анализ и экспертиза работ по сушке и термовлажностной обработке материалов. Это направление деятельности Президиума

имеет несомненное практическое значение. В последние годы на Совете Президиума были рассмотрены работы по контактной барабанной зерносушилке для фермерских хозяйств из Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии, по инфракрасной сушке с керамическими излучателями. Авторам разработок даны практические рекомендации по дальнейшим исследованиям.

Члены Президиума Комитета принимают участие в работе диссертационных советов по профилю Комитета, в экспертизе кандидатских и докторских диссертаций, выступая официальными оппонентами и давая отзывы на авторефераты диссертаций, руководителями защищённых кандидатских и докторских диссертаций, членами редколлегий ведущих научных журналов, авторами ряда учебников, учебных пособий, монографий, председателями и членами Государственных аттестационных комиссий, принимающих защиты выпускных квалификационных работ.

Одним из важных направлений работы Комитета является периодическое проведение международной научно-практической конференции «**Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ».** За период с 2002 г. было проведено 5 таких конференций с периодичностью 1 раз в 3 года.

В 2010 г. Комитет организовал и провел в г. Воронеже на базе Воронежской государственной лесотехнической академии и Воронежской государственной технологической академии Международный научно-технический семинар «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов», посвященный 100-летию академика А.В. Лыкова – при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-08-06017 г). В сентябре 2015 года Комитетом была проведена веб-конференция **«Первые международные Лыковские научные чтения, посвящённые 105-летию академика А.В. Лыкова**», которая также имела финансовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-20703-г). Веб-конференция проходила под названием «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе».

В веб-конференции приняли участие докладчики из таких стран как Россия, Белоруссия, Украина, Норвегия. С докладами в режиме онлайн на ней выступили ведущие ученые из высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, работающие в области теории и практики процессов сушки и термовлажностной обработки материалов. Всего на странице вебинара зарегистрировалось более 260 участников из России, Украины, Таджикистана, Белоруссии, Норвегии, США, Швейцарии и др. По присланным докладам была сформирована программа веб-конференции, в которую вошли более 180 докладов. Доклады, оформленные в соответствии с требованиями РИНЦ, вошли в сборник научных статей, который поступил в ведущие научно-технические библиотеки и учебные коллекторы России.

В день рождения выдающегося учёного А.Н. Плановского 8-го сентября 2016 года, в РГУ имени А.Н. Косыгина состоялось Пленарное заседание **Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения профессора А.Н. Плановского «Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности».** Одним из основных организаторов конференции был Комитет РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов.

На конференцию, которая проходила в РГУ имени А.Н. Косыгина, было представлено 11 пленарных и 290 секционных докладов, в том числе 227 докладов из России (24 города); 61 доклад из стран ближнего зарубежья; доклады из стран дальнего зарубежья: Германия, Китай, Сирия, Ирак и др. Авторами докладов являлись: шесть чл.-корреспондентов и академиков, 87 докторов наук, 74 профессора, более ста кандидатов наук и более ста начинающих ученых (аспирантов, магистров и магистрантов). В Пленарном заседании приняли участие более ста представителей вузов, НИИ, предприятий. В числе участников были ученики и последователи научной школы профессора А.Н. Плановского. Были

представлены доклады известных учёных и организаторов науки, вызвавшие огромный интерес аудитории. В Зале заседаний Учёного совета РГУ, где проходила Пленарная сессия, была организована выставка избранных научных трудов профессора А.Н. Плановского. В фойе главного корпуса университета и в Зале заседаний Учёного совета было представлено слайд-шоу о его жизни и научном творчестве. Участникам конференции были предоставлены двухтомник научных трудов конференции, программа и буклет о профессоре А.Н. Плановском Все материалы конференции в электронной версии разосланы участникам и размещены на сайте Комитета РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов, осуществлявшем информационную поддержку конференции.

В 2017 году в рамках МНТФ Косыгин -2017 в РГУ имени А.Н. Косыгина состоится Сипозиум (6-я конференция) «**Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ».**

Информация о работе Комитета, представленные на заседаниях Президиума Комитета аналитические доклады, регулярно размещаются на сайте Комитета, там же размещается информация о конференциях и других мероприятиях по профилю Комитета, поздравления от имени Комитета РосСНИО известных учёных с юбилейными датами и др. Сайт востребован, причём не только Российскими специалистами, но и учёными из дальнего и ближнего зарубежья.

В 2016 году в связи со 150-летием Российского Технического Общества Бюро Совета Международного Союза НИО наградило Комитет почётной грамотой за высокий уровень профессионализма, энтузиазм в работе, приверженность отечественным ценностям. Грамоту подписал Президент Союза НИО, член Президиума РАН, академик РАН Ю.В. Гуляев.

В планах Комитета проведение новых конференций, координация работ по сушке и термовлажностной обработке материалов в различных отраслях промышленности и АПК, что будет способствовать развитию высокотехнологичных направлений и разработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кошелева. М.К., Рудобашта С.П.* Международная научно-техническая конференция «Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности» // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 2. С. 235–236.

2. *Рудобашта С.П., Кошелева. М.К.* Комитет РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов — продолжатель Лыковского комитета ВСНТО // Журнал «Наука и технологии в промышленности» №3-4/ 2016. С. 117-123

УДК 66.047:536.24

ТЕРМОГИДРОДИНАМИКА И ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ПРИ СУШКЕ РАСПЫЛЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ЭНЕРГОВОЗДЕЙСТВИЯ
THERMOHYDRODYNAMICS AND DROP EVAPORATION IN SPRAY DRYING UNDER HIGH ENERGY EXPOSURE

Пётр Васильевич Акулич, Николай Владимирович Павлюкевич, Дмитрий Станиславович Слижук
Piotr V. Akulich, Nikolay V. Pavlyukevich, Dmitriy S. Slizhuk

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Беларусь, 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: Приведены результаты моделирования тепломассообмена капель при сушке распылением в условиях комбинированного воздействия (конвективного и инфракрасного). Проанализировано влияние перегрева жидкости и инфракрасного излучения на кинетику испарения капель. Рассмотрены результаты исследования термогидродинамических процессов в распылительной камере при создании режима встречных потоков. Показано, что такой режим приводит к увеличению теплоотдачи в центральной и нижней частях камеры и свидетельствует об активизации гидродинамического режима.

Abstract: The article deals with the simulation results of droplet heat and mass exchange during spray drying under combined energy exposure (convective and infrared). The article provides for the analysis of impact of liquid overheating and infrared emission on droplet evaporation kinetics. The study results of thermohydrodynamic processes in a spraying chamber by creating counter-current flows have been analyzed. Such pattern was shown to increase heat transfer performance in the chamber's central and bottom sections and served the evidence of hydrodynamic activation.

Ключевые слова: тепломассоперенос, кинетика сушки, сушка распылением.
Keywords: heat and mass transfer, drying kinetics, spray drying.

В настоящее время метод распылительной сушки широко используется в различных отраслях промышленности для получения множества порошкообразных материалов. Однако проблемы энерго- и ресурсосбережения, интенсификации и оптимизации процессов, создания современных технологий приводят к необходимости более глубокого изучения тепломассообменных процессов с учетом изменения структурно-механических и физико-химических свойств частиц и поиска новых энергоэффективных методов обезвоживания и разработки на их основе высокоэффективного оборудования [1−5]. Процесс обезвоживания диспергированной жидкости (капель) имеет характерную особенность, заключающуюся в образовании структуры твердой фазы. При этом её характеристики и качественные показатели частиц зависят от физических свойств растворов и суспензий и от режимов диспергирования и тепломассообмена. Следует отметить, что наиболее изучен тепломассообмен капель в парогазовой среде при конвективном энергоподводе [6−9]. Известны методы математического описания тепломассообмена капель раствора на основе физического явления образования корочки на поверхности, а также углубления зоны испарения [3, 6]. При этом менее изучен процесс испарения капель растворов в условиях интенсивных энерговоздействий при комбинированном конвективном и инфракрасном (сверхвысокочастотном электромагнитном) энергоподводе, перегреве жидкостей и в сильно нестационарных пульсирующих течениях несущей среды и встречных потоках.

В распылительных камерах обычно низкая объемная концентрация частиц. Поэтому рассматривается случай, когда можно пренебречь взаимодействием частиц, в частности

процессом их коагуляции. Учитывая данные обстоятельства анализируется движение и тепломассообмен одиночной капли с учетом перегрева жидкости и испарения в стационарном и нестационарном паровоздушном потоке при комбинированном энерговоздействии. Капля движется сверху вниз вдоль вертикальной оси x. Скорость газа постоянна или изменяется по некоторой периодической зависимости. При движении капли в пульсирующем потоке газа на нее действуют силы, обусловленные градиентом давления, разностью скоростей и плотностей фаз, а также вызванные нестационарным характером движения фаз, к которым относятся сила присоединенных масс из-за инерционных эффектов и «наследственная» сила Бассэ вследствие нестационарных эффектов в несущей фазе (нестационарности пограничного слоя вокруг частиц).

Процесс испарения капли раствора (суспензии) моделируется в паровоздушной среде в условиях комбинированного энергетического воздействия (конвективного и инфракрасного излучения) и перегрева жидкости. При этом на низкотемпературной стадии до момента достижения заданной плотности сухого вещества или диаметра капли $d_* = 2R$, которая протекает при температуре адиабатического насыщения (мокрого термометра), процесс массообмена капли описывается в рамках модели испарения чистой жидкости. Уравнение массообмена капли для низкотемпературной стадии

$$\frac{d(d)}{d\tau} = -\frac{2D}{\rho_{ж} d}\mathrm{Sh}\left(\rho_{п.н} - \rho_{п.ср}\right)\frac{1}{1-\rho_{п.н}/\rho_{г}}, \qquad (1)$$

где d – диаметр капли, м; D − коэффициент диффузии пара, м^2/с; ρ − плотность, кг/м^3; τ − время, с; индексы: г – газ (влажный воздух); ж – жидкость; н – насыщенное состояние; п – пар. Здесь множитель $1/\left(1-\rho_{п.н}/\rho_{г}\right)$ учитывает стефановский поток пара с испаряющейся поверхности капли.

После испарения свободной влаги и образования структуры твердой фазы или корочки на поверхности капли дальнейший процесс обезвоживания рассматривается в рамках модели углубления зоны испарения с учетом зависимости температуры и давления на ней от параметров процесса и теплофизических свойств материала [6]. Внешняя зона представляет собой слой практически сухого материала, через который теплота за счет теплопроводности подводится к границе испарения, а образующиеся пары фильтрацией переносятся к поверхности частицы. Ввиду относительно высокой теплопроводности влажной зоны градиентом температуры в ней пренебрегается. Из теплового баланса частицы при воздействии на нее конвективного теплового потока при граничном условии III рода и инфракрасного излучения с учетом его поглощения средой уравнение для скорости углубления границы испарения имеет вид

$$\frac{d\xi}{d\tau} = -\frac{R^2\left(T_{ср} - T_{\xi}\right)}{\xi^2\left[\frac{1}{\alpha} + \frac{R^2}{\lambda}\left(\frac{1}{\xi} - \frac{1}{R}\right)\right]\left[\frac{aR\alpha(R-\xi)}{\lambda\xi + R\alpha(R-\xi)}\left(T_{ср} - T_{\xi}\right) + c_{м}\left(T_{\xi} - T_0\right) + u_V r_{п}\right]} \qquad (2)$$

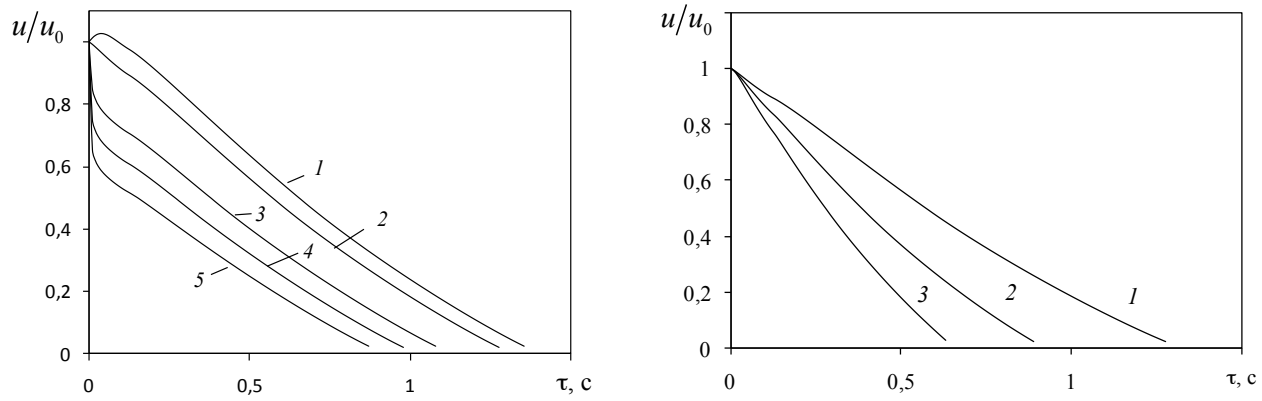
где $a = c_{с}\rho_{с}$; $c_{м} = c_{с}\rho_{с} + c_{ж}u_V$; $\alpha = \alpha_{конв} + \alpha_{изл}$; $\alpha_{изл} = \left(1 - a_{отр}\right)q_0 \exp\left(-kc'x\right)/\left(T_{ср} - T_{пов}\right)$; $\gamma = \lambda\xi/(R-\xi)$; $a_{отр}$ − коэффициент отражения; c − удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); c' – концентрация частиц в среде; k – коэффициент ослабления излучения; $k_{п}$ − коэффициент проницаемости, м^2; $r_{п}$ − теплота парообразования, Дж/кг; R – радиус частицы, м; t, T − температура, °С и К; u и u_V − влагосодержание частицы, кг/кг и кг/м^3; v, w − скорость газа и частицы, м/с; α − коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К); λ − коэффициент теплопроводности сухой зоны, Вт/(м·К); ξ − координата границы испарения, м; Nu, Re, Pr, Sh – числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля, Шервуда. Индексы: 0 – начальное состояние; изл – инфракрасное излучение; конв – конвекция; пер – перегрев; пов – поверхность; р – раствор; с – сухой материал; ср – среда; ξ – граница испарения; − – знак осреднения.

Температура T_ξ на границе испарения ξ определялась из решения трансцендентного уравнения, полученного с использованием уравнений фильтрации пара и Клапейрона-Клаузиуса. Влагосодержание частицы связано с координатой границы испарения соотношением $u = \xi^3 u_V \big/ \left(R^3 \rho_c \right)$.

При определении конвективного коэффициента теплоотдачи учитывалось влияние вдува относительно холодного испаряющегося пара в поток воздуха на коэффициент теплоотдачи (поправка Сполдинга) $\mathrm{Nu} = \left(1/B\right)\left[\ln\left(1+B\right)\right]\left(2 + 0{,}55\,\mathrm{Re}^{0.5}\,\mathrm{Pr}^{0.33}\right)$, где B – теплообменное число Сполдинга: $B = c_{p\text{п}}\left(T_{\text{ср}} - T\right)\big/ r_{\text{п}}$.

Получено численное решение системы уравнений движения и тепломассообмена капли (жидкой керамики) при следующих основных параметрах: $d_0 = 0{,}00025$ м; $u_0 = 1{,}0$ кг/кг; $c_c = 1080$ Дж/(кг·К); $c_ж = 4190$ Дж/(кг·К); $\lambda = 2{,}0$ Вт/(м·К); $\rho_c =$ 1200 кг/м^3; $p_{\text{п.ср}} = 20$ кПа; $\rho_{\text{ср}} = 0{,}746$ кг/м^3; $\rho_{\text{р}} = 1500$ кг/м^3; $t_{\text{кип}} = 99{,}64$°С; $a_{\text{отр}} = 0{,}1$; $v = 2$ м/с.

На основе модели получены кинетические зависимости испарения капли (жидкой керамики) при различных условиях энергетического воздействия. При перегреве жидкости, когда начальная температура капли выше температуры кипения на кривых сушки наблюдается резкое снижение влагосодержания (рис. 1, *а*). При этом температура капли резко падает. Это происходит вследствие интенсивного парообразования и вскипания жидкости. При истечении сильно перегретой жидкости через сопло форсунки происходит её вскипание, сопровождающееся дроблением как за счет истечения из сопла, так и в результате вскипания. Отметим, что в данной модели за начальный принимался размер капель после дробления жидкости. После периода интенсивного парообразования наблюдается первый период сушки постоянной температуры капли.



а) б)

Рис. 1. Кинетические зависимости сушки капли при различных температурах перегрева жидкости (*а*) и инфракрасного излучателя (*б*):

***а)* – *1* –** $T_0 = 293$**К;** $t_{\text{пер}} = 0$**°С;** ***2* –** $T_0 = 333$**К;** $t_{\text{пер}} = 0$**;** ***3* –** $t_{\text{пер}} = 150$**°С;** ***4* –** $t_{\text{пер}} = 200$**°С;**

***5* –** $t_{\text{пер}} = 250$**°С;** $k_{\text{п}} = 1 \cdot 10^{-15}$ **м^2;** $v = 2$ **м/с;** $w_0 = 0$**;**

***б)* – *1* –** $T_{\text{изл}} = 0$**;** $T_0 = 333$ **К;** ***2* –** $T_{\text{изл}} = 973$**;** $T_0 = 333$ **К;** ***3* –** $T_{\text{изл}} = 1173$**;** $T_0 = 333$ **К**

Далее на высокотемпературной стадии, когда происходит углубление зоны испарения, температура капли возрастает, а снижение влагосодержания несколько замедляется. Из представленных зависимостей видно, что чем выше температура перегрева жидкости тем до более низких значений падает влагосодержание капли на начальной стадии процесса.

Исследовано влияние наложения инфракрасного излучения на тепломассообмен капли. Из зависимостей на рис. 1, *б* видно, что дополнительное воздействие на каплю инфракрасного излучения в значительной степени ускоряет процесс испарения. При этом

время обезвоживания капли заметно сокращается. Повышение температуры излучателя существенно влияет на скорость сушки . Исследовано влияние начальной скорости капли и колебаний скорости газа на кинетику её обезвоживания. Установлено, что создание колебаний скорости газа, особенно импульсных, позволяет заметно увеличить скорость испарения капель.

В работе также выполнены исследования испарения капель углеводородного сырья как по гидродинамической модели, т. е. по формуле (1), так и по кинетической модели с использованием уравнения типа Герца-Кнудсена [10]. Показано, что время испарения капли в гидродинамической модели несколько большее, чем в кинетической модели. Следует заметить, что если рассматривать испарение облака капель с высокой концентрацией (порядка 10^{10} 1/м^3), то необходимо дополнять систему уравнений и учитывать изменение плотности паров, которая быстро возрастает в процессе испарения.

Далее рассматриваются термогидродинамические процессы в распылительной камере, в которой реализовано встречное взаимодействие вертикальных потоков теплоносителя. На рис. 2 представлена схема распылительной установки со встречными потоками теплоносителя. Установка состоит из вертикальной цилиндроконической камеры *1*, на перекрытии которой по её оси установлены верхний газораспределитель *2* и распылитель *3*, расположенный под ним, патрубков для подвода теплоносителя *4* и *5*, жидкого материала *6* и вывода высушенного материала и отработанного теплоносителя *7*. В нижней части сушильной камеры по её оси установлен нижний газораспределитель (завихритель) *8*.

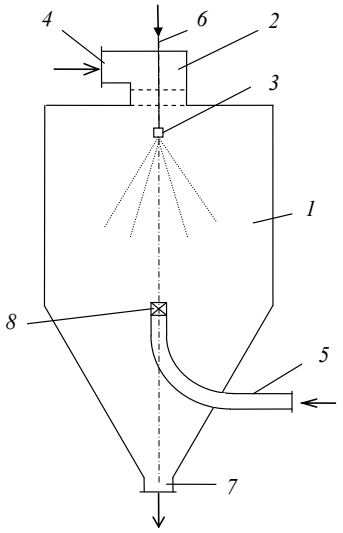
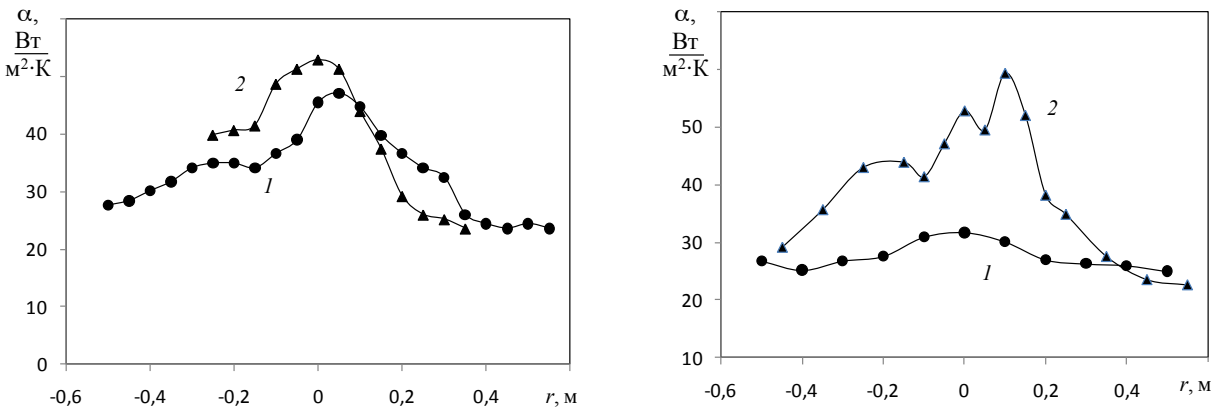


Рис. 2. Схема распылительной установки со встречными вертикальными потоками теплоносителя: *1* – цилиндроконическая камера; *2* – верхний газораспределитель; *3* – распылитель; *4* и *5* – патрубки для подвода теплоносителя; *6* – трубопровод жидкого материала; *7* – патрубок вывода высушенного материала и отработанного теплоносителя; *8* – завихритель

Ввод нижнего дополнительного потока газа позволяет активизировать гидродинамический режим в зоне факела распыла, где имеет место наибольшая концентрация частиц дисперсной фазы. Известно, что встречное взаимодействие потоков позволяет увеличить относительную скорость движения фаз, турбулизировать несущий поток. Следует отметить, что этот способ интенсификации тепломассообменных процессов находит развитие и применение в различных его модификациях [1, 3−5]. В данном случае нижний дополнительный поток газа, подаваемый в виде закрученной струи и направленный вверх способствует также снижению скорости движущихся вниз частиц, некоторому их «зависанию», а следовательно, увеличению времени их пребывания в камере. Это важно для достижения низкой влажности материалов.

Экспериментально получены распределения коэффициента теплоотдачи в различных сечениях распылительной камеры для двух режимов: при отсутствии дополнительного нижнего потока теплоносителя (воздуха) и при его наличии. На рис. 3 приведены профили распределения коэффициента теплоотдачи в горизонтальных сечениях камеры. Из их сравнения видно, что ввод дополнительного нижнего потока, направленного снизу вверх, приводит к росту коэффициента теплоотдачи в центральной части камеры в приосевой зоне.



а) б)

Рис. 3. Зависимости коэффициента теплоотдачи в распылительной камере без дополнительного ввода (*1*) и с дополнительным нижним вводом газа (*2*): *а* – $x = 0,34$ м (расстояние от перекрытия); *б* – $x = 0,49$ м

Это важно поскольку в этой области имеет место повышенная концентрация частиц распыляемой жидкости. Отметим, что измеряемый коэффициент определяет интенсивность теплоотдачи от потока газа к неподвижному датчику. Однако измеряемая теплоотдача интегрально характеризует активность (скорость газа, турбулентность потока) гидродинамического режима в соответствующих точках, его изменение по объему камеры, равномерность и симметричность газораспределения, а также влияние дополнительного ввода газа. Отметим, что определение поля скоростей газа, характеристик турбулентности в зоне соударения потоков сопряжено с определенными трудностями.

В заключение отметим, что моделирование тепломассообмена капель с учетом их перегрева и комбинированного энергетического воздействия (инфракрасного излучения, конвективного подвода теплоты, в том числе в условиях низкочастотных колебаний скорости газа) и экспериментальные исследования термогидродинамических процессов в распылительной камере со встречными потоками свидетельствуют о возможности интенсификации процесса сушки и повышения влагонапряженности камеры. Результаты исследований могут быть использованы при совершенствовании и оптимизации процессов сушки растворов и суспензий методом распыления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акулич П.В., Драгун В.Л., Куц П.С. Технологии и техника сушки и термообработки материалов. Минск: Белорусская наука, 2006. 190 с.

2. Акулич П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск: Беларуская навука, 2010. 443 с.

3. Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка: в 2-х томах. Т.1. Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. Киев: Академпериодика, 2011. 376 с.

4. Тутова Э.Г., Куц П.С. Сушка продуктов микробиологического производства. М.: Агропромиздат, 1987. 303 с.

5. Kudra T., Mujumdar A.S. Advanced Drying Technologies. New York. Marcel Dekker, Inc. 2002. 459 p.

6. Акулич П.В. Тепломассообмен капли раствора при комбинированном энергетическом воздействии и углублении зоны испарения // ИФЖ. 2016. Т.89. № 3. С. 527−536.

7. Prakash S. and Sirignano W.A. Theory of convective droplet vaporization with unsteady heat transfer in the circulating liquid phase // Int. J. Heat Mass Transfer. 1980. V. 23. P. 253–268.

8. Козырев А.В., Ситников А.Г. Испарение сферической капли в газе среднего давления // Успехи физических наук. Т. 171. № 7. 2001. С. 765–774.

9. Терехов В.И., Терехов В.В., Шимкин Н.Е., Би К.Ч. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // ИФЖ. 2010. Т. 83. №5. С. 829–836.

10. Дмитриев С.И., Гринчук П.С., Павлюкевич Н.В. Сравнение кинетического и гидродинамического подходов при описании испарения капель углеводородного сырья в высокотемпературном газовом потоке // Тез. докл. XV Минского межд. форума по тепло- и массообмену, 23−26 мая 2016 г. Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2016. Т. 1. С. 312−317.

УДК 69.059.4

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖИЗНЕННЫХ ЦИКЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF MODELING LIFES CYCLES OF CONSTRUCTION STRUCTURES BASED ON THE THEORY OF TEPLOMASSOPERENOS

Сергей Викторович Федосов, Варвара Евгеньевна Румянцева,
Игорь Викторович Красильников, Наталья Александровна Грузинцева
Fedosov Sergey Viktorovich, Varvara Evgenievna Rumyantseva,
Krasilnikov Igor Viktorovich, Gruzintseva Natalia Alexandrovna

Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State Polytechnic University, Russia, Ivanovo
(e-mail: fedosov-academic53@mail.ru; varrym@gmail.com; korasb@mail.ru, gruzincevan@mail.ru)

Аннотация: В данной работе показан пример применения теории тепломассопереноса при моделировании внешне- и внутридиффузионного сопротивления массопереносу в системах, в которых в результате массообменных процессов происходит деструкция и разрушение элементов строительных конструкций. В работе приведена математическая модель процесса коррозии первого вида цементных бетонов. Получены решения задачи, описывающие безразмерные концентрации переносимого компонента по толщине бетона и в жидкой фазе, позволяющие рассчитывать динамику и кинетику процесса.

Abstract: In this paper we show an example of the application of the theory of heat and mass transfer in modeling external and internal diffusion resistance to mass transfer in systems in which destruction and destruction of elements of building structures occur as a result of mass exchange processes. The paper presents a mathematical model of the corrosion process of the first type of cement concretes. The solutions of the problem describing the dimensionless concentrations of the transported component over the thickness of concrete and in the liquid phase, which allow calculating the dynamics and kinetics of the process, are obtained.

Ключевые слова: математическое моделирование; массоперенос; коррозия; цементный бетон; концентрация; динамика и кинетика процесса.

Key words: mathematical modeling; mass transfer; corrosion; cement concrete; concentration; the dynamics and kinetics of the process.

Современный уровень развития теории тепломассопереноса и вычислительной техники позволяют решать сложные физико-математические задачи, моделирующие процессы переноса, происходящие в строительных конструкциях при их возведении и эксплуатации. Эти процессы определяют жизненный цикл конструкции[1].

Теоретической базой для выполнения исследований в данном направлении является теория тепломассопереноса и ее логическое выражение в форме системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих явления тепло-, массо- и бароперенoса в

твердых телах при различного рода граничных условиях, характеризующих перенос субстанции на границах тел с окружающей их газовой (жидкой) средой, полученная академиком А.В.Лыковым, традиционно записывается в виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_q \nabla^2 t + \varepsilon r \frac{c_m}{c_q} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 \Theta + a_m \delta_T \nabla^2 t; \quad (2)$$

$$-\lambda_q (\nabla t)_n + q_q(\tau) - (1-\varepsilon) r q_m(\tau) = 0; \quad (3)$$

$$\lambda_m (\nabla \Theta)_n + \lambda_m \delta_T (\nabla t)_n + q_m(\tau) = 0; \quad (4)$$

$$q_q(\tau) = \alpha_q (t_c - t_n); \quad (5)$$

$$q_m(\tau) = \alpha_m (\Theta_n - \Theta_c). \quad (6)$$

Обозначения величин в этих выражениях те же, что и в [2].

При этом все большее значение приобретали технологические процессы в системах с дисперсной твёрдой фазой [3,4], поскольку с увеличением дисперсности не только возрастает межфазная поверхность контакта фаз и, соответственно, интенсивность протекания процессов переноса теплоты и массы вещества. При уменьшении размеров частиц до наноструктур существенное влияние на процессы переноса начинают оказывать эффекты микроуровня: физико-химия поверхности и межфазовые взаимодействия [5,6].

Даже в достаточно упрощенной постановке задачи взаимосвязанного тепломассопереноса в форме выражений (1) - (6) (а под упрощенностью в данном случае следует понимать линейную форму записи уравнений (1) - (3) при постоянстве коэффициентов переноса), исследователю приходится иметь дело с весьма непростой проблемой расчета динамики и кинетики для трёх потенциалов переноса при учете порядка 20-ти коэффициентов переноса.

На современном этапе развития науки решению этих проблем способствует развитие методов математической физики и численных методов решения с помощью современных компьютерных технологий.

Вместе с тем, менее удостоенной внимания научного сообщества остаётся проблема сохранения культурного природного и рукотворного наследия. Созданные руками человеческого гения уникальные античные и современные архитектурные сооружения, под воздействием временных, природных и антропогенных явлений, разрушаются. Увы, иногда этот процесс приводит к полной потере уникальных сооружений для человечества.

Предотвратить разрушения, понять физико-химические аспекты, приводящие к деструктивным процессам, и на основе определённого переосмысления теории тепломассопереноса предложить пути, методологию, методы и инструментарий для замедления деструкционные процессов, а ещё лучше - "залечить раны", нанесённые деятельностью человека (или природой под влиянием этой деятельности) - вот одна из благороднейших задач нашего и последующих поколений.

Задача эта комплексная и многокомпонентная. В соответствии с этим, она также требует комплексного подхода к своему решению.

Рассмотрим лишь одну из множества проблем: проблему коррозии бетона гидротехнических сооружений.

Бетон- строительный материал, известный человеку ещё из глубины веков на рубеже третьего-четвёртого тысячелетий до нашей эры, стремительно ворвался в XIX-е тысячелетие и затем современниками был назван строительным материалом XX века. И в начавшемся XXI-м веке он остаётся наиболее востребованным материалом для возведения уникальных сооружений и типовых зданий промышленного и гражданского назначения [7].

Вместе с тем, как синтетический композит, созданный руками человека, бетон (железобетон) остаётся предметом пристального внимания исследователей. И наравне с

вопросами решения технологических проблем создания и жизненного цикла эксплуатации железобетонных конструкций, внимание исследователей сохраняется к проблеме долговечности бетонов, не только для целей сохранения уникальных сооружений для потомков, но и в плане безопасности жизнедеятельности человека. Всем известна трагедия, произошедшая в спортивно-развлекательном комплексе «Трансвааль-Парк» (его здание представляло собой многоуровневое пятиэтажное здание, в плане имеющее форму хвоста кита). 14 февраля 2004-го года купол здания рухнул. Погибло 28 человек. В официальном заключении отмечено, что причиной обрушения явился комплекс проектных ошибок, обусловленный грубыми просчетами при разработке проекта. Однако, по мнению некоторых учёных, входивших в состав комиссии по расследованию, одной из причин явилась коррозия бетона купола, в результате которой и произошло неконтролируемое снижение прочности конструкции.

Ещё один пример: обрушение кровельной части здания Басманного рынка, построенного в Москве в 1974-м году. Здание имело округлую форму диаметром 90 м. Крыша здания представляла собой железобетонную висячую оболочку без опор в форме вогнутого купола на системе тросов. 23 февраля 2006-го года произошло обрушение кровли. Погибло 68 человек. Слабым утешением явилось то, что трагедия произошла в 5.45 утра, когда рынок ещё не был заполнен посетителями. Иначе масштабы трагедии были бы неизмеримо больше. Комиссией по расследованию было установлено, что обрушение произошло вследствие обрыва одного из вантовых тросов, на которых держалась крыша. А сам обрыв стал следствием нескольких причин, одной из которых была коррозия материала ванта.

Определить условия, при которых строительное сооружение достигнет критических значений прочностных характеристик элементов конструкции, не допустить спонтанного высокоскоростного процесса обрушения, этому должен помочь тщательный анализ при использовании возможностей теории тепломассопереноса. Рассмотрим один из простых примеров: жидкостная коррозия первого вида цементного бетона [8-10] в замкнутом объёме «жидкость-резервуар».

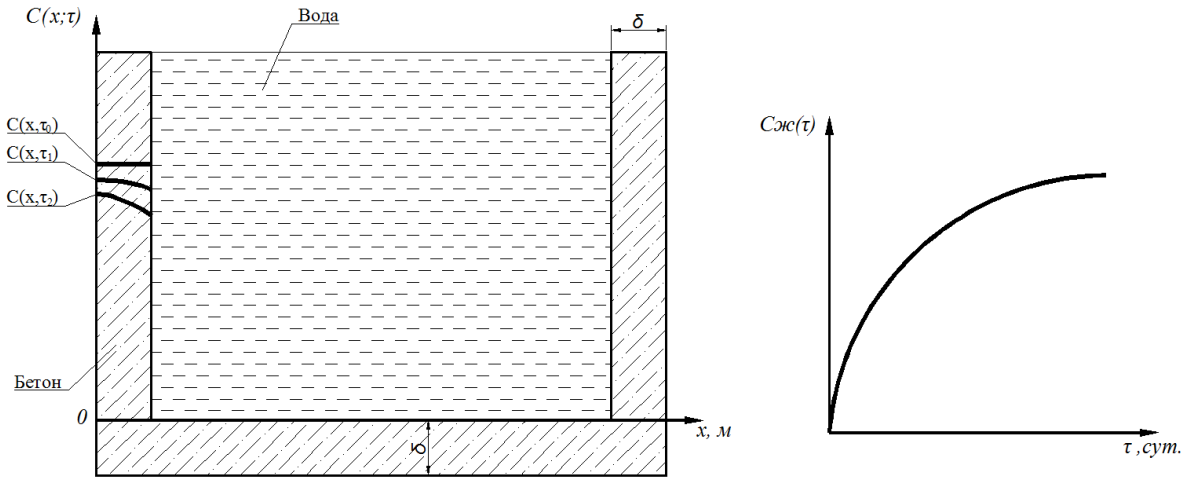


Рис. 1. Схематичное изображение системы "жидкость-резервуар"

Рисунок 1 иллюстрирует физическую картину процессов массопереноса в рассматриваемой системе. Основным компонентом, который определяет устойчивость системы с точки зрения физико-химических особенностей процессов, является гидроксид кальция. Он входит в состав основных компонентов бетонной матрицы и, кроме того, находится в ненасыщенном (или пересыщенном) состоянии в поровой жидкости бетона. При этом, эксплуатационные прочностные показатели железобетонных сооружений в определяющей мере зависят от состояния гидроксида кальция в порах бетона: находится он в насыщенном (или пересыщенном) состоянии и требуемая прочность конструкции обеспечена. Сдвинулось равновесие в системе, гидроксид кальция стал "вымываться"

("выщелачиваться") из твёрдой фазы в жидкую - начнется процесс разложения высокоосновных компонентов бетона, приводящий к неизменной потере прочности и разрушению конструкции.

Естественно, в процессе эксплуатации, конструкции находятся в определённых температурно-влажностных условиях, но в большинстве практических случаев влияние температуры на характер массопереноса весьма незначительно. Учитывая изложенное, при формулировке общей задачи из системы уравнений взаимосвязанного тепломассопереноса можно оставить лишь уравнение (2). Вместе с тем, в работах [11,12] показано, что в порах бетона свободный гидроксид кальция может находиться в состоянии в 4-5 раз превышающем значение концентрации предельной растворимости насыщения. Это превышение может рассматриваться как источник массы вещества, оказывающий существенное влияние на физико-химические особенности процесса. Таким образом, задача массопроводности свободного гидроксида кальция может быть представлена следующим образом:

$$\frac{\partial C(x,\tau)}{\partial \tau} = k\frac{\partial^2 C(x,\tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v(x,\tau)}{\rho_{бет}}, \tau > 0,\ 0 \le x \le \delta, \tag{7}$$

начальное условие: $C(x,\tau)\big|_{\tau=0} = C(x,0) = C_0,$ (8)

граничные условия: $\frac{\partial C(0,\tau)}{\partial x} = 0,$ (9)

$$k\frac{\partial C(\delta,\tau)}{\partial x} = \beta^*\left[C_p(\tau) - C(\delta,\tau)\right], \tag{10}$$

баланс массы: $-S\cdot\rho_{бет}\cdot k\cdot\frac{\partial C(\delta,\tau)}{\partial x} = V_{ж}\cdot\rho_{ж}\cdot\frac{\partial C_{ж}(\tau)}{\partial \tau},$ (11)

закон Генри: $C_p(\tau) = mC_{ж}(\tau).$ (12)

Для упрощения решений введены безразмерные переменные и критерии подобия, удобные для качественного анализа процессов коррозии, в безразмерном виде задача (7)-(12) запишется так:

$$\frac{\partial Z(\bar{x},Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x},Fo_m)}{\partial \bar{x}^2} - Po_m^*,\ Fo_m > 0,\ 0 \le \bar{x} \le 1, \tag{13}$$

$$Z(\bar{x},0) = 0, \tag{14}$$

$$\frac{\partial Z(0,Fo_m)}{\partial \bar{x}} = 0, \tag{15}$$

$$\frac{1}{Bi_m}\cdot\frac{\partial Z(1,Fo_m)}{\partial \bar{x}} = \left[Z_p(Fo_m) - Z(1,Fo_m)\right], \tag{16}$$

$$-\frac{\partial Z_{ж}(Fo_m)}{\partial Fo_m} = K_m\cdot\frac{\partial Z(1,Fo_m)}{\partial \bar{x}}. \tag{17}$$

В уравнениях (7)-(17) обозначено: $C(x,\tau)$ – распределение концентрации «свободного гидроксида кальция» в бетоне в момент времени τ, в пересчете на CaO, кг CaO/кг бетона; $C_{ж}(\tau)$ - концентрация гидроксида кальция в жидкости в момент времени τ, в пересчете на CaO, кг CaO/кг жидкости; $C_p(\tau)$ - равновесная концентрация переносимого компонента на поверхности твердого тела, кг CaO/кг бетона; k – коэффициент массопроводности в твёрдой фазе, м^2/с; $\beta^* = \rho_{ж}\left[C_{пж}(\tau) - C_{ж}(\tau)\right]/\rho_{бет}\left[C_p(\tau) - C(\delta,\tau)\right]$ - модифицированный коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с; $q_v(x,\tau)$ – мощность объемного источника массы вследствие химических или фазовых превращений, кг CaO/(м$^3\cdot$с); m – константа равновесия Генри, кг жидкости/кг бетона; δ – толщина стенки конструкции, м; x – координата, м; τ – время, с; $\rho_{бет}$, $\rho_{ж}$ – плотности бетона и воды, кг/м^3; S – площадь поверхности резервуара, контактирующая с жидкостью, м^2; $V_{ж}$ – объем жидкости в резервуаре, м^3; $Z(\bar{x},Fo_m) = \left[C_0 - C(x,\tau)\right]/C_0$ - безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона;

$Z_p(Fo_m) = \left[C_0 - C_p\right]/C_0$ - безразмерная равновесная концентрация на поверхности твердого тела; $Z_{ж}(Fo_m) = \left[C_0 - mC_{ж}\right]/C_0$ - безразмерная концентрация переносимого компонента в жидкой фазе; $\bar{x} = x/\delta$ - безразмерная координата; $Fo_m = k\tau/\delta^2$ - массообменный критерий Фурье; $Po_m^* = q_v \cdot \delta^2 / k \cdot C_0 \cdot \rho_{бет}$ - модифицированный массообменный критерий Померанцева; $Bi_m = \beta^* \cdot \delta / k$ - массообменный критерий Био; $K_m = m \cdot G_{бет}/G_{ж}$ - коэффициент, учитывающий характеристики фаз; $G_{бет}$ - масса бетонного резервуара, кг; $G_{ж}$ - масса жидкости в резервуаре, кг; индекс m в формулах означает принадлежность к массообменным процессам.

Решение системы выполнялось методом интегрального преобразования Лапласа, т.е. исходная система уравнений отображена в область комплексных чисел, в которых было получено решение системы, а затем произведен перевод решения в область оригиналов. В результате были получены следующие решения:

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{Z_p(0)}{K_m + 1} - 2Bi_m \cdot Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu_m \cdot \cos(\mu_m \bar{x})}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m) + \\ + 2Po_m^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_m \bar{x}) \cdot \varphi(Bi_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^2 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m), \tag{18}$$

$$Z_{ж}(Fo_m) = Z_{ж}(0) + 2Bi_m \cdot K_m \cdot Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot \left[\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1\right] - \\ - 2Po_m^* \cdot K_m \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m \cdot \varphi(Bi_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^3 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot \left[\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1\right], \tag{19}$$

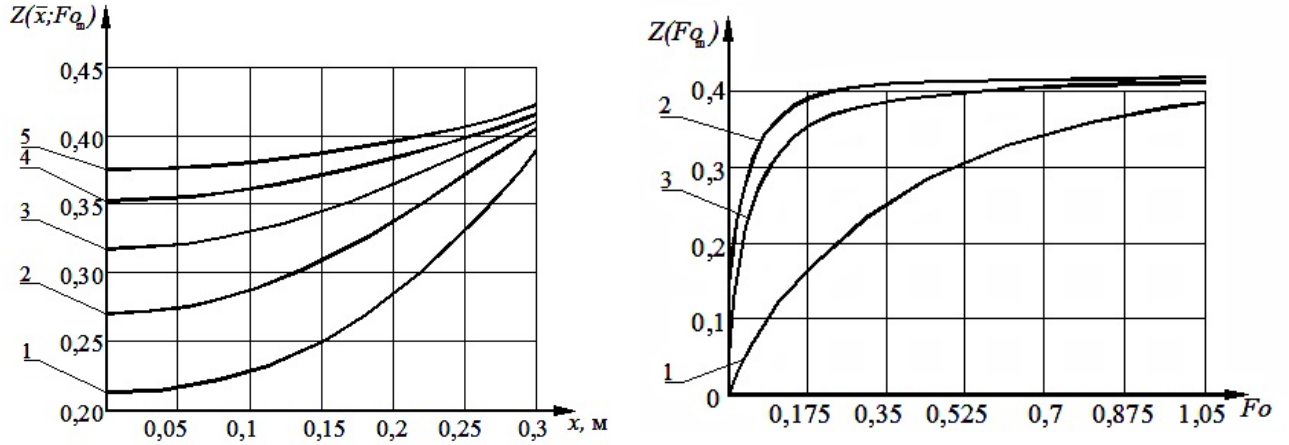
где: $\varphi(Bi_m, K_m, \mu_m) = \left(\mu_m^2 - Bi_m \cdot K_m\right) \cdot \sin \mu_m - \mu_m \cdot Bi_m \cdot (\cos \mu_m - 1)$, (20)

$$\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m) = \left[\mu_n^2 \left(3 + Bi_m\right) - Bi_m \cdot K_m\right] \cdot \sin \mu_m + \mu_m \left[\mu_m^2 - Bi_m \left(K_m + 2\right)\right] \cdot \cos \mu_m, \tag{21}$$

$$tg\mu_m = \frac{\mu_m \cdot Bi_m}{\mu_m^2 - Bi_m \cdot K_m} \text{ - характеристическое уравнение.} \tag{22}$$

Полученное решение позволяет производить расчеты профилей концентраций «свободного гидроксида кальция» в бетоне и находить условия, при которых эти концентрации достигают значений начала разложения высокоосновных соединений цементного бетона: алита, белита, трехкальциевого алюмината и четырехкальциевого алюмоферрита, а значит, и переходить к дальнейшим этапам изучения и моделирования коррозионных процессов.

Приведем пример установления срока службы железобетонных стенок резервуара по разработанной математической модели. Для этого был произведен расчет полей концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине стенки через 2, 4, 6, 8 и 10 лет эксплуатации. Кроме этого рассчитано изменение во времени концентрации «свободного гидроксида кальция» у границы раздела фаз и на границе защитного слоя, а также изменение средней концентрации. Результаты расчетов приведены на рисунке 2.



а) б)

Рисунок 2. Поля концентраций в стенке проектируемого резервуара
а) Профили безразмерных концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине образца при числе Фурье равном:
1-0,175; 2-0,35; 3- 0,525; 4-0,7; 5-0,875; что соответствует 2, 4, 6, 8 и 10 годам;
б) 1 - изменение средней безразмерной концентрации гидроксида кальция; 2 и 3 – изменение безразмерной концентрации гидроксида кальция на границе защитного слоя и у границы раздела фаз от числа Фурье

По результатам проведенных расчетов концентрация «свободного гидроксида кальция» на поверхности стенки достигнет значения, соответствующего началу разложения высокоосновных составляющих бетона через 2,4 года, а на границе защитного слоя через 6,1 года. Разрушение бетонного защитного слоя арматуры повлечет необратимые коррозионные процессы не только в бетоне, но и в арматуре, а, следовательно, приведет к полному разрушению резервуара. При этом следует отметить, что согласно СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии» для такого типа резервуаров капитальный ремонт следует производить не реже чем один раз в 10 лет [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК ПресСто, 2010. 364 с.

2. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М.-Л. Госэнергоиздат, 1963. 536 с.

3. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твёрдой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.;

4. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: Химия. 1993. 206с.

5. Федосов, С.В. Теоретические исследования влияния особенностей динамики и кинетики массопереноса на процессы жидкостной коррозии 1 вида цементных бетонов / Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений// РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ЗАО «Университетская книга». Курск. 2015. С.275-277.

6. Смирнова, Н.Н. Кинетика сорбции и десорбции лизоцима ультрафильтрационными мембранами на основе ароматических полиамидов/ Н.Н. Смирнова, И.А. Небукина // Сорбционные и хроматографические процессы. 2015. Т. 15. Вып. 1. С. 51-59.

7. Николаев С.В. Нормативная база высотного строительства в России / С.В. Николаев, В.И. Травуш, Ю.А. Табунщиков, А.Н. Колубков, Г.Г. Соломанидин, А.А. Магай, Н.В. Дубынин // Жилищное строительство, № 1-2. 2016. С. 3-7.

8. Федосов, С.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов коррозии первого вида цементных бетонов при наличии внутреннего источника массы / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, Н.С. Касьяненко // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 44-47.

9. Федосов, С.В. Теоретические исследования влияния мощности внутреннего источника массы на процесс массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников // Academia. Архитектура и строительство. 2014. № 1. С. 102-105.

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

11. Москёин В.М. Коррозия бетона / В.М. Москвин. М.: Госстройиздат. 1952. 342 с.

12. Ратинов В.Б., Иванов Ф.М. Химия в строительстве.М.: Стройиздат. 1977. 220 с.

13. Инженерный и экономический анализ энергосберегающих мероприятий: учебное пособие / Алоян Р.М., Федосов С.В., Матвеева Н.Ю., Красильников И.В., Андреева О.Р., Летиция Гарсия Крус, Давид Валеро, Висенте Монтиэль, Иисус Иньеста; под общ. ред. Федосова С.В. Тамбов: Изд-во ИП Першина Р.В., 2014. 165 с.

УДК 621.565.93/.95

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТРУБ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОРЕБРЕНИЯ ОТОПИТЕЛЬНОГО КОНВЕКТОРА
TUBES POSITION INFLUENCE ON HEATING CONVECTOR FIN EFFICIENCY

Андрей Борисович Гаряев, Ольга Евгеньевна Прун, Екатерина Сергеевна Рекуненко
Andrey B. Garyaev, Olga E. Prun, Ekaterina S. Rekunenko

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, Moscow
(e-mail: GariayevAB@mpei.ru, olgaproon@mail.ru, ekaterina_rekunenko@mail.ru)

Аннотация: Проведён численный расчет полей температур и удельных тепловых потоков для пластины оребрения отопительного конвектора. На основе полученных результатов были сделаны выводы о наилучшем расположении труб конвектора, обеспечивающего наибольшую эффективность ребра.

Abstract: A numerical investigation of tubes relative position inside a convectors fin was made. Temperature and specific heat flux fields were used to make conclusions about tubes relative position influence on fin efficiency.

Ключевые слова: естественная конвекция, конвектор отопления, оребрение, эффективность ребра.

Keywords: natural convection, convector, fin efficiency, finning.

Конвекторы являются одними из наиболее распространенных отопительных приборов. Высокие объемы производства таких теплообменных аппаратов и широкий ассортимент на рынке заставляет производителей искать пути снижения их металлоёмкости и повышения эффективности [1-3]. Геометрические размеры ребер, а также взаимное расположение подающего и обратного трубопроводов оказывают существенное влияние на металлоемкость конвекторов при заданной тепловой мощности.

Авторами было проведено исследование влияния продольного и поперечного шагов труб конвектора на эффективность ребер при диагональном и вертикальном расположении на труб в прямоугольном ребре. С этой целью был проведен расчет распределения

температуры по поверхности ребра стандартных размеров в программном пакете PDE Toolbox Matlab R2013b. Общий вид расчетной области представлен на рисунке 1.

Численно было решено уравнение теплопроводности вида (1):

$$-div(\lambda \cdot grad(t)) + q_v = 0, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала ребра конвектора, в расчетах принимался равным 15 Вт/(м·град); q_v – сток тепла (2), отнесенный к объему пластины оребрения, характеризующий конвективное охлаждение поверхности пластины, Вт/м^3:

$$q_v = \frac{\alpha \cdot (t - t_{air}) \cdot F}{V}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи со стороны окружающего воздуха, который в случае естественной конвекции обычно составляет 5-10 Вт/(м^{2}град); t – температура поверхности пластины, ^{o}C; t_{air} – температура воздуха, которая в расчетах принималась равной 20 ^{o}C; F – площадь поверхности пластины, м^2; V – объем пластины, м^3. Размеры пластины, принятые в расчетах, составляли (Ш×В×Г) 90×130×1 мм.

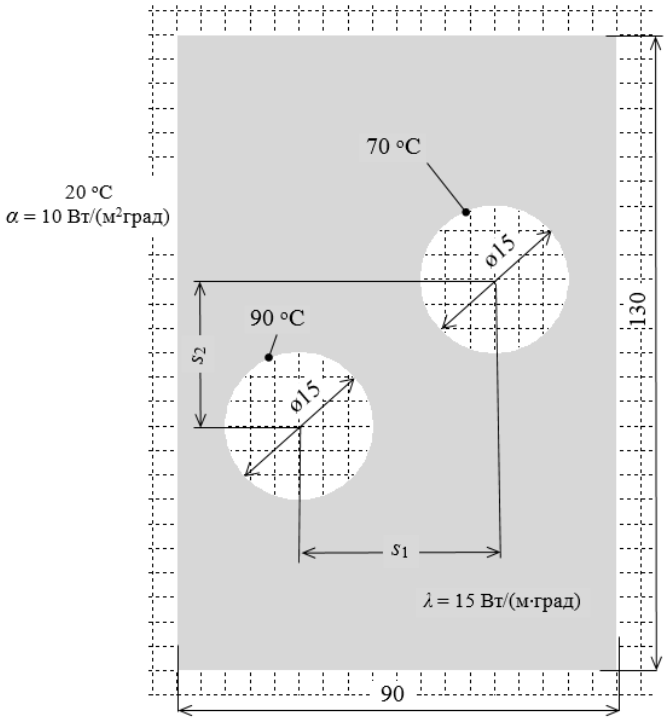


Рис. 1. Геометрические размеры ребра конвектора.

На поверхности подающего и обратного трубопроводов были заданы граничные условия I рода: t = 90 ^{o}C – для подающего трубопровода, t = 70 ^{o}C – для обратного трубопровода. На торцевых сторонах ребра были заданы граничные условия III рода (3):

$$-\lambda \cdot grad(t) + \alpha \cdot (t - t_{air}) = 0 \quad (3)$$

Расчеты производились при различных значениях продольного (s_1 от 40 до 60 мм) и поперечного (s_2 от 30 до 50 мм) шагов. При этом было учтено, что минимальное абсолютное расстояние между центрами труб в таких конвекторах должно составлять 50 мм.

Результатом численного решения уравнения (1) являлись поля температур и значений удельного теплового потока по поверхности пластины оребрения. После обработки результатов проводилась оценка средней интегральной величины температуры пластины и эффективности ребра - отношения теплового потока передаваемого ребром к тепловому потоку, передаваемому ребром с постоянной температурой поверхности, равной температуре основания ребра [4]. На рисунке 2 изображена зависимость среднеинтегральной температуры ребра от абсолютного расстояния между центрами труб.

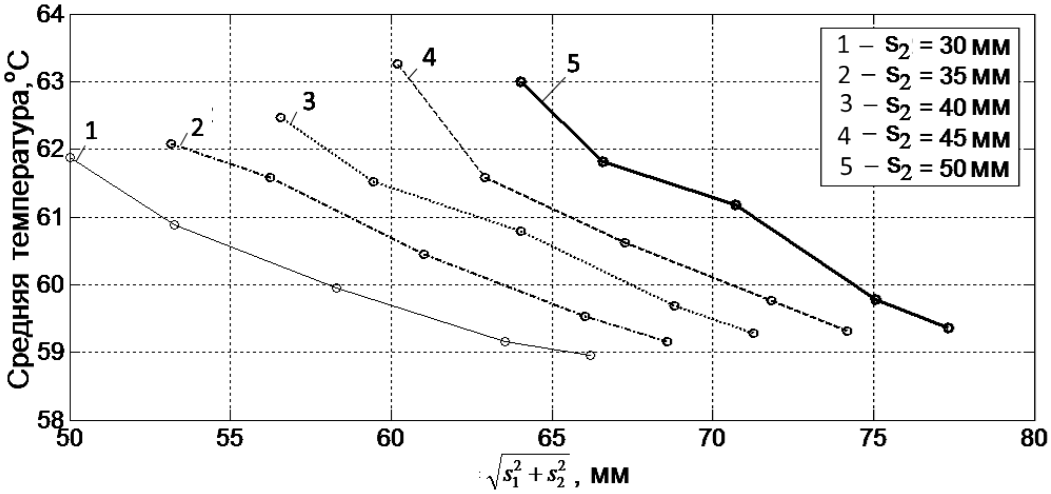


Рис. 2. Значения средней температуры поверхности оребряющей пластины в зависимости от абсолютного расстояния между трубами.

Неровное расположение точек на графиках связано с недостаточно точным осреднением температурного поля при неравномерной треугольной расчетной сетке, что обусловлено использованием метода конечных элементов в программе расчета. Как видно из рисунка 2, средняя температура поверхности пластины уменьшается при увеличении продольного шага s_1 и увеличивается при увеличении поперечного шага s_2. Это связано с тем, что ширина пластины меньше, чем высота (см. рис.1), и при увеличении s_2 увеличивается нагретая площадь пластины, а при увеличении s_1 эта площадь сокращается, так как трубы смещаются к краям пластины. Значения эффективности ребра приведены в таблице 1.

Таблица 1. Эффективность ребра для диагонального расположения труб, %.

	s_1 = 59 мм	s_1 = 56 мм	s_1 = 50 мм	s_1 = 44 мм	s_1 = 40 мм
s_2 = 30 мм	64,9	65,2	66,6	68,1	69,8
s_2 = 35 мм	65,3	65,9	67,4	69,3	70,1
s_2 = 40 мм	65,5	66,1	68,0	69,2	70,8
s_2 = 45 мм	65,5	66,3	67,7	69,3	72,1
s_2 = 50 мм	65,6	66,3	68,6	69,7	71,7

Из рассмотренного диапазона значений при диагональном расположении труб на пластине наилучшими с точки зрения эффективности оребрения являются следующие значения межтрубных расстояний: продольный шаг s_1 = 40 мм; поперечный шаг s_2 = 50 мм.
В таблице 2 приведены средние значения температуры поверхности пластины конвектора и среднего теплового потока для вертикального расположения труб на пластине (s_1 = 0 мм).

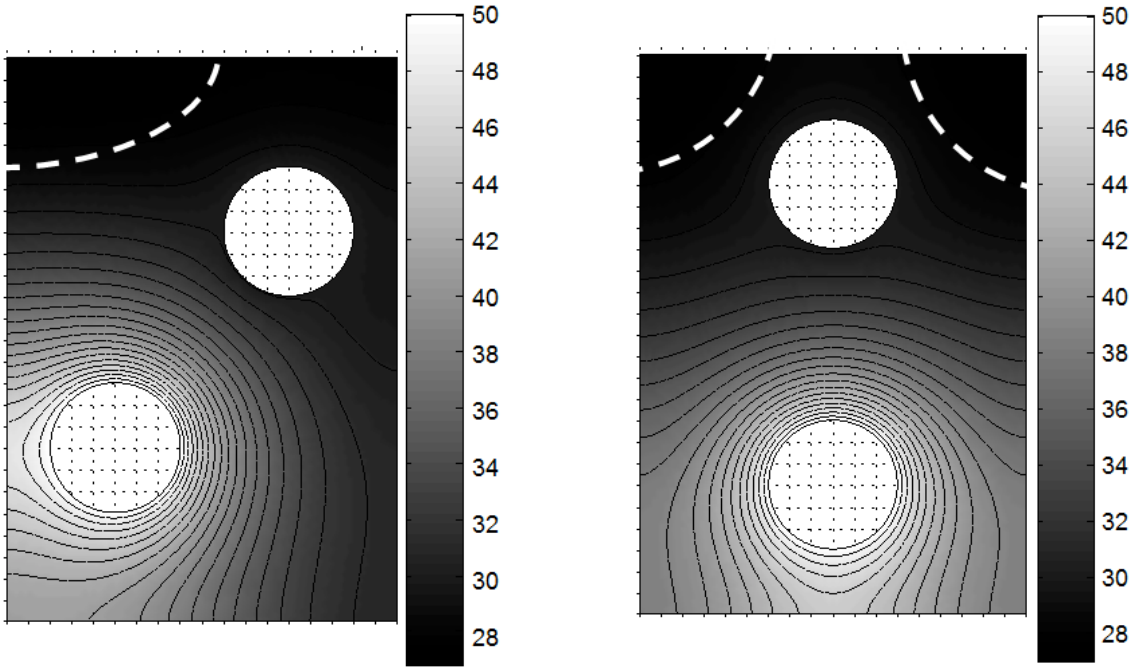
Таблица 2. Результаты расчетов для вертикального расположения труб (s_1 = 0 мм).

Межтрубное расстояние s_2, мм	50	55	60	65	70	75
Средняя температура ребра, °С	64,2	65,0	65,0	65,0	65,3	64,9
Средний удельный тепловой поток, Вт/м^2	442,1	449,9	450,4	449,7	453,4	448,8
Эффективность ребра, %	73,7	75,0	75,1	75,0	75,6	74,8

При сравнении результатов, полученных для вертикального и диагонального размещения труб, видно, что вертикальное размещение труб обеспечивает лучший прогрев ребра по площади и, как следствие, более высокие значения эффективности ребра. Однако по мере сдвигания труб к верхнему и нижнему краям пластины, эффективность также начнет

снижаться, как и при увеличении продольного шага s_1 в случае диагонального расположения труб. Оптимальным расстоянием для данного типа пластин между центрами труб при их вертикальном размещении является расстояние 60-70 мм.

Был также проведен расчет распределения температур по поверхности пластины для температурного графика 50/30, результаты представлены на рисунке 3.



диагональное расположение труб
s_1 = 40 мм, s_2 = 50 мм

вертикальное расположение труб
s_2 = 70 мм

Рис. 3. Распределение температур по поверхности ребра (при температурном графике 50/30), °С.

Из рисунка 3 видно, что ребро прогревается крайне неравномерно. Наиболее холодные участки ребра расположены вокруг обратного трубопровода. За счет этих областей можно сократить металлоемкость конструкции. Численный расчет позволяет сделать вывод о форме срезов – в данном случае, она должна быть вогнутая. Примерные линии срезов обозначены на рисунке 3 штриховыми линиями. Срезать часть пластин вокруг подающего трубопровода не рекомендуется.

Следует отметить, что в данной работе рассматривалось одиночное ребро и не учитывалось влияние конвекции в плоском канале между рёбер конвектора, а также влияние самих труб на гидродинамику течения. В таком случае диагональное расположение труб может способствовать интенсификации теплоотдачи по сравнению с вертикальным расположением труб за счёт сужения живого сечения и усложнения формы канала.

При вынужденной конвекции, которая имеет место в напольных конвекторах, продуваемых воздухом, отличие в эффективности ребер при различном расположении труб может быть существенно выше.

Таким образом, было показано, что увеличение продольного шага приводит к снижению средней температуры пластины и эффективности ребра (до 5%), а увеличение поперечного шага – к увеличению средней температуры пластины (до 1,7%). Установлено, что с точки зрения эффективности оребрения при вертикальной ориентации прямоугольного ребра конвектора вертикальное расположение труб на пластине является лучшим по сравнению с диагональным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *А.Н. Сканави, Л.М. Махов*. Отопление. М.: АСВ, 2008. 576 с.
2. *K. Kerrigan, H. Jouhara, G.E. O'Donnel, A.J. Robinson*. A naturally aspirated convector for domestic heating application with low water temperature sources // Energy and Buildings. 2013. 67. P. 187–194.
3. *Аронов И.З., Фиалко Н.М., Пресич Г.А.* Анализ работы отопительных конвекторов // Промышленная теплотехника. 2003. Т. 25. №1. С. 78- 81.
4. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. М.: «Энергия», 1975. 488 с.

УДК 622.7, 621.926.4

АНАЛИЗ РАСЧЁТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЧАСТИЦ
ANALYSIS OF CALCULATE DEPENDENCIES FOR DETERMINATION OF CRITICAL SPEEDS OF SHOCK LOADING OF PARTICLES

Сергей Владимирович Воробьев, Иван Александрович Беляев, Валериан Николаевич Блиничев
Sergey V. Vorobuev, Ivan A. Belyaev, Valerian N. Blinichev

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново
Ivanovo state University of chemistry and technology, Russia, Ivanovo.
(e-mail:ch4rlythec4t@gmail.com)

Аннотация: В статье приводится анализ существующих расчётных зависимостей для определения критических скоростей ударного нагружения частиц с целью минимизации расходов энергии тонкого измельчения для поликомпонентных и полидисперсных материалов.

Abstract: The article analyzes the existing calculated dependences for determining the critical velocities of impact loading of particles in order to minimize the energy consumption of fine grinding for polycomponent and polydisperse materials.

Ключевые слова: обогащение, фосфоросодержащие руды, критическая скорость, распределительная функция.

Key words: enrichment, phosphorus-containing ores, critical speed, distribution function.

Одной из главных проблем, стоящих сегодня перед горнодобывающей отраслью, является снижение издержек при добыче и переработке полезных ископаемых. Серьезные усилия направлены также на уменьшение потерь полезных минералов при обогащении, поэтому особое внимание уделяется модернизации обогатительных процессов и соответствующего оборудования.

Главной задачей в данной работе является минимизация расходов энергии при тонком измельчении поликомпонентных и полидисперсных материалов в аппарате комбинированного процесса измельчения, в котором при ударном столкновении частиц должно происходить разрушение только по границам наиболее непрочных поликомпонентных частиц. К поликомпонентным частицам относятся все руды, которые необходимо обогащать.

Например, при разработке сухого способа обогащения фосфорсодержащих руд необходимо раскрыть поликомпонентные частицы, удалить глину, карбонаты ($CaCO_3$ и $MgCO_3$), как наиболее непрочные компоненты, не разрушая апатиты и фосфориты на первичном этапе обогащения. В связи с этим представляется большой интерес анализа расчётных зависимостей для определения критических скоростей ударного нагружения частиц.

Из-за широкого спектра распределения прочности даже одного размера под критической скоростью ударного нагружения понимается такая скорость, при которой вероятность их разрушения равно 50%, т.к. в множестве частиц одного размера существуют, как очень слабые, так и более прочные частицы.

В общем случае при ударе о преграду тело обладает кинетической энергией:

$$E_{\text{кин}} = m\frac{\vartheta^2}{2} = \rho V\frac{\vartheta^2}{2}, \quad (1)$$

где m − масса тела; ρ − плотность тела; V − объем тела; ϑ − скорость тела при ударе о преграду.

С другой стороны, это тело обладает потенциальной энергией Е:

$$E_{\text{пот}} = \frac{E\Delta^2}{2}V = \frac{\bar{\sigma}_{\text{в}}{}^2 V}{2E}, \quad (2)$$

где E − модуль упругости; V − объем тела; $\Delta = \frac{\xi}{R}$ − относительная деформация;

$\bar{\sigma}_{\text{в}}$ − предельное напряжение сжатия, которое зависит от распределения макродефектов по частицам реальных твёрдых тел.

Если кинетическая энергия меньше потенциальной, то разрушение не произойдет, если больше потенциальной, то происходит разрушение. При равенстве этих энергий наступает начало разрушения материала. Если отношение энергий $\frac{E_{\text{пот}}}{E_{\text{кин}}}$ обозначить через $\text{К}_{\text{р}}^2$,то используя уравнения (1) и (2), получим:

$$\frac{E_{\text{пот}}}{E_{\text{кин}}} = \text{К}_{\text{р}}^2 = 1 = \frac{\bar{\sigma}_{\text{в}}{}^2}{\vartheta_{\text{р}}{}^2\ \rho^2\ \vartheta_{\text{н.р.}}^2}$$

или

$$\text{К}_{\text{р}} = \frac{\bar{\sigma}_{\text{в}}}{\vartheta_{\text{р}}\rho\ \vartheta_{\text{н.р.}}} \quad (3)$$

где $\vartheta_{\text{р}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ − скорость распространения продольной волны; ρ − плотность материала; $\vartheta_{\text{н.р.}}$ − скорость начала разрушения материала.

Уравнение (3) показывает, что комплекс Кр состоит из величин σ, $\vartheta_{\text{р}}$, ρ, которые характеризуют конкретный материал и скорость начала разрушения $\vartheta_{\text{н.р.}}$ для него.

С другой стороны, уравнение (3) определяет, что скорость начала разрушения есть величина постоянная (назовем ее теоретической скоростью начала разрушения $\vartheta_{\text{н.р.}}^{\text{т}}$ и равна:

$$\vartheta_{\text{н.р.}}^{\text{т}} = \frac{\bar{\sigma}_{\text{в}}}{\vartheta_{\text{р}}\rho} \quad (4)$$

На основе теории контактных напряжений, разработанной Герцем, академик В.П. Горячкин предложил критическую скорость находить по следующей формуле [1]:

$$v_{\text{кр}} = \left(\sqrt{\frac{E}{\rho}}\right)\cdot\frac{\sigma_{\text{р}}}{\text{Е}}, \quad (5)$$

где $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ - скорость звука в материале, м/с; $\sigma_{\text{р}}$ - предел прочности материала на растяжение, МПа.

Недостатком этой формулы является сложность определения скорости звука в материале, кроме того отсутствует зависимость критической скорости от размеров частиц. Использование указанной формулы (5) приемлемо для кристаллических, мало дисперсных материалов, но плохо реализуемо для неоднородных, пористых материалов и материалов содержащих макродефекты.

Г.С. Ходаков, предложил производить расчет критической скорости по формуле [2]:

$$v_{кр} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho\, k}\right)\left[\sqrt[3]{\frac{\sigma_р{}^5}{E^2}} + \frac{12\alpha(\beta l + \sigma)}{\pi x}\right.}, \quad (6)$$

где ρ – плотность материала, кг/ м3 ; $к$ – к.п.д. ударного разрушения частицы; $\sigma_р$ – предел прочности материала; β – средняя объёмная плотность энергии; l – глубина пластической деформации; σ – свободная энергия единицы поверхности; a – константа.

Недостатком данной формулы для практического применения является сложность определения глубины пластической деформации, l и к.п.д. ударного разрушения частицы, $к$. Кроме того, свободная энергии единицы поверхности,σ является переменной величиной, в связи с чем возникает проблема с определением её максимального значения.

В настоящее время большинство исследователей при определении критической скорости разрушения опираются на формулу (7), экспериментально полученную С.В. Мельниковым и Ф.Г. Плоховым [3]:

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{K_д \sigma_{в.с.} \ln\frac{a}{x}}{\rho}}, \quad (7)$$

где $K_д = \frac{\sigma_{в.д.}}{\sigma_{в.с.}}$ - коэффициент динамичности (для зерна $K_д$ = 1,6…2,0);

$\sigma_{в.д.}$ и $\sigma_{в.с.}$ – соответственно пределы прочности частицы, определённые в динамических и статических условиях, МПа; a – размер частицы по линии удара, м; х – линейная величина оставшейся недеформируемой части частицы, м. Использование указанной (8) эмпирической формулы сложно для полидисперсных и поликомпонентных материалов в связи со сложностью точного определения значений $\sigma_{в.д.}$ и $\sigma_{в.с.}$ [4].

На основе концепции разрушения Л.А. Глебов вывел новую формулу для определения критической скорости [5]:

$$v_{кр} = \left(\frac{T}{\rho}\right)\sqrt{\frac{\pi\gamma E}{b^3}(1 + (1 + R)^2)}, \quad (8)$$

где T – время действия ударного импульса частицы при её контакте с рабочим органом, с; γ – коэффициент, выражающий величину удельной поверхностной энергии разрушения; b – размер частицы, имеющей форму куба; R – коэффициент восстановления (определяется экспериментально).

При расчете времени действия ударного импульса, T, по данной формуле, возникают проблемы, в связи с тем, что она зависит от скорости удара $\upsilon_{уд}$, поэтому полученный результат может варьироваться в значительных пределах $(10^{-6} - 5 \cdot 10^{-3})$ [6, 7] .

Свой вариант для расчёта критической скорости предложили А.А. Борщевский и А.С. Ильин в формуле (9) на основании анализа роторных дробилок крупного дробления [8]:

$$v_{кр} = 1{,}75 \cdot 10^{-2}\sqrt[3]{\left(\frac{\sigma_р}{\rho d}\right)^2}, \quad (9)$$

где $\sigma_р$ -прочность материала на растяжение, Па; $\sigma_р = (70 \ldots 140) \cdot 10^5$;

ρ -плотность материала кг/м^3, $\rho = (2{,}6 \ldots 2{,}7) \cdot 10^3$; d – предельный минимальный диаметр материала, м.

Для расчета гранулометрического состава и соответствующей критической скорости измельчаемых материалов в многоступенчатых мельницах ударно-отражательного действия с сепарационной выгрузкой продуктов измельчения группой соавторов во главе с В.Н. Блиничевым была предложена своя методика [9].

Вероятность разрушения частиц при каждом ударе рассчитывается по следующему уравнению (10):

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt\,, \tag{10}$$

В уравнении (10) безразмерный комплекс *t* зависит как от реальной скорости ударного нагружения, так и от критической скорости ударного разрушения, зависящей от прочности частиц и их размеров:

$$t = 2.5lg\frac{V}{V_{\text{кр}}} \tag{11}$$

где: V – скорость ударного нагружения, м/с; $V_{\text{кр}}$ – критическая скорость ударного нагружения, м/с.

Критическая скорость ударного нагружения может быть рассчитано по эмпирическому уравнению [9]:

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{45 \cdot \left(\frac{\tau_{\text{ср}}}{\rho} + 0{,}67\right)}{X_i^{0,4}} \tag{12}$$

где X_i -текущий измельчаемый размер частицы, мм.

Распределительную функцию разрушившихся при ударе частиц можно рассчитать по модифицированному уравнению Розина-Раммлера (13):

$$D_x = 1 - e^{k^{0,53}} \tag{13}$$

Для расчета гранулометрического состава частиц, измельченных в мельнице без внутренней сепарации, используют матричный подход [10]

$$F_k(X) = (1 - P(X_i))F_0(X) + P(X_i)F_0(X)D(X_i) \tag{14}$$

где: $P(X_i)$ – вероятность распределения частиц i-го размера в виде треугольной матрицы; $F_0(X)$ – начальное распределение частиц в виде линейной матрицы; $D(X_i)$ – распределительная функция.

На основании вышесказанного, можно сделать заключение, что все концепции, имеющиеся в современной практике, не дают объемной и подробной характеристики процесса разрушения частиц полидисперсных и поликомпонентных материалов, а также простой зависимости по расчету расхода энергии на разрушение, критической скорости его разрушения.

Таким образом, необходимо сочетать как известные теоретические разработки, так и экспериментальные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Горячкин, В.П.* Собрание сочинений в трёх томах. Т.1. М.: Колос, 1968. 508 с.

2. *Ходаков, Г.С*. Физико-химическая механика измельчения. М.: Наука, 1972. - 240 с.

3. *Мельников, С.В.* К вопросу об измельчении ударом. Науч.-техн. бюл. по электрификации сел. хоз-ва. – М., 1968. – Вып. 1(4).– С. 24-32. 99

4. *Карташов, Б.В*. Обоснование основных параметров измельчителя фуражного зерна роторно-ножевого типа: автореф. Дис. канд. техн. наук. Челябинск. СХИ, 1996. 23 с

5. *Мельников, С.В.* Рабочий процесс молотковой дробилки замкнутого типа. Земледельческая механика. – М., 1964. – Т VIII. – С. 110-117.

6. *Золотарев, С.В.* Методика расчёта основных конструктивных параметров ударно-центробежной дробилки. Технология и механизация производственных процессов в животноводстве: Сб. науч. тр. – Челябинск, 1983.– С.47-53.

7. *Золотарев, С.В.* Ударно-центробежные измельчители фуражного зерна (основы теории и расчёта). Барнаул: ГИПП «Алтай», 2001. - 200 с.

8. *Борщевский А. А., Ильин А. С.*: Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий: Учеб. Для вузов. - М.: Высш. шк., 1987.-368 с.

9. *Блиничев В.Н, Гущина Т.В., Постникова И.В., Кравичк Я.:* Описание процесса тонкого измельчения в сепарационной мельнице ударно-отражательного действия// Czasopismo techniczne. 2008.z. 2-M.

УДК 677.016.253

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИЗ ОКРАШЕННОЙ ТКАНИ
RESEARCH OF TECHNOLOGICAL EXTRACTION OF TECHNOLOGICAL POLLUTION FROM COLORED FABRICS

Мария Константиновна Кошелева
Maria K. Kosheleva

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

Аннотация. Изучение кинетики экстрагирования красителей из тканей затрудняется анализом содержания незафиксированного красителя. Получено уравнение для контроля качества окрашенной ткани после экстрагирования (промывки).

Ключевые слова: окрашенная ткань, экстрагирование, кинетика, устойчивость окраски.

Annotation. The research of the kinetics of extraction of dyes from fabrics is hampered by the analysis of the content of the unfixed dye. An equation for quality control of the colored fabric after extraction (washing) is obtained.

Key words: dyed fabric, extraction, kinetics, color stability

Объектом исследования являлась ткань из смеси вискозных (33%) и полиэфирных (67%) волокон с поверхностной плотностью М=165 г/м^2, группа сорочечных тканей, переплетение полотняное. Ткань окрашена по термозольному способу красителями дисперсным алым и активным красным.

Свойства ткани как объекта технологической обработки во многом определяются сорбционно-структурными характеристиками вискозных и полиэфирных (лавсановых) волокон [1].

Изотермы сорбции-десорбции, экспериментально определённые автором на вакуумной сорбционной установке с весами Мак Бена Бакра при нормальной температуре, представлены в таблицах 1 и 2.

Анализ результатов исследования сорбционно-структурных характеристик показывает, что сорбционная способность вискозного волокна значительно выше, чем лавсанового и, соответственно, именно вискозное волокно определяет сорбционно-структурные свойства смешанной ткани.

Результаты расчётов показывают, что удельная поверхность пор вискозного волокна – $2{,}76 \cdot 10^5$ м^2/кг, ёмкость монослоя – 4 моль/кг, удельная поверхность пор полиэфирного волокна – $7 \cdot 10^3$ м^2/кг, ёмкость монослоя – 1 моль/кг.

Таблица 1. Изотермы сорбции-десорбции паров воды вискозным волокном (φ – относительное давление паров воды, %. $U_р$ – равновесное влагосодержание, %)

Сорбция								
φ, %	0,024	0,043	0,088	0,121	0,164	0,240	0,355	0,495
$U_р$, %	1,76	2,57	3,24	3,90	4,92	6,15	7,35	11,42
φ, %	0,676	0,810	0,885	0,904	0,965	0,980	0,982	
$U_р$, %	16,32	20,67	25,64	27,68	33,22	40,99	42,4	
Десорбция								
φ, %	0,98	0,93	0,91	0,87	0,73	0,61	0,45	0,32
$U_р$, %	42,40	35,90	32,17	26,06	19,55	15,97	12,50	10,31
φ, %	0,22	0,15	0,12	0,09	0,07	0,04	0,00	
$U_р$, %	8,62	7,36	6,63	5,90	5,16	3,86	2,22	

Таблица 2. Изотермы сорбции-десорбции паров воды полиэфирным (лавсановым) волокном

Сорбция								
φ, %	0,024	0,043	0,088	0,121	0,164	0,240	0,355	0,495
$U_р$, %	0,01	0,03	0,04	0,08	0,10	0,13	0,27	0,35
φ, %	0,676	0,810	0,885	0,904	0,965	0,980	0,982	
$U_р$, %	0,48	0,54	0,62	0,65	0,82	0,84	0,92	
Десорбция								
φ, %	0,98	0,93	0,91	0,87	0,73	0,61	0,45	0,32
$U_р$, %	0,86	0,72	0,71	0,62	0,52	0,44	0,26	0,25
φ, %	0,22	0,15	0,12	0,09	0,07	0,04	0,00	
$U_р$, %	0,21	0,13	0,11	0,10	0,09	0,05	0,05	

В процессе экстрагирования (промывки) незафиксированного красителя в соответствии с ГОСТ 97332.27-83 [2] контролировалась устойчивость окраски ткани к сухому трению. Рецептура промывного раствора включала смесь анионактивного и неионогенного поверхностно активных веществ [1].

В таблице 3 приведена кинетика изменения показателя устойчивости окраски к сухому трению Т в процессе экстрагирования (промывки).

Таблица 3. Кинетика изменения устойчивости окраски ткани к сухому трению

τ, с	30	60	90	110
t, °С	20÷25	60÷65	90÷92	40÷45
Т, балл	2,75	3,00	3,75	4,35

Температура в ходе промывки менялась в соответствии с технологическим режимом. Показатель устойчивости окраски к сухому трению Т рассматривался как непрерывно изменяющийся. Максимальное значение показателя $Т_м$ может быть равным 5 [2].

Принято, что изменение показателя Т происходит в соответствии с уравнением

$$\frac{dT}{d\tau} = K(T_м - T), \qquad (1)$$

где *К*-коэффициент, учитывающий условия экстрагирования (промывки)

В результате решения уравнения (1) с использованием метода преобразования Лапласа [3] получено уравнение:

$$\frac{T}{T_м} = 1 - (1 - \frac{T_о}{T_м})e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad (2)$$

где T_0-значение устойчивости окраски к сухому трению в момент времени τ=0, обычно принимается равным 1.

B=1/*K*- const времени, которая характеризует инерционность процесса.

Координаты To и *B* определяются по методу наименьших квадратов для каждого технологического режима.

Для режима экстрагирования, приведённого в таблице 3, получено уравнение:

$$\frac{T}{5} = 1 - 0{,}875e^{-\frac{\tau}{64{,}6}}. \quad (3)$$

В таблице 4 представлены результаты сравнения показателей устойчивости окраски вискозно-лавсановой ткани к сухому трению, рассчитанных по уравнению (3) и определённых экспериментально.

Таблица 4. Сравнение экспериментальных и расчётных показателей устойчивости окраски к сухому трению

τ, с	30	60	90	110
Тэксп., баллы	2,75	3,00	3,75	4,35
Трасч., балл	2,25	3,27	3,91	4,20

Средняя квадратичная ошибка составляет 0,27 балла, что приемлемо для контроля качества экстрагирования незафиксированного красителя (промывки).

Таким образом, исследована кинетика экстрагирования (промывки) технологического загрязнения из смешанной ткани из вискозных и лавсановых волокон, получено уравнение для расчёта показателя качества промывки ткани.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сажин Б.С., Кошелева М.К., Сажина М.Б.* Процессы сушки и промывки текстильных материалов // под ред. проф Б.С. Сажина: Монография. М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2013. 301 с.

2. ГОСТ 9733.27-83 Материалы текстильные. Метод испытания устойчивости окраски к трению.

3. *Романовский П.И.* Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразования Лапласа. М.: Наука, 1980. 336 с.

УДК 51.001.572:66.023:66.011

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РЕАКТОРА ГИДРОЛИТИЧЕСКОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ КАПРОЛАКТАМА
PREDICTION OF TEMPERATURE MODE OF CAPROLACTAM HYDROLYTIC POLYMERIZATION REACTOR

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

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

Аннотация: Предложена математическая модель процесса гидролитической полимеризации капролакатама в реакторе трубчатого типа. Она позволяет прогнозировать температуру реакционной смеси, температуру теплоносителя, степень превращения мономера, профиль скоростей реакционной массы, а также конструкционные параметры реактора. Выполнен математический эксперимент, позволивший определить рациональные режимные и конструкционных параметры, обеспечивающие требуемую степень превращения мономера в полимер и поддержание температуры реакционной массы в рекомендованном диапазоне.

Abstract: Mathematical model of caprolactam hydrolytic polymerization in the tubular reactor is proposed. It allows predicting the reaction mixture temperature, heat-carrier temperature, degree of monomer conversion, reaction mixture velocity profiles, as well as construction parameters of reactor. Computational experiment, which allows to determine a rational regime and construction parameters, providing the required degree of monomer conversion and temperature of reaction mixture in the recommended range, was done.

Ключевые слова: капролактам, полимеризация, реактор, теплообмен, моделирование.
Keywords: caprolactam, polymerization, reactor, heat transfer, modeling.

Гидролитическая полимеризация капролактама является основным промышленным способом получения такого крупнотоннажного полимера как полиамид-6 или капрон, который нашёл широкое применение в технике и быту [1].

По существующим в настоящее время технологиям гидролитическая полимеризация капролактама осуществляется в расплаве при температуре 250-270 °С. Далее полученный полимер проходит стадии гранулирования, удаления низкомолекулярных соединений методом экстракции, и сушки [2]. Существенным недостатком этих технологий является принципиальная невозможность получить строго линейный полимер, что отрицательно сказывается на физико-механических показателях готовых нитей.

Устранение недостатков существующих технологий можно осуществить при совершенствовании технологии получения полиамида-6 на основе снижения температуры синтеза в расплаве на 40-50 °С [3]. Такой прием позволяет получить полимер с высокой молекулярной массой, линейного строения и с узким молекулярно-массовым распределением. Сформованные из такого полимера волокна обладают лучшими качественными показателями. Такая усовершенствованная технология получила название «низкотемпературного синтеза полиамида-6».

Аппаратурно синтез полиамида-6 путем полимеризации капролактама осуществляется в реакторе трубчатого типа. Для протекания реакции полимеризации необходимо поддерживать заданный температурный режим. Задачей математического моделирования данного процесса является прогнозирование режимных и конструкционных параметров реактора, обеспечивающих требуемую степень превращения мономера и минимальное отклонение температуры реакционной массы от оптимальной.

При составлении математической модели принимались допущения о том, что реакционная смесь движется в ламинарном режиме, теплопроводность, плотность и теплоемкость реакционной среды величины постоянные. Переносом теплоты вдоль реактора путем теплопроводности пренебрегаем по сравнению с конвективным переносом.

Поле температур реакционной массы (при стационарном режиме работы реактора) описывается уравнением:

$$W(r)\frac{\partial t(r,z)}{\partial z} = a\cdot\left(\frac{\partial^2 t(r,z)}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial t(r,z)}{\partial r}\right)+q_v,\quad 0 < r < R, \tag{1}$$

с начальным условием

$$t(r,0) = t_0\quad, \tag{2}$$

условием симметрии температурного поля

$$\partial t(0,z)/\partial r = 0\ , \tag{3}$$

и граничным условием

$$\lambda\cdot\partial t(R,z)/\partial r = \alpha\cdot\left[t_т(z)-t(R,z)\right]. \tag{4}$$

В этих уравнениях: r – текущий радиус; R – внутренний радиус трубы реактора; z – координата вдоль оси реактора; a – коэффициент температуропроводности реакционной смеси; $\alpha = \left(1/\alpha_т + \delta_{ст}/\lambda_{ст}\right)^{-1}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи; $\alpha_т$ – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке, $\delta_{ст}$, $\lambda_{ст}$ - толщина и теплопроводность материала стенки трубы; q_v – объемная плотность внутреннего источника теплоты вследствие экзотермической химической реакции, которая может быть найдена по уравнению (5):

$$q_v = \Delta H\cdot dX/d\tau\cdot\rho, \tag{5}$$

где: ΔH=13,72 (кДж/моль) – тепловой эффект реакции полимеризации; dX/dτ - скорость изменения концентрации капролактама в реакционной смеси, ρ – плотность реакционной смеси.

Кинетика полимеризации капролактама может быть описана системой уравнений [1]:

$$dX/d\tau = -\mu\cdot(X - Xp), \tag{6}$$

$$dC/d\tau = -\mu(C - Cp) + a_1\cdot e^{-\mu\tau}, \tag{7}$$

$$dU/d\tau = -\mu\cdot(U - Up) + a_2\cdot e^{-\mu\tau}, \tag{8}$$

где *Xp* – равновесное содержание капролактама в реакционной смеси, моль/кг смеси; *Cp* — равновесная концентрация концевых групп в реакционной смеси, экв/кг смеси; *Up* — равновесная концентрация ε-аминокапроновой кислоты в реакционной смеси, моль/кг смеси; μ; a_1; a_2 — коэффициенты, зависящие от температуры, содержания воды W_0, моль/кг смеси. Эти величины хорошо аппроксимируются следующими зависимостями [1]:

$$Cp = 9{,}55\cdot10^{-4}W_0^{0,5}\cdot(t-220) + 6{,}32\cdot10^{-2}\cdot W_0^{0,54}, \tag{9}$$

$$Xp = 2{,}51\cdot10^{-12}W_0^{3,29}t^{-1,3\lg W_0+4,72}, \tag{10}$$

$$Up = 4{,}8\cdot10^{-5}\cdot(t-220) + 0{,}6148\cdot W_0^{0,675}, \tag{11}$$

$$\mu = 0{,}1411\cdot10^{-23,4}\cdot t^{10,2}\cdot W_0^{0,61}, \tag{12}$$

$$a_1 = 0{,}153\cdot10^{-23,4}\cdot t^{10,2}\cdot W_0^{0,52}, \tag{13}$$

$$a_2 = 0{,}224\cdot10^{-30,5}\cdot t^{12,4}\cdot W_0^{1,16}, \tag{14}$$

где *t*—температура реакционной смеси, °C; W_0 — начальное содержание воды, моль/кг смеси.

Температура теплоносителя, движущегося через межтрубное пространство аппарата,

изменяется вследствие теплообмена с реакционной массой и окружающей средой и находится из уравнения теплового баланса в дифференциальной форме:

$$c_т G_т \cdot dt_т / dz = \alpha \cdot 2\pi \cdot R \cdot \left(t(R,z) - t_т(z)\right) - K \cdot 2\pi \cdot R_н \cdot \left(t_т(z) - t_c\right) \quad (15)$$

с краевым условием $t_Т(L) = t_{ТН}$ – начальная температура теплоносителя.

Принятые обозначения: $c_т$, $G_т$ – теплоемкость и расход теплоносителя; $R_н$ – наружный радиус аппарата; L – длина трубы; t_c – температура окружающей среды; К – коэффициент теплопередачи от теплоносителя к окружающей среде:

$$K = \frac{1}{1/\alpha_т + \delta_р/\lambda_р + \delta_{из}/\lambda_{из} + 1/\alpha_c}. \quad (16)$$

Здесь $\delta_р$ – толщина стенки обечайки рубашки аппарата, $\lambda_р$ – теплопроводность материала рубашки; $\delta_{из}$ – толщина слоя тепловой изоляции; $\lambda_{из}$ – теплопроводность материала изоляции; α_c – коэффициент теплоотдачи от наружного слоя изоляции к окружающей среде.

Поле скоростей для установившегося ламинарного движения потока внутри вертикальной трубы описывается уравнением (17) с дополняющим соотношением (18):

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(\mu r \frac{\partial w_z}{\partial r}\right) = \Gamma \cdot \rho \cdot g + \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (17)$$

где Г – геометрический фактор, зависящий от направления движения: Г= -1 при движении снизу вверх, Г= 1 при движении сверху вниз.

$$G = \int_0^R 2\pi r \rho w_z(r) dr. \quad (18)$$

Вязкость реакционной массы зависит от температуры и конверсии мономера и аппроксимирована следующим уравнением

$$\mu = 2,729 \exp\left[-0,018t + K_\mu(1 - X/X_i)\right], \quad (19)$$

где K_μ – эмпирический коэффициент.

Решение системы уравнений математического описания осуществлялось методом конечных разностей. Программная реализация разработанной математической модели выполнена в программном пакете MathCAD. Проведен вычислительный эксперимент, позволивший определить рациональные значения технологических и конструкционных параметров реактора опытно-промышленного масштаба производительностью 1000 кг/сутки.

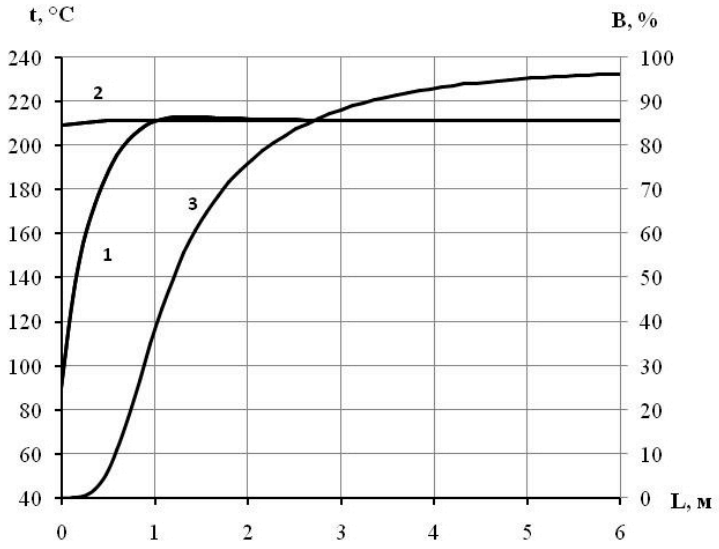


Рис. 1. Изменение температуры реакционной массы (1), температуры теплоносителя (2) и конверсии мономера (3) по длине реактора

Рассматривались два варианта конструктивного исполнения реактора: «труба в трубе» и многотрубный. Эксперимент показал, что оптимальным является многотрубный вариант реактора, т.к. при меньших габаритах в нём быстрее устанавливается заданный температурный режим, а, следовательно, и время пребывания реакционной массы в нём меньше. Графики рис. 1, 2 иллюстрируют изменение средних по сечению параметров реакционной массы и температуры теплоносителя по длине реактора.

Моделировался аппарат с диаметром кожуха 800 мм и трубками 25х2 мм в количестве 465

штук. Длина участка прогрева расплава капролактама до температуры реакции составляет 1 м, далее температура поддерживается в диапазоне 210-212 °С и близка к температуре теплоносителя. Конверсия мономера на выходе из реактора достигает 96 % (рис. 1).

На рис. 2-3 приведены графики изменения параметров реакционной массы в радиальных сечениях. Небольшой температурный градиент по радиусу трубки реактора наблюдается на начальном участке (10% от длины реактора), далее реакционная масса прогревается равномерно по всему сечению трубки и уже после 15% длины устанавливается требуемая температура (рис. 2).

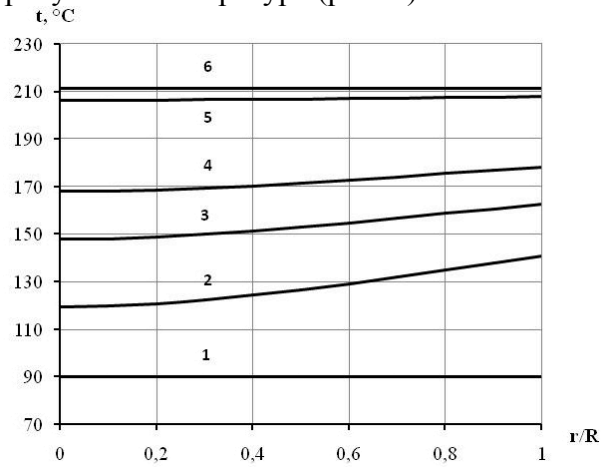


Рис. 2. Радиальный профиль температуры реакционной массы в различных сечениях:
1 - z/L =0; 2 – z/L=0,02; 3 – z/L=0,04; 4 – z/L=0,06; 5 – z/L=0,14; 6 – z/L=1

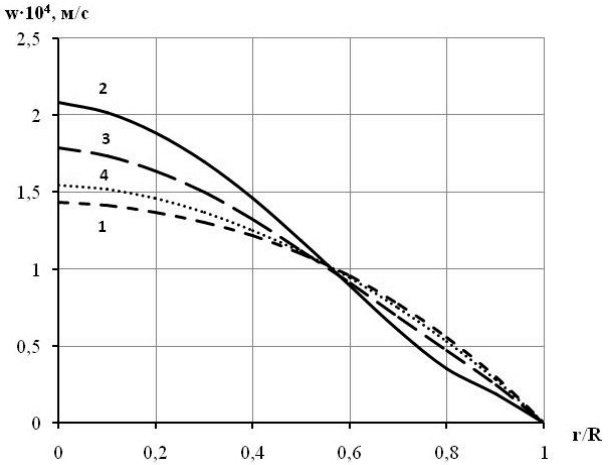


Рис. 3. Профиль скорости реакционной массы в различных сечениях трубки реактора:
1 – z/L=0,02; 2 – z/L=0,2; 3– z/L=0,4; 4– z/L=1

Вследствие изменения вязкости с ростом степени полимеризации и конверсии мономера радиальный профиль скоростей на начальном участке реактора отличается от классической параболической зависимости. Перестройка профилей скорости наблюдается на 50% длины трубы. Далее профиль скорости соответствует закону квадратичной параболы для ламинарного режима движения потока (рис. 3).

Таким образом, разработанная математическая модель трубчатого реактора полимеризации капролактама правильно отражает основные закономерности процесса. Она позволяет прогнозировать температурный режим реактора, среднюю степень конверсии мономера, а также профили скоростей реакционной массы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вольф Л.А., Хайтин Б.Ш.* Производство поликапроамида. М.: Химия, 1977. 201 с.

2. *Липин А.А., Липин А.Г., Кириллов Д.В.* Прогнозирование рациональных режимно-технологических параметров процесса сушки гранулированного поликапроамида // Вестник СГТУ. 2011. №4(62). Вып. 4. С. 106-109.

Мизеровский Л.Н., Базаров Ю.М., Павлов М.Г. Перспективы совершенствования технологии получения поликапроамида, используемого в производстве текстильных и технических нитей. Часть 2 // Химические волокна. 2003. № 6. С. 9-14.

УДК 536.24 (075.8)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ
MODELING OF TRANSPORT PROCESSES IN MULTILAYER ENCLOSURE CONSTRUCTIONS

Ренат Ахатович Садыков
Renat A. Sadykov

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Казань
Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia, Kazan
(E-mail: sadykov_r_a@mail.ru)

Аннотация: Приводится формализация обобщённой краевой задачи процессов переноса в многослойной ограждающей конструкции (МОК) и алгоритмы её решения в зависимости от их физического описания и условий однозначности. Строятся и анализируются решения многообразных конкретных физических процессов, протекающих в МОК при постоянных или переменных теплофизических характеристик материалов, наличии положительных или отрицательных источников теплоты.

Abstract: Formalization of a boundary value problem of transfer processes in multilayered enclosure constructions (MEC) and algorithms for its solution depending on the physical description and uniqueness conditions are presented. Solutions of diverse specific physical processes occurring in MEC under constants or variable thermo physical characteristics and positive or negative thermal sources are built and analyzed as well.

Ключевые слова: математическая модель, краевая задача, процесс, конструкция, перенос, теплота, влага, фильтрация.

Keywords: mathematical model, boundary problem, process, design, transfer, warmth, moisture, filtration.

Процессы тепломассопереноса, фильтрации парогазовых смесей и жидкостей через капилляры многослойных ограждающих конструкций (МОК) весьма сложны и взаимосвязаны. Кроме того, в зависимости от периода года они сопровождаются такими физическими явлениями, как испарительное охлаждение или конденсационный нагрев. Осуществление же плотного наружного слоя ограждающих конструкций (ОК) зданий и сооружений возможно не во всех случаях, т. к. такое конструктивное решение ухудшает влажностное состояние ограждения из-за трудностей воздухопроницаемости, а, следовательно, и его просушки в летний период года.

Современные многослойные энергосберегающие ОК (под которыми в широком смысле, кроме ОК зданий подразумеваются также тепловые, инженерные и электрические сети, емкости и резервуары для подогрева, охлаждения или хранения каких-либо жидкостей или газов и т. п.) в основном состоят из капиллярно-пористых материалов, которые находят все большее применение не только в строительстве, но и многих других отраслях промышленности (высокотемпературные теплообменники, турбинные лопатки, ракетные сопла, обшивка высокоскоростных летающих аппаратов, обмуровка тепло- и электрогенерирующих установок, системы ядерных реакторов с внутренним охлаждением и т. д.), где различные элементы оборудования подвержены достаточно высоким термическим напряжениям и давлениям, возникающим в результате больших градиентов температуры и давления.

В наиболее общем случае систему нелинейных дифференциальных уравнений (СНДУ) конвективного нестационарного переноса можно записать в следующей векторной форме:

$$\mathrm{D}\bar{S}[\bar{\Pi}(\bar{x},\tau)] + \bar{\tau}_r\, \bar{S}_{\tau\tau}[\bar{\Pi}(\bar{x},\tau)] + \mathrm{sgn}[\,\bar{J}\,] < \bar{\nabla},\ \bar{J}[\bar{\Pi}(\bar{x},\tau)] > + sgn[\bar{I}_V]\bar{I}_V[\bar{\Pi}(\bar{x},\tau)] = \bar{0}, \qquad (1)$$

где $D = \partial_\tau + < \bar{\nabla}, \bar{\omega} >$ - производная Лагранжа; ∂_τ – локальная составляющая скорости изменения потенциала переноса; $<\cdot,\cdot>$ - знак скалярного произведения векторов; $\bar{\nabla}$ - оператор Гамильтона; $\bar{\omega}$ - скорость перемещения капельной жидкой частицы из одной точки пространства в другую; $< \bar{\nabla}, \bar{J} > = div\bar{J}$; $sgn[\cdot]$ – функция «знак»; $\bar{x} = (x_i)$ – вектор пространственных координат; $i = \overline{1,3}$; τ – время; $\bar{\tau}_r$ – вектор-столбец периодов релаксации процессов переноса; $\bar{S}$ - вектор-столбец субстанций; $\bar{S}_{\tau\tau}$ – вторые частные производные по времени $\bar{S}$; $\bar{J}$ - вектор-столбец потоков; $\bar{I}_V$ - вектор-столбец объёмных источников; $\bar{\Pi}$ - вектор-столбец потенциалов переноса.

Система (1) описывает и высокоинтенсивные процессы (второй член уравнения), когда скорость распространения субстанции сопоставима со скоростью протекания самих процессов. Если же базироваться на феноменологической теории процессов переноса, то второго члена в СНДУ (1) не будет, т.к. скорость распространения потоков субстанции стремится к бесконечности, а $\bar{\tau}_r$ стремится к нулю [6, 10]. В этом случае СНДУ (1) переходит из гиперболического типа в параболический, который описывает уже необратимые процессы конвективного сопряжённого переноса и, в частности, процессы тепло- и массопереноса.

Например, для стационарного нелинейного теплопереноса с учетом фильтрации (газа, парогазовой смеси, жидкости) и наличия внутренних объемных стоков (влаги) или источников теплоты (ИТ) при общепринятых допущениях [1-5] в одномерном случае применительно к каноническим формам в соответствующих системах координат уравнение (1) может быть записано в виде обыкновенного дифференциального неоднородного уравнения второго порядка:

$$[\lambda(t)t']' + \frac{\Gamma}{r}[\lambda(t)t']' + \mathrm{sgn[J]J(t)c_p(t)}t' + \mathrm{sgn[I]I(t)} = 0 \qquad (2)$$

где t(r) – температура; r – текущая координата, $r\epsilon[0,h]$, h – толщина многослойной ОК; λ – коэффициент теплопроводности ОК (возможно с учетом её объемной пористости П); Γ – постоянная формы (Γ=0;1;2 – соответственно неограниченные пластина, цилиндр или квадратный брусок, шар или куб); c_p – изобарная теплоемкость паровоздушной смеси; J – плотность потока паровоздушной смеси, здесь «+» означает процесс эксфильтрации, «–» – инфильтрации паровоздушной смеси; I (t) – мощность внутреннего ИТ (+) или стока (–); «'» (верхний штрих) – дифференцирование по r.

Если I=const, то в рассматриваемой области термических сопротивлений действует непрерывно-равномерно распределенный положительный или отрицательный ИТ.

Если I(t)≠const, то в этой области действуют местные, сосредоточенные или распределенные положительные или отрицательные ИТ.

При физическом описании процессов охлаждения ОК (возможно и испарительного) или нагрева (возможно и конденсационного) аналогично уравнению (2) могут быть составлены тепловые балансы как для области $r\,\epsilon[-\infty,0]$, так и для области $r\,\epsilon[h,+\infty]$, которые приводят к новым дифференциальным уравнениям набегающего к ОК и отходящего от ОК потоков газа (или жидкости) с соответствующими для новых закрытых интервалов r граничными условиями. В этом случае к дифференциальному уравнению (1) добавляются в зависимости от условий задачи еще один или два дифференциальных уравнения второго порядка и соответственно два или четыре граничных условия. Таким образом, математическая модель (ММ) даже для стационарного теплопереноса в ОК должна содержать в себе три дифференциальных уравнения второго порядка и шесть граничных условий для нахождения соответствующих констант интегрирования. В этом случае температурное поле t(r) в ОК выражается через температуры окружающего воздуха (газа, жидкости, теплоносителя или хладагента) по обе ее стороны. В более упрощенном варианте эти граничные дифференциальные уравнения для ОК заменяются краевыми условиями третьего рода с возможным учетом на границе поверхностей ОК поверхностных стоков или ИТ [6-10]. В свою очередь, уравнение (2) с граничными условиями третьего рода может быть заменено более простыми граничными условиями первого рода при условии ввода

постоянных фиктивных (эквивалентных) пограничных слоев. Анализ конвективного теплообмена показывает, что в этом случае граничные условия третьего рода фактически отображаются в граничные условия первого рода. Тогда при интегрировании уравнения (2) и наличии в граничных условиях двух изотермических поверхностей можно использовать преобразование Кирхгофа [7], которое через новую вспомогательную переменную θ и средний коэффициент теплопроводности λ_c приводит дифференциальное уравнение (2) к формализации следующей краевой задачи:

$$\begin{cases} \theta'' + \dfrac{\Gamma}{r} + sgn[J]\dfrac{J(\theta)c_p(\theta)}{\lambda_c}\theta' + sgn[I]\dfrac{I(\theta)}{\lambda_c} = 0 & (3) \\ \theta(0) = \theta_1 = t_1 & (4) \\ \theta(h) = \theta_2 = t_2 & (5) \end{cases}$$

$$\lambda_c\theta' = \lambda(t)t', \quad (6)$$

где $\lambda_c = \frac{1}{\Delta t}\int_{t_1}^{t_2}\lambda(\xi)d\xi$, $\Delta t = t_2 - t_1$; $t_2 > t_1$; t_1 и t_2 – температуры противоположных поверхностей ОК. Направление потока тепла относительно $r \geq 0$ определяется граничными условиями задачи.

Формализованную задачу (3)–(5) можно переписать в критериальном виде через критерии Пекле (Pe) и Померанцева (Po) и безразмерных масштабах температуры (T) и термического сопротивления ($\overline{R}$), что особенно удобно, т. к. позволяет перевести многослойную ОК в однослойную.

В этом случае, опуская промежуточные преобразования, задачу (3)–(5) можно записать в виде:

$$\begin{cases} T'' + \frac{\Gamma}{R}T' + sgn[Pe]Pe(T)T' + sgn[Po)]Po(T) = 0 & (7) \\ T(0) = 0 & (8) \\ T(1) = 1 & (9) \end{cases},$$

где $T = \frac{\theta-\theta_1}{\theta_2-\theta_1} \in [0,1]$ – безразмерная температура, $\overline{R} = \frac{R}{R_0} \in [0,1]$ – безразмерное термическое сопротивление, здесь R = r/λ – текущее термическое сопротивление, R_0 – общее термическое сопротивление (суммарное, приведенное, требуемое или многослойной стенки), которое выбирается в зависимости от принятых граничных условий; $Pe = J(T)c_p(T)R_0$(в строительной теплофизике выражение Jc_pR_0 называют относительным коэффициентом фильтрационного теплообмена [3], характеризующим отношение тепловой емкости потока воздуха Jc_p к коэффициенту теплопередачи ограждения K=1/R_0). Если учесть объемную пористость (П) ОК, то $Pe = \frac{J(T)c_p(T)}{1-\Pi}R_0$; $Po = I(T)h^2/\lambda_c\,\Delta T$, в этой постановке задачи ΔT в критерии Померанцева можно опустить, т. к максимальный перепад температур равен единице; «'» (верхний штрих) – дифференцирование по $\overline{R}$.

Если известны пределы изменения Pe и Po, то знак сигнатуры в уравнении (7) в принципе можно опустить, если рассматривать эти критерии только в закрытом интервале [0,1]. Тогда критерии Пекле и Померанцева запишутся в виде $\overline{Pe} = (Pe - \inf Pe)/(\sup Pe - \inf Pe)$, $\overline{Po} = (Po - \inf Po)/(\sup Po - \inf Po) \in [0,1]$. В этом случае все зависимые и независимые переменные и параметры поставленной краевой задачи безразмерны и лежат в четырехмерном нормированном единичном пространстве $(T, \overline{R}, \overline{Pe}, \overline{Po})$. Тогда система (7)–(9) перепишется в виде:

$$\begin{cases} T'' + \frac{\Gamma}{R}T' + \overline{Pe}(T)T' + \overline{Po}(T) = 0 & (10) \\ T(0) = 0 & (11) \\ T(1) = 1 & (12) \end{cases},$$

Таким образом, приведенные преобразования значительно упрощают математическую формализацию задачи, устраняют физические размерности и знаки, решают вопросы масштабного перехода. Единственно, несколько усложняется физическая интерпретация

задачи, особенно когда в вышеуказанном пространстве строится графическое решение задачи, где фактически как бы «теряются» направленность потока (J) и знак ИТ (I) из-за отсутствия отрицательных значений параметров задачи в закрытом интервале [0,1], но это усложнение легко устраняется при обратном переходе к первоначальным параметрам поставленной задачи. Конкретные и более подробные решения ряда поставленных физических краевых задач автор надеется представить на предстоящем международном научно-техническом форуме (МНТФ Косыгин-2017).

Предлагаемая обобщенная ММ процессов нелинейного сопряжённого переноса в многослойной ОК позволяет независимо от масштабов исследуемого объекта и направления потоков:

- рассчитывать поля потенциалов переноса и их потоки, коэффициенты переноса (теплоотдачи, теплопередачи, термического сопротивления, порового охлаждения, фильтрационного охлаждения и т.д.) и др. производные характеристики с учетом влагосодержания, различного рода включений или неоднородностей ОК для многообразных классов физических явлений или процессов;
- учитывать в расчетах полей переноса (тепла, влаги, парогазовой смеси) изменение теплофизических характеристик от толщины МОК или ее термического сопротивления;
- использовать полученные результаты для практических расчетов при проектировании многослойных ОК зданий и сооружений, тепловых инженерных сетей, разработке СНиПов, СП по тепловой защите зданий и др.;
- проводить расчеты как тепло-, так и массопереноса различных ОК для канонических систем координат (декартовой – для пластин, стен; цилиндрической – для трубопроводов; сферической – для ёмкостей и т.п.). Это связано с аналогией законов переноса и позволяет с точностью до переобозначения символов успешно использовать полученные закономерности и для других процессов. Например, в приведенных уравнениях (2)-(6) символ температуры можно заменить на символ влагосодержания, а вместо теплообменных критериев в представленной задаче можно использовать массообменные и далее соответственно проинтерпретировать ту или иную поставленную физическую задачу.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ильинский В. М.* Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий). М., «Высшая школа», 1974. 320 с.

2. *Фокин К. Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М., АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.

3. Богословский В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов / Изд. 3-е, перераб. и доп. – С-Пб.: «АВОК Северо-Запад», 2006. 400 с.

4. Ушков Ф. В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха. – М.: Стройиздат, 1969. 144 с.

5. *Hugo Hens. Building Physics – Heat, Air and Moisture.* – John Willey & Sons Limited, 2007. 270 p.

6. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.* Теплопередача. М., «Энергоиздат», 1981, 416 с.

7. *Коздоба Л. И.* Методы решения нелинейных задач теплопроводности. М., «Наука», 1975. 227 с.

8. *Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М.* Теория тепло- и массообмена. М.–Л., «Госэнергоиздат», 1961. 680 с.

9. *Исаев С. И., Кожинов И. А., Кофанов В. И. и др.* Теория тепломассообмена (под ред. Леонтьева А. И.). М., «Высшая школа», 1979. 495 с.

10. *Лыков А.В.* Тепломассообмен (Справочник). М., «Энергия», 1971. 560 с.

УДК 621.928.9

НОВЫЕ СПОСОБЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВ И ГРУППОВЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ
NEW METHODS OF GAS CLEANING AND GROUP DUST EXTRACTS BASED ON INTERACTING VORTEX FLOWS

Александр Васильевич Акулич, Виктор Михайлович Лустенков, Александр Александрович Акулич
Alexander Akulich, Viktor Lustenkov, Alexander Akulich

Могилевский государственный университет продовольствия, Беларусь, Могилев,
Mogilev State University of Food Technologies, Belarus, Mogilev
(e-mail: mgup@mogilev.by)

Аннотация: Разработаны новые способы очистки газов от твердых частиц и конструкции групповых пылеуловителей противоточного и прямоточного типа на основе взаимодействующих вихревых потоков. Проведены экспериментальные исследования гидродинамики групповых пылеуловителей. Разработаны и внедрены промышленные образцы групповых вихревых пылеуловителей.

Abstract: New methods have been developed for purifying gases from solid particles and for constructing group dust collectors of countercurrent and straight-flow type on the basis of interacting vortex flows. Experimental studies of the hydrodynamics of group dust collectors have been carried out. Industrial samples of group vortex dust collectors have been developed and introduced.

Ключевые слова: Очистка газов, вихревые потоки, групповой противоточный вихревой пылеуловитель, групповой прямоточный вихревой пылеуловитель, гидродинамика, гидравлическое сопротивление.

Keywords: Purification of gases, vortex flows, group countercurrent vortex dust collector, group direct flow vortex dust collector, hydrodynamics, hydraulic resistance.

Для выпуска конкурентноспособной продукции в условиях рыночной экономики предприятиями Республики Беларусь в различных отраслях народного хозяйства осуществляются мероприятия по энерго–и ресурсосбережению, направленные на разработку и внедрение новых технологий и оборудования.

На предприятиях пищевой промышленности переработка растительного и животного сырья сопровождается выделением в воздушную среду мелкодисперсных материалов. Данная проблема особенно актуальна в крупнотоннажном производстве, для которого очистка отработанных пылегазовых выбросов кроме экологического аспекта, также сказывается на себестоимости готовой продукции.

Достижение требуемой эффективности очистки отработанных газовых потоков может быть достигнуто, в том числе, установкой дополнительных пылеуловителей, принцип действия которых основан на использовании различных способов сухого улавливания дисперсных частиц. Однако при этом происходит повышение гидравлического сопротивления систем пылеочистки и как следствие – рост энергозатрат, а также увеличение металлоемкости и габаритов.

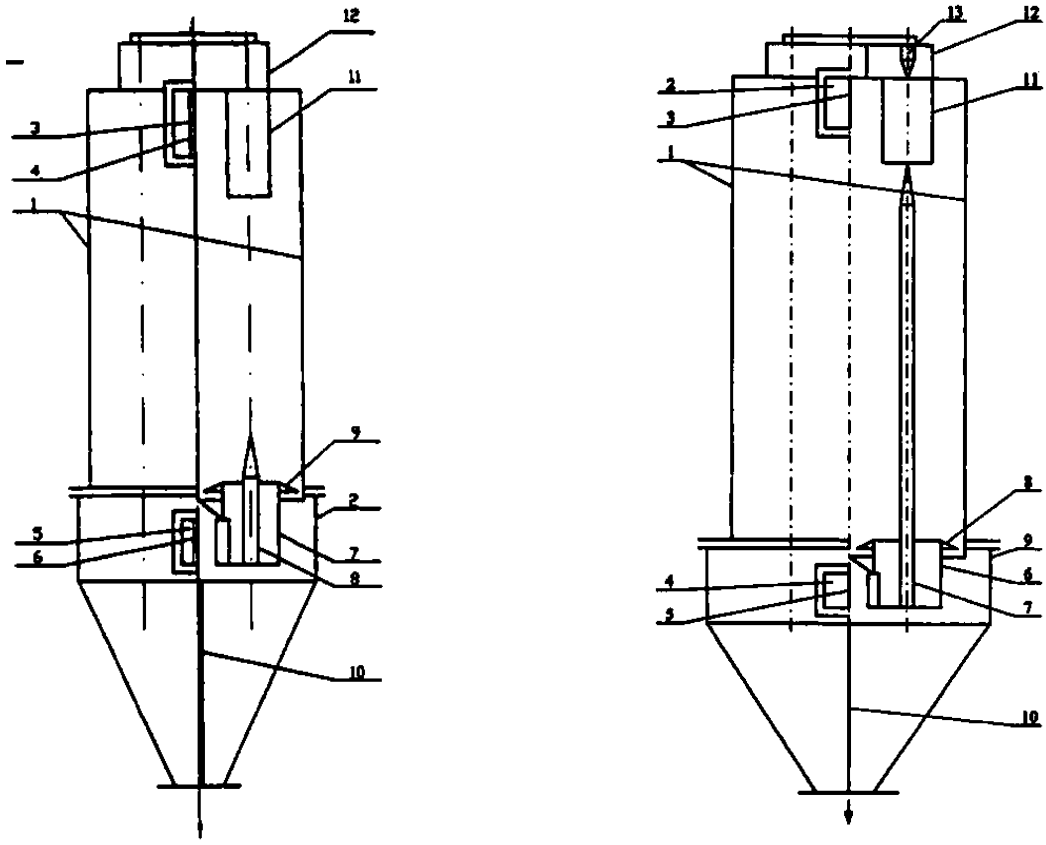
Поэтому разработка и внедрение эффективного высокопроизводительного пылеулавливающего оборудования является приоритетной задачей, решение которой позволяет снизить энергозатраты, сократить количество выбросов в окружающую среду и вернуть в производственный цикл уловленный материал.

Исследования показали, что значительную часть пылеулавливающего оборудования на предприятиях составляют циклоны, показатели эффективности работы которых не всегда отвечают современным требованиям. Незначительно пока еще распространены более

совершенные пылеуловители – аппараты на основе взаимодействующих вихревых потоков, прямоточного и противоточного типа. Принцип действия которых основан на взаимодействии двух закрученных потоков газовзвеси, периферийного и центрального, подаваемых в цилиндрическую камеру центробежного улавливания. Следует отметить, что их эффективность улавливания может достигать 98…99% при невысоком гидравлическом сопротивлении. Для тонкой очистки газов применяются фильтры различных конструкций [1-3].

Проведенный сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований гидродинамики изготовленных моделей прямоточного вихревого пылеуловителя (ПВП) и вихревого противоточного пылеуловителя (ВПП) показал, что при прочих равных условиях прямоточный вихревой пылеуловитель характеризуется меньшим гидравлическим сопротивлением, чем вихревой противоточный пылеуловитель, обеспечивая при этом достаточно высокую эффективность улавливания дисперсных материалов [4].

Для расширения области применения вихревых аппаратов, в том числе в крупнотоннажных производствах, авторами разработаны новые способы очистки газов и групповые пылеуловители на основе взаимодействующих вихревых потоков.



а) б)

Рис. 1. Новые конструкции противоточных групповых вихревых пылеуловителей (ГВП) на основе взаимодействующих закрученных потоков.

1 – корпуса противоточных вихревых пылеуловителей; 2 – общий бункер уловленной пыли; 3 – патрубок периферийного потока газовзвеси; 4, 6 – перегородки; 5 – патрубок центрального потока газовзвеси; 7 – завихрители; 8 – вытеснители; 9 – отбойные шайбы; 10 – вертикальная разделительная перегородка; 11 – патрубки вывода очищенного газа; 12 – улиточные раскручиватели; 13 – дополнительные цилиндроконические вытеснители

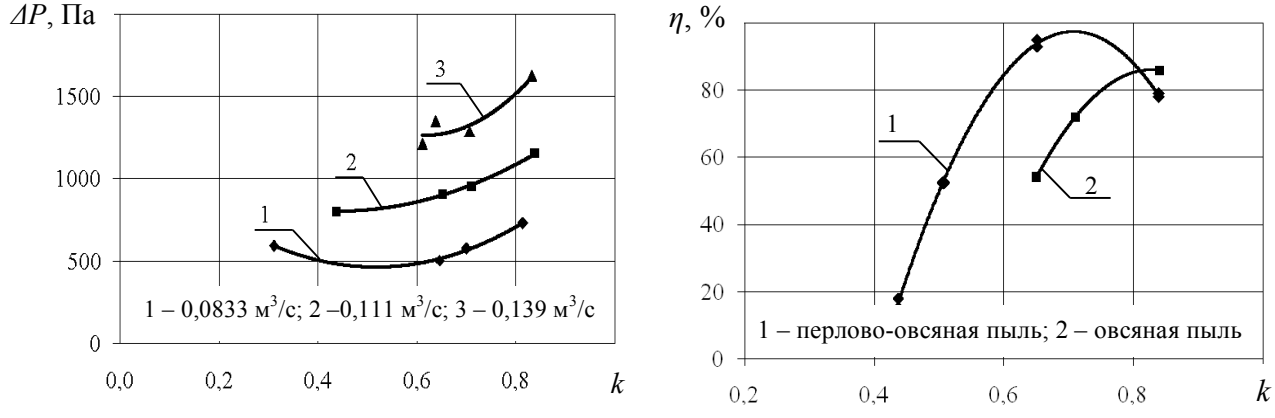
Разработан новый способ очистки пылегазовых потоков, который реализован в групповом вихревом пылеуловителе, содержащем корпуса противоточных вихревых пылеуловителей 1, установленные без зазора на общем бункере 2 уловленной пыли с

патрубками периферийного потока газовзвеси 3, объединенными в один и разделенными перегородкой 4, и патрубками для ввода центрального потока газовзвеси 5, объединенными в один и разделенными перегородкой 6 [5]. Патрубки центрального потока 5 подсоединены к завихрителям 7, снабженными вытеснителями 8 и отбойными шайбами 9, размещенными в плоскости соединения корпусов с общим бункером, при этом перегородки 4 и 6 установлены в плоскости, проходящей через линию соединения корпусов (рис. 1а). Общий бункер снабжен вертикальной разделительной перегородкой 10, установленной в плоскости, проходящей через линию соединения корпусов. Очищенный газ выводится из пылеуловителя через патрубки вывода очищенного газа 11. На патрубках вывода очищенного газа 11 установлены улиточные раскручиватели 12. Равномерное распределение запыленного газа между корпусами пылеуловителей в равных долях создает в них одинаковую аэродинамику, способствующую повышению эффективности очистки газа от мелкодисперсных частиц.

Для предотвращения образования зон разряжения и формирования обратных вихрей по высоте корпусов противоточных вихревых пылеуловителей с целью выравнивания градиента давления по их сечению авторами предложена новая конструкция батарейного вихревого пылеуловителя [6]. Аппарат (рис. 1б) содержит корпус 1, образованный из двух частей, соединенных без зазора, патрубок 3 периферийного потока газовзвеси, разделенный перегородкой 4, патрубок 5 центрального потока, разделенный перегородкой 6, два завихрителя 7, цилиндроконические вытеснители 8, выполненные по всей высоте корпуса 1, две отбойные шайбы 9, расположенные в плоскости соединения корпуса с бункером 2 уловленной пыли, снабженным вертикальной разделительной перегородкой 10, два патрубка 11 вывода очищенного газа с улиточными раскручивателями 12, по всей высоте которых установлены дополнительные цилиндроконические вытеснители 13.

Проведены экспериментальные исследования гидродинамики лабораторной модели вихревого противоточного пылеуловителя батарейного типа от кратности расходов k при различных общих объемных расходах воздуха (рис. 2).

Установлено, что в интервале k=0,55÷0,70 гидравлическое сопротивление пылеуловителя наименьшее для исследованных общих объемных расходов газа (рис. 2а). Экспериментально установлено, что гидравлическое сопротивление вихревого противоточного пылеуловителя батарейного типа при k=0,55÷0,70 составляет от 460 до 1250 Па.



а) б)

Рис. 2. Зависимости гидравлического сопротивления *ΔP* и эффективности улавливания *η* от кратности расходов *k*.

Разработан новый энергоэффективный способ очистки газов от твердых частиц на основе взаимодействующих закрученных потоков, в котором реализована групповая компоновка цилиндрических камер улавливания прямоточных вихревых пылеуловителей на общем бункере уловленных частиц с объединением подачи газовзвеси в периферийный и

центральный потоки и общим отводом очищенного газа. При этом камеры установлены без зазора, а входные патрубки периферийного и центрального потоков имеют разделительные перегородки [7].

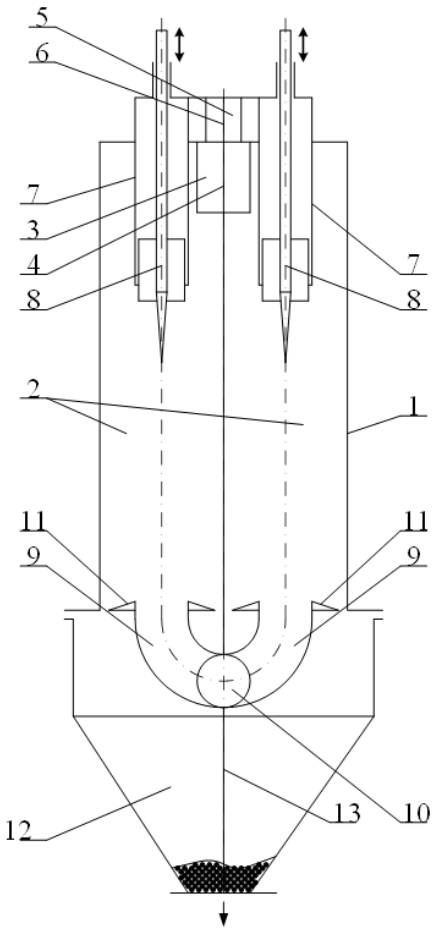


Рис. 3. Групповой прямоточный вихревой пылеуловитель (ГПВП).
1 – корпус; 2 – цилиндрические камеры центробежного улавливания; 3 – патрубок периферийного потока газовзвеси; 4, 6 – перегородки; 5 – патрубок центрального потока газовзвеси; 7 – завихрители центрального потока газовзвеси; 8 – цилиндроконические вытеснители; 9 – выхлопные трубы; 10 – патрубок отвода очищенного газа; 11 – отбойные шайбы; 12 – бункер уловленной пыли; 13 – вертикальная разделительная перегородка

Групповой прямоточный вихревой пылеуловитель (ГПВП) включает корпус 1, состоящий из двух цилиндрических камер центробежного улавливания 2 (рис. 3), установленных без зазора, патрубок 3 периферийного потока газовзвеси, установленный в верхней части корпуса в месте соединения цилиндрических камер центробежного улавливания 2, разделенный перегородкой 4, патрубок 5 центрального потока газовзвеси, разделенный перегородкой 6, два завихрителя 7 центрального потока газовзвеси, два цилиндроконических вытеснителя 8, установленные в центральных завихрителях 7, две выхлопные трубы 9, установленные в нижней части корпуса 1 по оси каждой цилиндрической камеры центробежного улавливания 2, объединенные в патрубок 10 отвода очищенного газа, две отбойные шайбы 11, установленные на выхлопных трубах 9 в плоскости соединения, корпуса 1 с бункером 12 уловленной пыли, вертикальную разделительную перегородку 13, установленную в бункере 12 уловленной пыли в плоскости проходящей через линию соединения цилиндрических камер центробежного улавливания 2 корпуса 1. Предусмотрена возможность изменения места ввода центральных потоков по высоте цилиндрических камер центробежного улавливания 2, что позволяет регулировать время взаимодействия периферийного и центрального потоков, поддержать крутку периферийных потоков, которая ослабевает по мере их нисходящих движений, что обеспечивает высокую эффективность улавливания при снижении гидравлического сопротивления.

Изготовлена лабораторная модель группового прямоточного вихревого пылеуловителя с диаметром камер центробежного улавливания 0,12 м и высотой 0,48 м и проведены экспериментальные исследования его гидродинамики. При экспериментах изменялся общий объемный расход газа через аппарат Q=0,082÷0,194 м3/с в интервале кратности расходов k=0÷1 [8]. Общий объемный расход газа через каждую камеру центробежного улавливания составил Q=0,041÷0,097 м3/с при плановой скорости υпл=3,63÷8,58 м/с. Полученные результаты представлены в виде зависимостей гидравлического сопротивления ΔP от кратности расходов k при различных общих объемных расходах газа (рис. 4).

Анализ показал, что с увеличением общего объемного расхода газа через аппарат гидравлическое сопротивление возрастает. При этом минимальные значения ΔP приходятся на интервал кратности расходов k=0,55÷0,7 и для различных объемных расходов газа достигают значений: ΔP=520 Па при Q=0,069 м3/с; ΔP=780 Па при 0,083 м3/с; ΔP=920 Па при 0,097 м3/с.

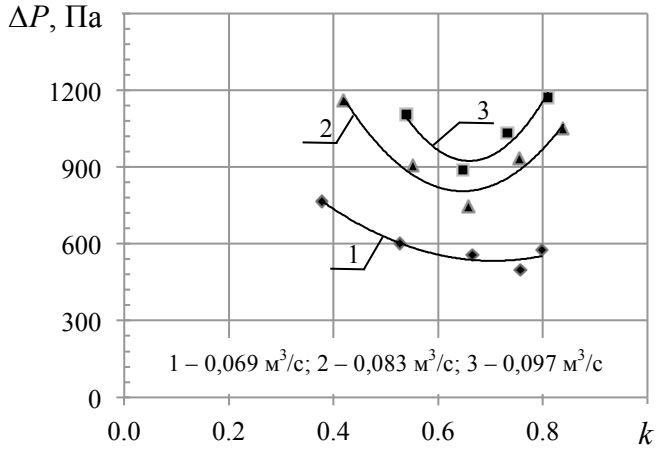


Рис. 4. Зависимости гидравлического сопротивления ΔP группового прямоточного вихревого пылеуловителя от кратности расходов k.

Разработанные групповые пылеуловители на основе вихревых потоков внедрены на производстве. Так для улавливания йодировонной соли в крупнотоннажном производстве на ОАО «Мозырьсоль» разработан и внедрен промышленный групповой вихревой пылеуловитель ГВП-750-2 (рис. 5а) с производительностью по запыленному газу Q=22520÷26280 м^3/ч и плановой скоростью $\upsilon_{пл}$=6,5÷7 м/с [9].

Диаметр каждого из корпусов составляет 0,75 м, а высота сепарационной зоны – 3,1 м с диаметром цилиндрической части 1,8 м. Аппарат установлен и обвязан в цехе № 2 после барабанной сушилки. В системе пылеочистки на участке «Геркулес» ОАО «Лидапищеконцентраты» внедрен батарейный вихревой пылеуловитель БВП–350–2 (рис.5б).

а) б)

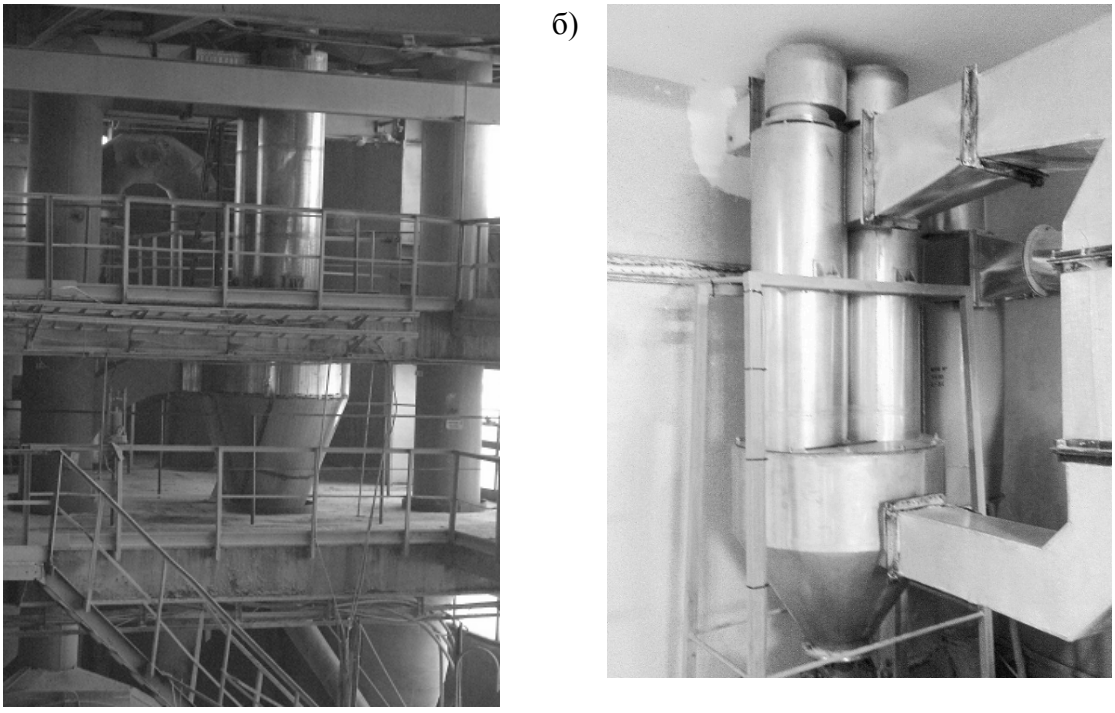


Рис. 5. Промышленные групповые вихревые пылеуловители.
а) ГВП–750–2; б) БВП–350–2

ЛИТЕРАТУРА

1 Справочник по пыле- и золоулавливанию. Под общей ред. А.А.Русанова. – М.: Энергия, 1975.– 296с.

2 Сажин Б.С. Вихревые пылеуловители / Б.С. Сажин , Л.И. Гудим. – Москва: Химия, 1995. – 144 с.

3 Акулич А. В., В Лустенков. М., Шушкевич К.В., Акулич А.А. Новое в теории и технике очистки газов от пыли на основе взаимодействующих вихревых потоков // Вестник МГУП. – 2012. – № 2 (13). – С. 101–106.

4 Клепча О.С., Акулич А.В., Лустенков В.М. Сравнение прямоточных и противоточных вихревых пылеуловителей: тезисы докладов X Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов «Техника и технология пищевых производств», Могилев, 28–29 апреля 2016 г. / Могил. гос. ун-т продовольствия; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев, 2016. – 256 с.

5 Акулич А.В., Шушкевич К.В. Групповой вихревой пылеуловитель. Патент Республики Беларусь 8329, МПК^{7} В 04С 3/06, 5/28, 2006.

6 Акулич А.В., Шушкевич К.В., Акулич А.А. Батарейный вихревой пылеуловитель. Патент Республики Беларусь 17948, МПК^{7} В 04С 3/06, 2014.

7 Акулич А.В., Лустенков В.М., Акулич А.А. Способ очистки газа от твердых частиц. Евразийская заявка на изобретение №2017/EA/0023 от 17.04.2017 г.

8 Акулич А.В., Лустенков В.М., Акулич А.А., Летун К.С. Разработка группового прямоточного пылеуловителя на основе взаимодействующих закрученных потоков. Материалы XI международной научно-технической конференции «Техника и технология пищевых производств», Могилев, 20–21 апреля 2017 г. / Учреждение образования «Могил. гос. ун-т продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. Ред.) [и др.]. – Могилев, 2017.– С. 234.

9 Акулич А.В., Шушкевич К.В., Кондриков Н.В. Разработка и исследование новой конструкции вихревого пылеуловителя большой производительности для системы пылеочистки после барабанной сушилки соли. Труды II-ой международной научно-практической конференции "Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы)", СЭТТ-2005, 11-14 октября 2005, том 2.- М.: Издательство ВИМ, 2005. – С. 302-304.

УДК 678.742.2-405.8

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ВСПЕНИВАНИЯ ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА
MATHEMATICAL MODEL FOR FOAMING RECYCLED POLYETHYLENE

Светлана Ивановна Бухкало, Сергей Петрович Иглин, Оксана Игоревна Ольховская
Svetlana I. Buhkhalo, Sergey P. Iglin, Oksana I. Olkhovskaya

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина
National Technical University «KhPI», Kharkiv, Ukraine
(e-mail: bis.khr@gmail.com)

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности повышения эффективности использования ТБО на комплексном предприятии, которое может обеспечивать все свои энергетические потребности самостоятельно. Исследования направлены на изучение таких вопросов, как разработка моделей утилизации-модификации полимерной части ТБО. При этом учитывались факторы выбора научно-обоснованных методов переработки и утилизации полимеров; разработка необходимых технологических схем и оборудования для переработки полимерных отходов; выбор предприятий для реализации утилизации полимеров и вида энергетических ресурсов для реализации этих проектных решений.

Abstract: Some features of the possibilities of solving evidence-based problems of improving the use of wastes of different industries on a complex enterprise that can provide all its energy needs alone. The problem of wastes utilization and recycling is present as complex research and analysis of energy- and resource saving processes for treatment of polymer wastes of various origin. The research focused on the study of issues such as the development of models of waste-modifying polymer. The investigation are focused in researching such problems as selection of scientific based methods of wastes to be utilized or recycled; the development of appropriated process flow sheets and choice of modifications additives and equipment for polymers waste recycling. The choice of appropriate plants with selected energy resources is very important for projects realization.

Ключевые слова: интегрированные энерго- и ресурсосберегающие технологии, объект научно-обоснованной технологии, модели вспенивания.

Keywords: integrated energy technologies, evidence-based methods, wastes conversion and recycling.

Увеличение объемов выпуска полимерных материалов различного ассортимента предполагает обсуждение путей реализации современных эффективных интегрированных энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования в базовых отраслях народного хозяйства по переработке твердых бытовых отходов (ТБО), в частности полимерной ее части [1-5]. С целью создания в промышленности нового ассортимента товаров народного потребления на основе научно-обоснованного анализа основных направлений разработки инновационных полимерных материалов из отходов применялись методы математического моделирования [6-8]. С целью совершенствования технологии утилизации полимерных полиэтиленовых отходов как части ТБО исследовалась возможность получения вспененного вторичного полиэтилена (ВВПЭ). Для повышения качества изделий из ВВПЭ необходимо получить и исследовать математические модели влияния факторов: 1) изменения свойств в процессе эксплуатации полиэтиленовой пленки и 2) технологических параметров процесса вспенивания для разновидностей ассортимента отраслей использования изделий. При разработке процесса вспенивания вторичного полиэтилена, полученного на основе объекта исследования – полиэтиленовой пленки (табл. 1), прошедшей длительную эксплуатацию, использовали методы полного факторного эксперимента (ПФЭ).

Таблица 1. ПФЭ для трех функций отклика

№	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	Y_3
1	+	+	+	+	+	+	+	+	0,058	0,062	0,064
2	+	-	+	+	-	-	+	-	0,095	0,095	0,096
3	+	+	-	+	-	+	-	-	0,064	0,058	0,061
4	+	-	-	+	+	-	-	+	0,387	0,391	0,398
5	+	+	+	-	+	-	-	-	0,086	0,092	0,093
6	+	-	+	-	-	+	-	+	0,387	0,398	0,385
7	+	+	-	-	-	-	+	+	0,584	0,585	0,593
8	+	-	-	-	+	+	+	-	0,585	0,595	0,590

Исследовалась кажущаяся плотность ВВПЭ, принятая в качестве выходного параметра Y (%). Факторами (табл. 1) являлись параметры проведения процесса вспенивания: X_1 – количество активирующего комплекса, %; X_2 – температура вспенивания, °С; X_3 – время выдержки при температуре вспенивания, мин. Исходные данные: X_{10}= 3; X_{20}=170; X_{30}= 15; ΔX_1= 1; ΔX_2= 10; ΔX_3= 5. Для первой функции отклика Y_1 записываем линейную модель:

$$Y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \quad (1)$$

которая дает такие значения коэффициентов и их доверительные интервалы (табл. 2)

Таблица 2. Параметры линейной модели и их доверительные интервалы

Параметр	Нижняя граница	Значения	Верхняя граница
b_0	0,1574	0,2807	0,4041
b_1	-0,2061	-0,0828	0,0406
b_2	-0,2476	-0,1243	-0,0009
b_3	-0,2531	-0,1298	-0,0064

С доверительной вероятностью 95% доверительный интервал для b_1 включает ноль и уточненная модель имеет вид (2):

$$Y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3, \quad (2)$$

которая имеет такие параметры и доверительные интервалы (табл. 3).

Введение еще одной, восьмой базисной функции $X_1X_2X_3$, превращает задачу в интерполяционную (3): функция отклика Y_1 будет точным аналитическим выражением:

$$\begin{aligned} Y_1 = {} & 0,2807 - 0,0828x_1 - 0,1243x_2 - 0,1298x_3 - 0,0017x_1x_2 - \\ & -0,0073x_1x_3 + 0,0497x_2x_3 + 0,0732x_1x_2x_3 \end{aligned}, \quad (3)$$

Доверительных интервалов нет.

Таблица 3. Параметры уточненной модели Y_1 и доверительные интервалы для них

Параметр	Нижняя граница	Значения	Верхняя граница
b_0	-0,6500	0,2807	1,2115
b_1	-0,2061	-0,0828	0,8480
b_2	-0,2476	-0,1243	0,8065
b_3	-0,2531	-0,1298	0,8010
b_4	-0,2061	-0,0017	0,9290
b_5	-0,2476	-0,0073	0,9235
b_6	-0,2531	-0,0497	0,9805

Интерполяционная задача для полной модели функция отклика Y_2 будет аналитическим выражением:

$$Y_2 = 0,2845 - 0,0852x_1 - 0,1228x_2 - 0,1330x_3 - 0,0005x_1x_2 - \\ -0,0063x_1x_3 + 0,0497x_2x_3 + 0,0745x_1x_2x_3 \quad , \quad (4)$$

интерполяционная задача для полной модели функция отклика Y_3 будет аналитическим выражением:

$$Y_3 = 0,2850 - 0,0823x_1 - 0,1255x_2 - 0,1303x_3 - 0,0013x_1x_2 - \\ -0,0100x_1x_3 + 0,0507x_2x_3 + 0,0750x_1x_2x_3 \quad , \quad (5)$$

Представленный ПФЭ для трех функций отклика показывает соответствует выбранным критериям относительной погрешности для экспериментальных точек соответственно для полиэтилена он составляет 4–5%.

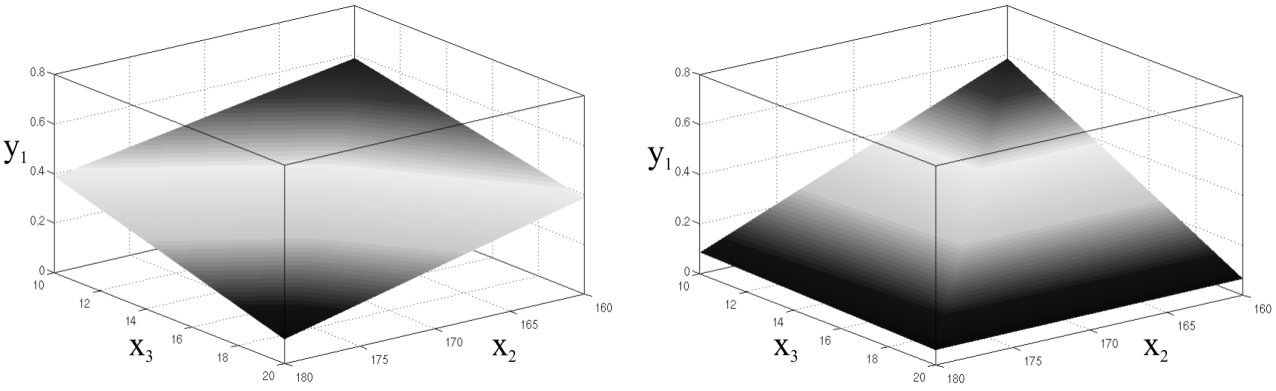


Рис. 1. Модели влияния параметров вспенивания для функции отклика Y_1.

Уравнения (3–5) определяют плоскость для функции отклика Y_1 в пространстве X_1 – количество активирующего комплекса, %; X_2 – температура вспенивания, °С; X_3 – время выдержки при температуре вспенивания, мин. Очевидно, что оптимальный набор параметров переработки (вспенивания) будет обусловлен координатами плоскостей (рис. 1), где $Y_1 = f(X_2X_3)$ соответственно справа при $X_1 = 2$; слева – $X_1 = 4$.

Исследования направлены на изучение таких вопросов, как разработка моделей утилизации-модификации полимерной части ТБО с учетом результатов, проведенных ранее работ [9-11]. На практике, имея исходные данные по экструзионному оборудованию, т.е. технические характеристики червяка и параметрам вспенивания вторичного вспенивания: диаметр, шаг нарезки, высоту витка, число витков, ширина гребня витка, число заходов червяка, число оборотов червяка, сопротивление головки, радиальный зазор, количество активирующего комплекса; X_2 – температура вспенивания; X_3 – время выдержки при температуре вспенивания находим целевое значение кажущейся плотности ВВПЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рэнби Б. Рабек Я.* Фотодеструкция, фотоокисление, фотостабилизация полимеров. – М.: Наука. 1978. – С. 65–69.

2. *Бухкало С.И.* Изменение свойств в процессе эксплуатации пленки и направлення модификация вторичного полиэтилена: дис. канд. техн. наук: 25.01.88 / Бухкало Светлана Ивановна. – М., 1988. – 150 с.

3. *Бухкало С.І.* Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи) [текст] підручник. Київ «Центр учбової літератури»: 2014, 456 с.

4. *Бухкало С.И.* Ресурсосберегающие технологии использования полимерных отходов / Інтегровані технології та енергозбереження // – Х.: НТУ «ХПІ». 2001. – № 2. – С. 106–112.

5. *Бухкало С.И.* К вопросу энергосбережения процесса агломерирования полимерной упаковки / Інтегровані технології та енергозбереження // 2005. – № 2. – С. 29–33.

6. *Бухкало С.И.* Деякі властивості полімерних відходів у якості сировини для енерго- і ресурсозберігаючих процесів // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХПІ». 2014. – № 4. – с. 29–33.

7. *Бухкало С.І.* Основні складові комплексних підприємств енергетичного міксу // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». 2015. – № 7 (1116). – с. 3–21.

8. *Товажнянский Л.Л., Кошелева М.К., Бухкало С.И*. Общая химическая технология в примерах, задачах, лабораторных работах и тестах (уч. пособие) / Москва ИНФРА-М, 2015. С. 447.

9. *Бухкало С.І.* Моделі енергетичного міксу для утилізації полімерної частки ТПВ // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». 2016. – № 19 (1191). – с. 23–32.

10. *Бухкало С.І., Іглін С.П.* Деякі моделі дослідження структурно-хімічних змін при експлуатації полімерних виробів / Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХПІ». 2016. – № 3. – с.52–57.

11. *Бухкало С.І.* Інноваційні технології використання відходів. 4-й міжн. конгрес Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування, 21–23 вересня 2016 р., Львів. 2016, – с. 111.

УДК 531.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ И ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА
MODELLING THE PROCESS DYNAMICS OF ADSORPTIVE SEPARATION OF GAS MIXTURE AND HYDROGEN PRODUCTION

Евгений Игоревич Акулинин, Андрей Анатольевич Ишин, Сергей Александрович Скворцов, Дмитрий Станиславович Дворецкий, Станислав Иванович Дворецкий
Evgeniy I. Akulinin, Andrey A. Ishin, Sergey A. Skvortsov, Dmitriy S. Dvoretsky, Stanislav I. Dvoretsky

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(e-mail: sdvoretsky@tstu.ru)

Аннотация: Разработана математическая модель динамики PSA (Pressure swing adsorption) – процесса при разделении многокомпонентных газовых смесей с целью получения водорода с концентрацией 99,99 % об. Модель включает уравнения процессов массо- и теплообмена, протекающие при адсорбции (десорбции) H_2, CO_2 и CO гранулированными цеолитовыми адсорбентами CaA, NaX, LiLSX; уравнение кинетики смешанно-диффузионного переноса адсорбтива (H_2, CO_2 и CO); уравнение изотермы Ленгмюра-Фрейндлиха для многокомпонентных газовых смесей; уравнение Эргуна для расчета давления и скорости газовой смеси в слое гранулированного адсорбента.

Модель позволяет рассчитывать профили концентраций компонентов (H_2, CO_2 и CO) и температуры в газовой и твердой фазах, давления и скорости газовой смеси по высоте адсорбента в зависимости от времени.

Abstract: The mathematical model of the dynamics of pressure swing adsorption (PSA) process during the separation of multicomponent gas mixtures with the aim of producing hydrogen with a concentration of 99.99 % vol. has been developed. The model includes equations of the processes of mass and heat transfer occurring upon CO_2 and CO adsorption (desorption) by granular zeolite adsorbents CaA; the equation of the kinetics of mixed diffusion transfer of adsorbate (H_2, CO_2 and CO); Langmuir-Freundlich isotherm equation for multicomponent gas mixtures; and the Ergun equation to calculate the pressure and velocity of the gas mixture in the adsorbent.

The model allows to calculate the profiles of component concentrations (H_2, CO_2 and CO) and temperature in gas and solid phases, the pressure and velocity of the gas mixture along the height of the adsorbent depending on time.

Ключевые слова: Короткоцикловая безнагревная адсорбция, цеолитовый адсорбент, многокомпонентная газовая смесь, изотерма адсорбции, кинетика, динамика, математическая модель, неопределенности

Keywords: pressure swing adsorption, zeolite adsorbent, multicomponent gas mixture, adsorption isotherm, kinetics, dynamics, mathematical model, uncertainties.

При адсорбции H_2, CO_2 *и* CO цеолитовыми адсорбентами протекают следующие массо – и теплообменные процессы: а) диффузия H_2, CO_2 и CO в потоке газовой смеси; б) массообмен H_2, CO_2, CO и теплообмен между газовой фазой и адсорбентом; в) адсорбция H_2,CO_2, CO на поверхности и в микропорах гранул цеолитового адсорбента с выделением тепла и десорбция H_2, CO_2, CO из микропор и с поверхности гранул с поглощением тепла. Анализ результатов физического моделирования показал, что диффузия H_2,CO_2,CO и распространение тепла в газовом потоке и гранулированном адсорбенте осуществляются в основном в продольном направлении относительно движения потока газовой смеси (по высоте адсорбента). При этом процесс обогащения газовой смеси водородом при адсорбции H_2, CO_2 *и* CO гранулированным цеолитовым адсорбентом осуществляется в смешанно-диффузионной области и определяется коэффициентами внешней массоотдачи и внутренней диффузии, а также равновесными соотношениями концентраций H_2,CO_2 и CO в фазах.

Технологическая схема объекта моделирования представляет собой 4-х адсорберную установку короткоцикловой безнагревной адсорбции (КБА) [1]. Исходная газовая смесь после предварительной осушки поступает на вход установки КБА с избыточным давлением $(21 \pm 2)\cdot 10^5$ Па и температурой 30 ± 5^0С. Подъем давления в адсорбционных колоннах производится открытием управляемых клапанов, через которые газовая смесь подается на входы адсорберов. В качестве адсорбента могут использоваться цеолиты *CaA, NaX, LiLSX*. Обогащенная водородом газовая смесь выводится из адсорберов также через управляемые клапаны и направляется к потребителям через ресивер. На этапе регенерации в адсорбционных колоннах осуществляется противоточная регенерация адсорбента путем пропускания обогащенной водородом газовой смеси через адсорбент в обратном направлении.

При математическом описании процесса обогащения газовой смеси водородом путем адсорбции CO_2 и CO в установке КБА принимали следующие допущения: 1) исходная газовая смесь является трехкомпонентной (содержит продукционный газ 1- H_2 и попутные вещества 2- CO_2, 3- CO) и рассматривается как идеальный газ, что вполне допустимо при давлении в адсорбере до $200\cdot 10^5$ Па [2]; 2) в качестве адсорбента используется гранулированный цеолит *CaA* с диаметром гранул 1,5 мм, коэффициентом пористости гранул ~0,394 и диаметром транспортных пор $d_э \le 0{,}5\times 10^{-3}$ м; 3) геометрические размеры адсорбционного слоя считаем постоянными в течение заданного срока эксплуатации ~ 10^5 ч [3]; 4) слой адсорбента представляет собой сплошную среду с коэффициентом порозности ε, учитывающим пористость гранул; 5) десорбционная ветвь изотерм сорбции H_2, CO_2 и CO на гранулированном цеолите CaA совпадает с адсорбционной [4]**;** 4) адсорбционное равновесие описывается уравнением Ленгмюра-Фрейндлиха [5].

В соответствии с принятыми допущениями математическое описание процессов извлечения CO_2, CO из газовой смеси методом КБА и концентрирования H_2 в потоке газовой смеси включает следующие уравнения.

1. Уравнение покомпонентного материального баланса k={1-H_2, 2-CO_2, 3-CO} в потоке газовой смеси по высоте слоя адсорбента:

$$\frac{\partial c_k(x,t)}{\partial t} + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon}\cdot\frac{\partial a_k}{\partial t} + \frac{\partial (v_g \cdot c_k(x,t))}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_g^k(x)\frac{\partial}{\partial x}c_k(x,t)\right), \qquad (1)$$

где v_g – скорость газового потока (м/с); c_k – мольная концентрация *k*-го компонента газовой смеси (моль/м^3); a_k – величина сорбции *k*-го компонента в адсорбенте (моль/м^3); ε – коэффициент порозности адсорбента с учетом пористости гранул, (м^3/м$^{3)}$; D_g^k – эффективный коэффициент продольного перемешивания *k*-го компонента в газовой смеси (м^2/с); *x* – пространственная координата слоя адсорбента (высота в адсорбере) (м); t – время (с).

2. Уравнение массопереноса адсорбтива *k*={1-H_2, 2-CO_2 , 3-*CO*} из газовой фазы в твердую фазу адсорбента (через границу раздела фаз):

$$\frac{\partial a_k}{\partial t} = \frac{F_k^2 - F_k^1}{2} tgh(\theta(v_g - v_g^*)) + 1) + F_k^1, \; k = CO_2, CO, \qquad (2)$$

где F_k^1 - правая часть уравнения кинетики нестационарного конвективного (внешнего) массообмена, $F_k^1 = \beta_k^1 (c_k - c_k^*)$; β_k^1 - коэффициент массоотдачи, отнесенный к концентрации адсорбтива в газовой фазе; c_k^* - концентрация адсорбтива на поверхности раздела фаз или равновесная текущей величине адсорбции a_k; F_k^2 - правая часть уравнения кинетики внутридиффузионного процесса адсорбции, $F_k^2 = \beta_k^2 (a_k^* - a_k)$; β_k^2 - кинетический коэффициент; a_k^* -величина адсорбции, равновесная текущей концентрации адсорбтива c_k в потоке газовой смеси на внешней поверхности гранул; v_g^* - критическая скорость газовой смеси, определяющая переход от диффузионной области (внешней массоотдачи) к кинетической области (внутренней диффузии в гранулах адсорбента) переноса адсорбтива (H_2,CO_2, *CO*).

Уравнение (2) представляет собой описание кинетики адсорбции для смешанно-диффузионной области переноса адсорбтива (H_2,CO_2,*CO*) через границу раздела фаз (рис. 1): при скорости газовой смеси ниже v_g^* процесс адсорбции лимитируется процессом внешней массоотдачи с коэффициентом β_k^1, в противном случае - процессом внутренней диффузии в гранулах адсорбента с кинетическим коэффициентом β_k^2. Гиперболический тангенс и формальный коэффициент θ позволяют гладко регулировать размеры смешанно-диффузионной области процесса адсорбции CO_2 и CO адсорбентом.

Коррекция коэффициента массоотдачи β_k^1, формальных кинетических коэффициентов β_k^2 и θ осуществлялась по экспериментальным данным путем решения обратной коэффициентной задачи с использованием уравнений математической модели: v_g^*= 0,022 м/с; $\beta_{H_2}^1$= 0,816 с$^{-1}$; $\beta_{CO_2}^1$=0,021 с$^{-1}$; β_{CO}^1=0,084 с$^{-1}$; $\beta_{H_2}^2$=0,73 с$^{-1}$; $\beta_{CO_2}^2$= 0,012 с$^{-1}$; β_{CO}^2= 0,059 с$^{-1}$, $\theta = 18{,}2$.

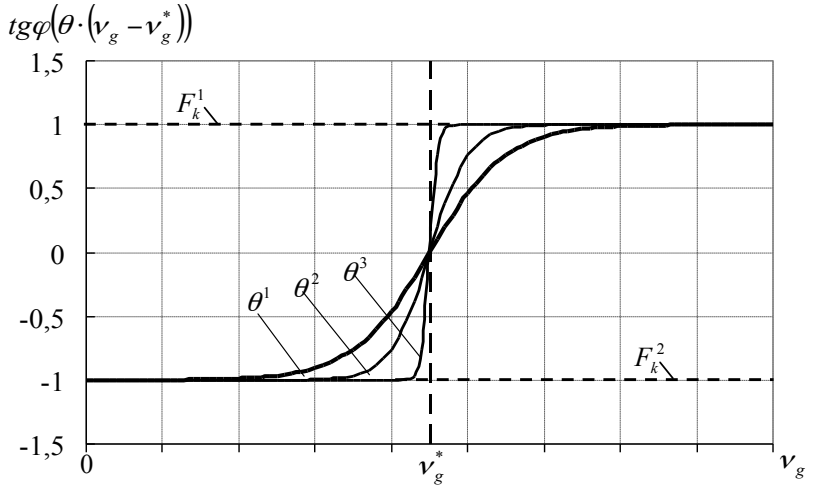


Рис. 1. К регулированию размеров смешанно-диффузионной области

Величина адсорбции a_k^*, равновесная текущей концентрации адсорбтива c_k в потоке на внешней поверхности гранул, рассчитывается по формуле Ленгмюра-Фрейндлиха:

$$a_k^* = \frac{\left(b_{1,k} - b_{2,k}T_a\right)b_{3,k}e^{b_{4,k}/T_a}c_k^{\left(b_{5,k}+b_{6,k}/T_a\right)}}{1+\sum_j b_{3,j}e^{b_{4,j}/T_a}c_j^{\left(b_{5,j}+b_{6,j}/T_a\right)}}.$$

где b – вектор параметров изотермы сорбции [5]; T_a – температура адсорбента.

3. Уравнение, описывающее распространение тепла в потоке газовой смеси по высоте адсорбента:

$$c_p^g\cdot\rho_g\frac{\partial T_g(x,t)}{\partial t}+c_v^g\cdot\rho_g\cdot v_g\frac{\partial T_g(x,t)}{\partial x}-\frac{\alpha}{\varepsilon}\cdot S_{y\partial.}[T_a([x,t)-T_g(x,t)]= \\ =\lambda_g\frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2},\ 0<x<L, \tag{3}$$

где c_p^g, ρ_g –- удельная теплоемкость и мольная плотность газовой смеси, соответственно, (Дж/(моль·К)), (моль/м^3); v_g – скорость газовой смеси (м/с); T_g - температура газовой смеси (К); T_a - температура адсорбента (К); λ_g – коэффициент теплопроводности газовой смеси (Вт/(м·К)); α – коэффициент теплоотдачи от поверхности гранул адсорбента к потоку газовой смеси, (Вт/(К·м^2); $S_{y\partial}=(1-\varepsilon)\frac{3}{r_{gr}}$ – коэффициент удельной поверхности гранул адсорбента (м^2/м^3), r_{gr} - радиус гранулы адсорбента (м), L – высота слоя адсорбента (м).

4. Уравнение, описывающее изменение температуры T_a адсорбенте:

$$c_p^a\cdot\rho_a\cdot\frac{\partial T_a(x,t)}{\partial t}+\alpha\cdot S_{y\partial}\cdot\left[T_a(x,t)-T_g(x,t)\right]-\sum_k h_k^a\frac{\partial a_k(x,t)}{\partial t}=\lambda_a\cdot\frac{\partial^2 T_a(x,t)}{\partial x^2}, \tag{4}$$

где c_p^a – удельная теплоемкость адсорбента (Дж/(кг·К)); ρ_a – насыпная плотность адсорбента (кг/м^3); c_p^g – удельная теплоемкость адсорбата (Дж/(моль·К)); h_k^a – теплота адсорбции *k*-го компонента газовой смеси (Дж/моль); λ_a – коэффициент теплопроводности адсорбента (Вт/(м·К)).

5. Уравнение Эргуна, описывающее изменение давления P и скорости газовой смеси v_g по высоте адсорбента [6]:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\left(\frac{150(1-\varepsilon_0)^2}{(2r_{gr}\psi)^2 \varepsilon_0^2} \mu_g v_g + 1{,}75 M_g \rho_g \frac{(1-\varepsilon_0)}{2r_ч \psi \varepsilon_0} v_g^{\,2} \right), \quad (5)$$

где ε_0 - порозность слоя адсорбента без учета пористости частиц ($м^3/м^3$); ψ - коэффициент сферичности гранул адсорбента; μ_g - динамическая вязкость газовой смеси ((Н·с)/$м^2$); M_g - молярная масса газовой смеси (кг/моль).

Формулы и методики расчета равновесных соотношений для концентраций компонентов газовой смеси (H_2,CO_2 и CO) в фазах, эффективных коэффициентов продольного перемешивания компонентов газовой смеси (D_g^k), коэффициента массоотдачи (β_k^1) и формальных кинетических коэффициентов (β_k^2, θ), коэффициентов теплоотдачи (α) от поверхности гранул адсорбента к потоку газовой смеси и теплопроводности газовой смеси (λ_g) и адсорбента (λ_a), динамической вязкости (μ_g) и удельной теплоемкости газовой смеси (c_v^g), начальные и граничные условия для уравнений (1)-(5) здесь не приводятся и будут подробно обсуждаться в докладе.

Математическое описание протекающих в адсорбере процессов включает в себя систему дифференциальных и алгебраических уравнений, для решения которой использовали метод прямых. Производные в дифференциальных уравнениях по пространственной координате x аппроксимировали конечно-разностными формулами и полученную систему дифференциальных уравнений в обыкновенных производных вдоль некоторого семейства прямых решали методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

Максимальная относительная погрешность математической модели процесса адсорбционного получения водорода на стадии адсорбции не превышает 11,4%, что позволяет с приемлемой для практики точностью использовать модель для целей технологического расчета, оптимизации и управления процессом получения водорода методом адсорбционного разделения газовой смеси.

Работа выполнена в рамках проектной части Государственного задания № 10.3533.2017/ПЧ

ЛИТЕРАТУРА

1. *Baksh M.S.A., et al*. Патент США №6340382. Кл. МПК-B01D 53/047, 2002.

2. *Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е.* Техническая термодинамика. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 496 с.

3. ТУ 2163-004-05766557-97 «Цеолит СаА-У формованный. Технические условия».

4. *Кельцев, Н.В.* Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1984. 591 с.

5. *Jeong-Geun Jee, Min-Bae Kim, Chang-Ha Lee.* Adsorption characteristics of hydrogen mixtures in a layered bed: binary, ternary, and five-component mixtures // Ind. Eng. Chem. Res. 2001. V.40, P. 868.

6. *Белоглазов И.Н., Голубев В.О.* Основы расчета фильтрационных процессов. М.: Изд. Дом «Руда и Металлы», 2002. 210 с.

УДК 621.9.22

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА СТАДИИ ОСТЫВАНИЯ В МЕТОДЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
MODELING OF HEAT TRANSFERAT THE COOLING STAGE IN NON-DESTRUCTIVE TESTING

Нина Филипповна Майникова, Николай Павлович Жуков
Nina F. Mainikova, Nikolai P. Zhukov

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(e-mail teplotehnika@nnn.tstu.ru)

Аннотация: Исследована адекватность математической модели распространения тепла в сферическом полупространстве реальному тепловому процессу метода неразрушающего теплового контроля твердых материалов. Рассмотрена стадия остывания.

Abstract: We investigated the adequacy of the mathematical model of heat propagation in the spherical half to the actual thermal process of non-destructive thermal control of solid materials. We considered the stage of cooling.

*Ключевые слова***:** адекватность, моделирование, неразрушающий контроль, сферическое полупространство, температурное поле, теплофизические свойства.

Keywords: non-destructive test; numerical investigation; simulation; spherical semispace; temperature field; thermo-physical properties.

Измерительная схема метода неразрушающего определения теплофизических свойств (ТФС) твердых материалов представлена на рис. 1. Тепловое воздействие на исследуемое тело осуществляется с помощью плоского нагревателя, выполненного в виде тонкого диска радиусом $R_{пл}$, встроенного в подложку измерительного зонда (ИЗ). Температурное распределение контролируется несколькими (не менее трех) термоприемниками (ТП). Реализация метода осуществляется измерительными системами, детальное описание которых представлено в работах [1, 2]. На рис. 1 так же показаны термограммы, полученные экспериментально на изделии из политетрафторэтилена (ПТФЭ) [1]. На каждой из термограмм выделено несколько участков, соответствующих различным состояниям температурного поля. Для термограммы, зафиксированной центральным ТП, характерны восемь участков (рис.2). Участку I соответствует одномерное температурное поле в локальной области исследуемого тела (вблизи нагревателя). Тепловые потоки, поступающие в изделие и ИЗ, изменяются во времени, так как между нагревателем и исследуемым телом имеется термическое сопротивление, нагреватель обладает инерционностью.

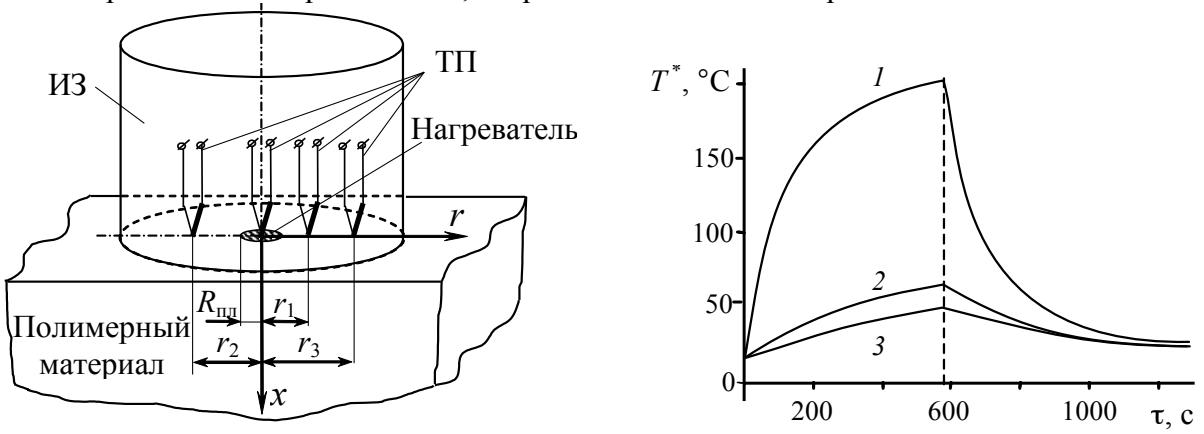


Рис. 1. Измерительная схема и термограммы для ПТФЭ: *1* – на оси нагревателя; *2*, *3* – на расстояниях 7 и 9 мм от оси.

Участку II отвечает одномерное температурное поле. Процесс проходит стадию регуляризации в локальной области исследуемого тела, расположенной вблизи нагревателя и термоприемников [1, 3, 4]. На III участке реализуется двумерное температурное поле в образце, поскольку нельзя пренебречь распространением тепла в радиальном направлении. Участку IV отвечает теплоперенос, вышедший на стадию регуляризации. В локальной области тела формируется температурное поле, близкое к одномерному полусферическому.

На участке V нарушаются условия полуограниченности тела. После отключения нагревателя ($\tau > \tau_{откл}$) на стадии остывания можно выделить участки: VI – тепловые потоки изменяются во времени; VII – стадия регуляризации; VIII – теплоперенос изменяется. Участки термограммы II, IV и VII – *рабочие*, так как возможно определить значения ТФС в зависимости от параметров аналитических моделей, описывающих термограмму на данных температурно-временных интервалах, используя регулярные режимы на моделях плоского и сферического полупространств [1, 3, 4].

Использована следующая аналогия развития теплового процесса. На начальной стадии теплопереноса рассматривается задача о распространении тепла от бесконечного плоского нагревателя с плотностью теплового потока q в плоском полупространстве (модель *A*). При больших значениях τ – в предположении, что плоский круглый нагреватель заменен эквивалентным ему поверхностным сферическим, рассматриваются задачи о распространении тепла в сферическом полупространстве (при нагреве и остывании – модели *B* и *C*). Постановки и решения краевых задач теплопроводности по моделям *A*, *B* и *C* представлены в работах [1, 3, 4].

Стадии остывания соответствует модель *C*. Решение задачи, описывающей процесс распространения тепла в исследуемом объекте контроля (первое тело) по модели *C* для поверхностного слоя (см. рис. 1), имеет вид:

$$T_1(r,\tau) = \frac{2qR^3(\varepsilon_1+\varepsilon_2)}{r\sqrt{\pi}(\lambda_1+\lambda_2)^2}\left(\frac{(r-R)(\lambda_1+\lambda_2)}{\sqrt{a_1}\,R(\varepsilon_1+\varepsilon_2)}+1\right)\frac{1}{\sqrt{\tau}}. \quad (1)$$

При $r = R$

$$T_1(R,\tau) = \frac{2qR^2(\varepsilon_1+\varepsilon_2)}{\sqrt{\pi}\ (\lambda_1+\lambda_2)^2}\frac{1}{\sqrt{\tau}}, \quad (2)$$

Принималось допущение о том, что конечное распределение температуры от поверхностного сферического нагревателя после окончания действия источника будет близко стационарному [5]. Так как в реальном эксперименте используется круглый плоский нагреватель, то определена продолжительность стадии нагрева и соотношение радиусов $R_{пл}$ и R, при котором температурные поля на стадии остывания, создаваемые круглым плоским и сферическим поверхностным нагревателями, будут близкими. Известно, что соотношение радиусов: $R = R_{пл}/2$ имеет место при локальной регуляризации тепловых потоков в ограниченной зоне системы «изделие – зонд» и справедливо для участка IV термограммы [1]. При отключении нагревателя, тепловой процесс не находится в стадии регуляризации, соотношение радиусов $R_{пл}$ и R изменится, так как отношение тепловых потоков в любой точке тела к потоку тепла на его поверхности зависит от времени [5].

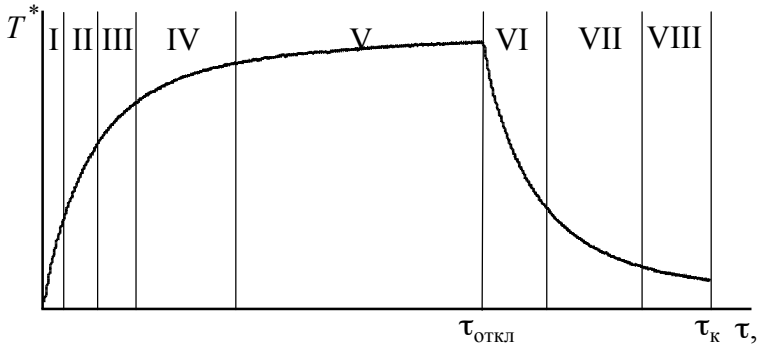
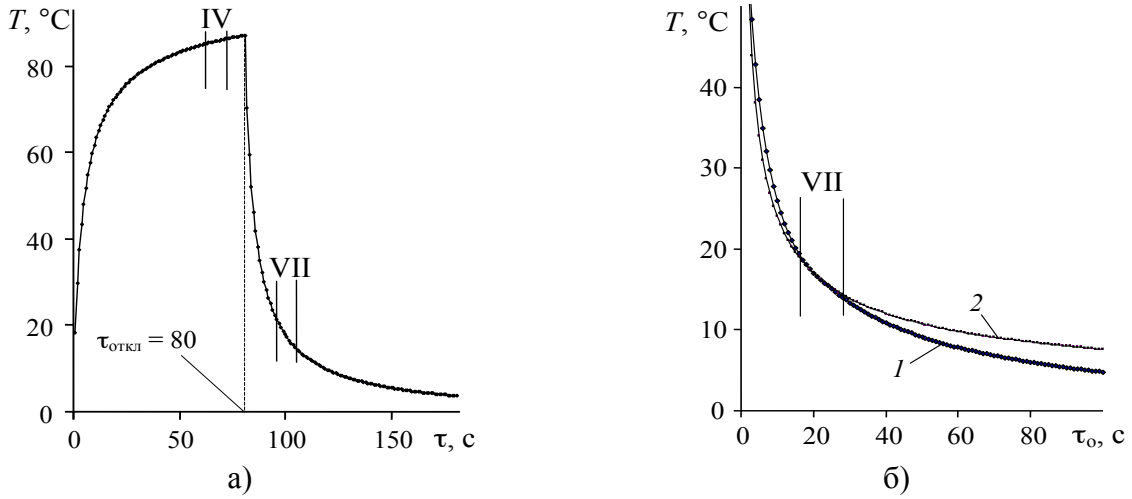


Рис. 2. Термограмма 1 (см. рис. 1) с выделенными участками

Условия адекватности тепловых процессов определены следующим образом. Подбирались такие значения радиуса сферического поверхностного нагревателя и продолжительности стадии нагрева, чтобы температурное поле, полученное численно методом конечных элементов на рабочем участке при остывании, было идентично температурному полю, построенному с использованием математической модели (2).

Пример реализации. Материал исследуемого изделия – стекло ТФ. Подложка ИЗ изготовлена из пенополиуретана. Термограмма, построенная для системы двух тел с использованием численного моделирования методом конечных элементов, представлена на рис.3*а*. Термограммы представлены на рис.3*б*: в плоскости контакта действуют плоский круглый источник тепла (численное моделирование, линия *1*) и сферический поверхностный нагреватель (модель (2), линия *2*).



а) б)

Рис. 3. Термограммы, построенные для системы двух полуограниченных тел с различными ТФС по данным примера: *а* – стадии нагрева и остывания, численный расчет; *б* – стадия остывания, линия *1* получена численно, линия *2* – по модели (2).

Условия моделирования: q = 20000 Вт/м^2; ε_1 = 848,3 (Вт·с^{0,5})/(м·К); λ_1 = 0,699 Вт/(м·К); ε_2 = 42,2 (Вт·с^{0,5})/(м·К); λ_2 = 0,028 Вт/(м·К); $R_{пл}$ = 0,004 м; R = 0,00141 м; продолжительность стадии нагрева – 80 с; τ_o – время остывания.

Относительная погрешность значений температуры в точке контроля, расположенной на оси нагревателя в плоскости контакта зонда с исследуемым телом,

$$\delta_T = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\ \%.$$

Погрешность δ_T обусловлена различием математических моделей распространения тепла от плоского круглого и сферического поверхностного источников тепла на стадии остывания. Для условий примера на участке VII термограммы величина $\delta_T \le 2$ %.

Очевидно, что идентичность температурных полей, создаваемых круглым плоским и сферическим поверхностным нагревателями, будет существенно зависеть от продолжительности стадии нагрева и, следовательно, от температуры изделия в конце стадии нагрева. Таким образом, необходимо найти такую температуру изделия (или продолжительность стадии нагрева от круглого плоского источника тепла), которая соответствовала бы распределению температуры, близкому стационарному при нагреве от сферического поверхностного нагревателя.

Анализируя данные, представленные на рис. 2, можно предположить, что время до момента отключения круглого плоского нагревателя следует устанавливать в зависимости от теплофизических свойств материала рассматриваемого объекта. Имитационное моделирование, выполненное ранее и представленное в работе [1], показало, что время до

момента отключения нагревателя наиболее существенно зависит от величины теплопроводности материала исследуемого изделия.

При имитационном моделировании теплового процесса в системе «изделие – зонд» на стадии остывания учитывались результаты опытов, для которых $\delta_T \le 3$ %. Варьировали плотность теплового потока q и ТФС изделия [1].

Соотношение радиусов нагревателей $R_{пл}$ и R, согласно уравнению (2):

$$R = \frac{R_{пл}}{2\sqrt{2}}. \qquad (3)$$

Продолжительность стадии нагрева (до момента отключения нагревателя) выбиралась так, чтобы температурное поле, полученное с использованием численного моделирования от круглого плоского нагревателя на рабочем участке термограммы, было близко температурному полю, построенному по модели сферического полупространства (2) – модели C ($\delta_T \le 3$ %). $T_{откл}$ – температура отключения, которая соответствует температуре изделия в конце стадии нагрева. Максимальное значение температуры материала исследуемого изделия при достижении стационарной стадии с учетом соотношения (3) определено из уравнения [5]:

$$T_{ст} = \frac{qR_{пл}}{\sqrt{2(\lambda_1 + \lambda_2)}}.$$

Определён критерий K, с помощью которого найдено значение температуры материала изделия, при достижении которой необходимо отключить плоский нагреватель [1].

Для условий примера на участке VII термограммы величина $\delta_T \le 2$ %.

Обозначения: a – температуропроводность, м^2/с; q – плотность теплового потока, Вт/м^2; $R_{пл}$ – радиус плоского нагревателя, м; R – радиус сферического нагревателя, м; T – температура, К; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); $c\rho$ – объемная теплоемкость, Дж / (м^3·К) ; r, z – пространственные координаты,м; ε – тепловая активность, (Вт·с^{0,5}) / (м^2·К); ρ – плотность, кг/м^3; τ – время, с. **Индексы:** 1 – материал изделия; 2 – материал подложки ИЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков, Н. П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 288 с.

2. Жуков, Н. П. Измерительно-вычислительная система неразрушающего теплофизического контроля / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 2. – С. 153–154.

3. Zhukov, N. P. Multimodel Method of Nondestructive Determination of the Thermophysical Properties of Solid Materials / N. P. Zhukov, N. F. Mainikova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2005. – Vol. 76, No. 6. – P. 1104 – 1112.

4. Многомодельный метод неразрушающего определения теплофизических свойств твердых материалов / Н. П. Жуков [и др.] // Инженер.-физ. журн. – 2012. – Т. 85, № 1. – С. 188 – 194.

5. Козлов, В. П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / В. П. Козлов; под ред. А. Г. Шашкова. – Минск : Наука и техника, 1986. – 392 с.

УДК 664.854

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО – КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ КАРТОФЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТЕПЛОПОДВОДЕ
INVESTIGATION OF RADIATION-CONVECTIVE DRYIN OF POTATO WAFERS WITH A VARIABLE HEAT SUPPLY

Александр Николаевич Остриков, Екатерина Юрьевна Желтоухова, Александр Александрович Каданцев, Владислав Игоревич Яницкий
Alexander N. Ostrikov , Ekaterina Yu. Zheltoukhova, Aleksandr A. Kadantsev, Vladislav I. Yanitskiy

Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, Воронеж
Voronezh state university of engineering technologies, Russia, Voronezh
(e-mail: Katsturova@gmail.com, aleksan1995@yandex.ru, zxwht256@gmail.com)

Аннотация: Исследованы и проанализированы кинетические зависимости процесса импульсной радиационно-конвективной сушки пластин картофеля при стационарных режимах, и в результате разработан ступенчатый режим сушки корнеплодов.

Abstract: Kinetic dependencies of the pulsed radiation-convective drying process of potato slices under stationary conditions were researched and analyzed, resulting in development of a step-by-step regime for drying root crops.

Ключевые слова: радиационно-конвективная сушка, кинетика, комбинированный режим, картофель, пластины.

Keywords: radiation-convective drying kinetics, combined mode, potatoes, plates.

Введение. Цель настоящей работы состоит исследование радиационно-конвективной сушки картофеля при переменном теплоподводе с предварительной мойкой, инспекцией, сортированием, калиброванием, очисткой от кожуры, а после этого нарезки на пластины.

Практическая ценность работы определяется следующими основными результатами:

• разработан и испытан лабораторный образец радиационно-конвективной установки, который позволяет добиться конечной влажности картофеля 12%;

• составлены графики кривой сушки и скорости сушки, которые были проанализированы и исходя из них были выведены : температурная кривая и термограмма сушки при ступенчатом режиме радиационно-конвективной сушки картофеля.

Нами были проведены исследования, в ходе которых мы задались определёнными рамками технологических параметров. Так температура воздуха была принята в пределах 318…333 К, скорость воздушного потока – 0,3…1,5 м/с, толщина платин картофеля $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м, расстояние от продукта до поверхности лампы инфракрасного излучения – 0,2 м. Сам картофель был вымыт, подвергнут инспекции и сортированию, а также калибровке. После снятия кожуры и нарезки на тонкие пластины толщиной 1,5 мм, картофель бланшируется в течение четырёх минут.

После процесса бланширования пластины картофеля отправляют на комбинированную радиационно-конвективную сушку. Здесь инфракрасные лучи имеют длину волны в диапазоне 1,16…1,65 мкм, а плотность теплового потока находится в пределах 2,69…5,44 кВт/м^2. Одновременно с ИК-нагревом происходит конвективный обдув продукта воздухом с целью удаления испаряемых из картофеля водяных паров с начальной температурой 293 К. В результате анализа данных было установлено, что за период постоянной скорости сушки удаляется по большей части только капиллярная и осмотическая влага. При этом вся теплота, подводимая к продукту, идёт на поверхностное испарение влаги, и таким образом температура продукта не изменяется.

Увеличение температуры пластин совпадает с первой критической влажностью продукта, при этом скорость сушки снижается. Всё это характеризует период убывающей скорости сушки, при котором удаляется адсорбционная и осмотическая влага. Здесь зона её испарения находится внутри пластин картофеля. До зоны испарения влага движется в жидком виде, а отсюда до поверхности – в парообразном.

Проведя анализ полученных в результате опытов данных, был разработан процесс радиационно-конвективной сушки, при котором сам этот процесс разбивается на три этапа. Каждый из этапов имеет свою собственную продолжительность, температуру и скорость воздушного потока с целью своевременного и эффективного отвода влаги из продукта.

Первый этап характеризуется нагревом пластин картофеля ИК-излучением до 318 К на протяжении 6 мин с обдувом воздушным потоком скоростью 1,5 м/с. На втором этапе нагрев производят до 323 К в течение 18 мин и обдувают пластины потоком воздуха со скоростью 1,2 м/с. На третьем этапе – до 328 К в течение 12 мин и скоростью потока 0,7 м/с. Таким образом конечная влажность продукта достигает 12%. В дальнейшем пластины картофеля обрабатывают вкусовыми добавками.

Рассматривая кривые сушки и скорости сушки (рис.1), температурную кривую и термограмму (рис.2) при ступенчатом температурном и гидродинамическом режиме, можно проследить три периода: прогрева, постоянной скорости сушки и убывающей.

Первый этап, соответствующий периоду прогрева, характеризовался нагревом наружных слоёв и испарением влаги с поверхности продукта. Поле влажности внутри пластин картофеля приобретает неоднородный характер за счёт повышения температуры поверхности и в связи с этим возникающего температурного градиента, который уменьшается к центру продукта. Также появляется градиент концентрации влаги, который повышается к центру продукта. В результате этого, влага начинает перемещается из центра картофеля к его поверхности, преодолевая сопротивление внутренних слоёв, что в свою очередь приводит к повышению температуры пластин. По мере удаления физико-механической влаги скорость воздушного потока как определяющий фактор интенсификации процесса теряет своё значение. В связи с этим, на втором этапе сушку следует вести при снижающейся скорости потока теплоносителя и повышающейся его температуре.

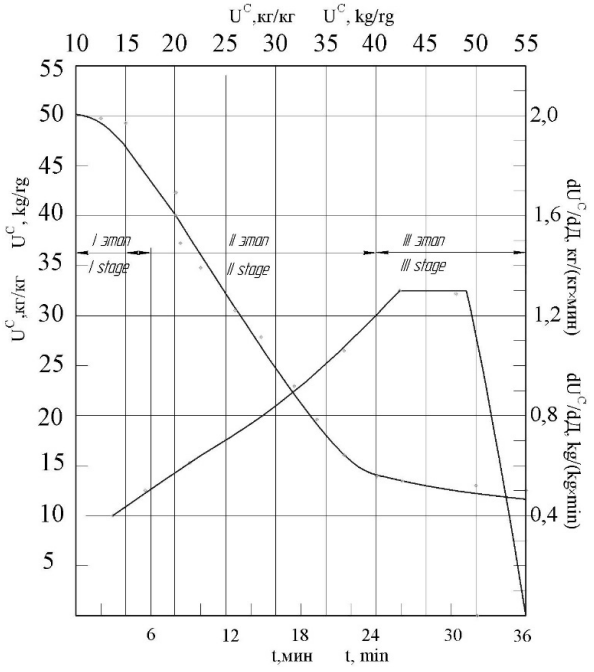


Рис. 1. Кривая сушки и скорости сушки и пластин картофеля при ступенчатом режиме радиационно-конвективной сушки

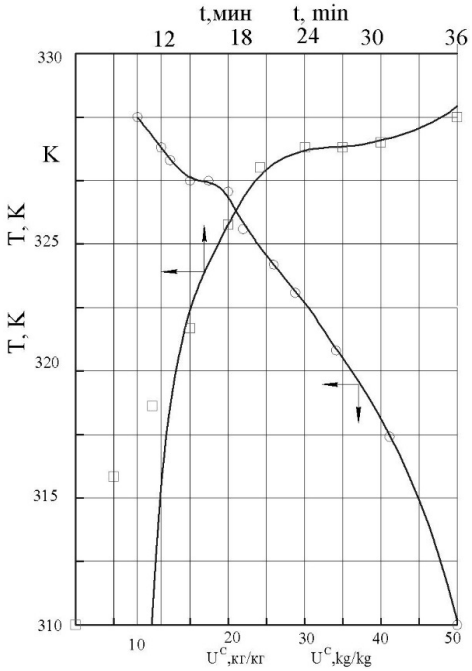


Рис. 2. Температурная кривая и термограмма сушки пластин картофеля при ступенчатом режиме радиационно-конвективной сушки картофеля

На втором этапе пластины картофеля нагревались до 323 К при одновременном обдуве потоком воздуха. Температура оказывает значительное влияние на удаление осмотической влаги из продукта. В этом периоде температура картофеля остаётся постоянной, и при этом происходит удаление капиллярной влаги за счёт перехода всей подводимой теплоты в интенсивное поверхностное испарение влаги, чем и обуславливается постоянная температура продукта.

Третий этап соответствует периоду убывающей скорости. Здесь нагрев ИК-лучами происходил до температуры 328 К при одновременном обдуве теплоносителем. Такой выбор обусловлен тем, что температура оказывает наибольшее влияние на интенсивность удаления полиадсорбционной влаги как фактор, прямо связанный с интенсивностью влагопереноса внутри продукта. При этом охлаждение картофеля за счёт испарения влаги с его поверхности ослабляется, и температура картофельных пластин стремится к заданной температуре нагрева продукта, которая поддерживалась за счёт импульсного режима работы ИК-ламп. В результате, количество теплоты, передаваемое через поверхность пластин из окружающей среды, снижается. Прогреваясь до температуры стенок пор картофеля, пар уходит с поверхности пластин в инфракрасную камеру с температурой поверхности продукта.

В заключение статьи следует отметить, что экспериментальные исследования показали ступенчатый режим радиационно-конвективной сушки картофеля при переменном теплоподводе позволяет сохранить целостность пластин картофеля, а так же способствует равномерному высушиванию картофеля без его перегрева, а анализ показателей качества полученных пластин продукта показали их очень высокую пищевую ценность, которая обусловлена высокой сохранностью ценных термолабильных веществ, из-за применения мягких» температурных режимов сушки и высокой интенсивностью влагоудаления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альхамова, Г.К. Продукты функционального назначения / Г.К. Альхамова, А.Н. Мазаев, Я.М. Ребезов, И.А. Шель, О.В. Зинина // Молодой ученый. – 2014. - №8. – С. 62-64.

2. Инновационное развитие техники пищевых технологий [Текст] / учебн. Пособие под редакцией акад. В.А. Панфилова //С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, Д.А. Казарцев, В.Ю. и др. С. - Пб. Лань – 2016, - 660с.

3. Желтоухова, Е.Ю. Технологическая линия сушки картофеля [Текст] / Желтоухова Е.Ю., Каданцев А.А., Яницкий В.И. // Сборник научных статей и докладов II международной научно-практической конференции (заочной) «Инновационные решения при производстве продуктов питания из растительного сырья» ФГБОУ ВО «ВГУИТ».-Воронеж: издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. – с. 251.

УДК 677.014.8

АНАЛИЗ СОРБЦИОННО – СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕТКАНОГО МАТЕРИАЛА И АППРОКСИМАЦИЯ ИЗОТЕРМ СОРБЦИИ РАЗЛИЧНЫМИ УРАВНЕНИЯМИ

ANALYSIS OF SORPTION STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF NONWOVEN MATERIAL AND APPROXIMATION OF SORPTION ISOTHERMS BY VARIOUS EQUATIONS

Мария Константиновна Кошелева*, Ольга Роальдовна Дорняк**
Marya K. Kosheleva*, Olga R. Dornyak**

**Российский государственный университет им. А.Н Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва*
**The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow*
(e-mail: oxtpaxt@yandex.ru)
***Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова*
Voronezh State Forestry Engineering University after G.F. Morozov

Аннотация. Проведен анализ сорбционных характеристик нетканого клеёного материала и рассмотрена возможность описания изотерм сорбции паров воды различными уравнениями. Показано, что для аппроксимации изотерм сорбции нетканого материала на основе лавсанового и вискозного волокна целесообразно использовать уравнение Цимерманиса для капиллярно-пористых материалов.

Abstract. The sorption characteristics of nonwoven oilcloth material are analyzed and the possibility of describing of sorption isotherms for water vapor by various equations is considered. It is shown that for approximation of the sorption isotherms of nonwoven fabric based on lavsan and viscose fibers, it is expedient to use the Zimermanis equation for capillary-porous materials.

Ключевые слова: нетканый клеёный материал, вискозное и лавсановое волокно, изотермы сорбции, аппроксимация.

Key words: nonwoven oilcloth material, viscose and lavsan fiber, sorption isotherms, approximation.

Целью работы является, анализ сорбционных характеристик нетканого клеёного материала (НКМ) и рассмотрение возможности описания изотерм сорбции паров воды различными уравнениями.

Характеристики реального пористого материала (размер и объём пор) являются эффективными характеристиками диффузионного сопротивления протеканию процесса массопередачи, которое оказывает пористая структура материала при сушке или других процессах термовлажностной обработки (промывке, пропитке) [1].

Расчет сорбционных и структурных характеристик нетканого клеёного материала на основе вискозного (в) и лавсанового (л) волокна проводился на основе экспериментальных изотерм сорбции-десорбции паров воды [1-3].

Для образца НКМ рассчитаны основные сорбционно-структурные характеристики, представленные в таблице 1.

Радиусы пор рассчитывались по уравнению Томсона-Кельвина [1-3].

Одной из причин того, что сорбционно-структурные характеристики не применяются достаточно широко при расчете и совершенствовании массообменных процессов является отсутствие методов, позволяющих описывать изотермы сорбции во всем диапазоне изменения относительного давления водяных паров (относительной влажности воздуха).

Таблица 1 Основные сорбционно-структурные характеристики волокнистого холста и НКМ

Образец	Состав	Средний радиус пор, нм	Объем пор, $см^3/кг$	Удельная поверхность, $м^2/г$
Волокнистый холст	в - 70%, л - 30%	1.91	145	151.7
НКМ	л - 100%. Связующее – акронал.	6.14	55.6	18.1
НКМ	л -70%, в - 30%. Связующее – аппретан.	3.46	68.2	39.4
НКМ	л -30%, в - 70%. Связующее – аппретан.	2.93	164.6	112.3
НКМ	л -10%, в - 90%. Связующее - БНК-40/4.	3.38	237.7	140.7
НКМ	вискоза (в) - 100%. Связующее –акронал.	3.09	264.4	170.9

Для описания изотерм сорбции-десорбции текстильных материалов было использовано уравнение, в основу которого положен геометрический подход к описанию S-образных кривых [1, 5].

Применительно к описанию изотерм сорбции-десорбции называемое обобщённым уравнение [1, 5] может быть представлено в виде:

$$U = 1/ (K(A-B)) \ln((A-\varphi_м+ \varphi)(\varphi_м-B))/((A-\varphi_м)(\varphi_м-\varphi-B)), \quad (1)$$

где U- влагосодержание образца, %; φ - относительное давление водяных паров (относительная влажность воздуха); А и В - соответственно правая и левая асимптоты к изотерме, выраженные в единицах относительного давления водяных паров; К - коэффициент пропорциональности; $\varphi_м$ - максимальное значение φ.

Параметры уравнения (1) А, В и К определялись на основе экспериментальных изотерм десорбции с использованием метода нелинейной регрессии. Рассчитанные значения параметров для образцов НКМ и волокнистого холста представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры уравнения (1), определённые на основе экспериментальных изотерм десорбции

Образец	Состав	К	А	В
Волокнистый холст	в - 70%, л - 30%	0.4022	0.9795	-4. 6636E-02
НКМ	л - 100%. Связующее -акронал	0.5332	0.9795	-3.5881E-03
НКМ	л -70%, в - 30%. Связующее -аппретан	1.0015	1.0694	-5. 0651E-03
НКМ	л -30%, в - 70%. Связующее -аппретан	0. 4430	1.0273	-5. 9351E-03
НКМ	л -10%, в - 90%. Связующее -БНК-40/4	0.3835	1.0124	-1.2864E-03
НКМ	в - 100%. Связующее -акронал	0.3178	1.0097	-2.7904E-03

Анализ показывает, что уравнение (1) можно использовать для оценки сорбционных свойств НКМ, однако в этом методе обработки экспериментальных данных заложены погрешности, возникающие при кусочно-линейной аппроксимации изотерм сорбции. Снижение такой погрешности может быть достигнуто при увеличении числа экспериментальных точек изотермы сорбции, но это вызывает неоправданное увеличение продолжительности эксперимента.

Рассмотрены так же возможности описания сорбционных свойств НКМ на основе уравнения Гендерсона [6] и уравнения Цимермaниса [7].

Уравнение Гендерсона [6]:

$$u = \left[-\frac{a}{T} ln\left(1 - \varphi\right) \right]^{b}, \tag{2}$$

где a, b – эмпирические константы.

Уравнение Цимермaниса для капиллярно-пористых материалов [7]:

$$u = u_{M\Gamma} \phi^{a_0 k^{\phi}}, \tag{3}$$

где a_0 и k – безразмерные постоянные, называемые соответственно структурной активностью капиллярно-пористого материала и коэффициентом приращения активности связи; $u_{мг}$ – максимальное гигроскопическое влагосодержание.

На рисунке 1 приведены опытные и расчитанные по уравнениям Гендерсона и Цимермaниса изотермы сорбции паров воды НКМ на основе смеси вискозного и лавсанового волокна.

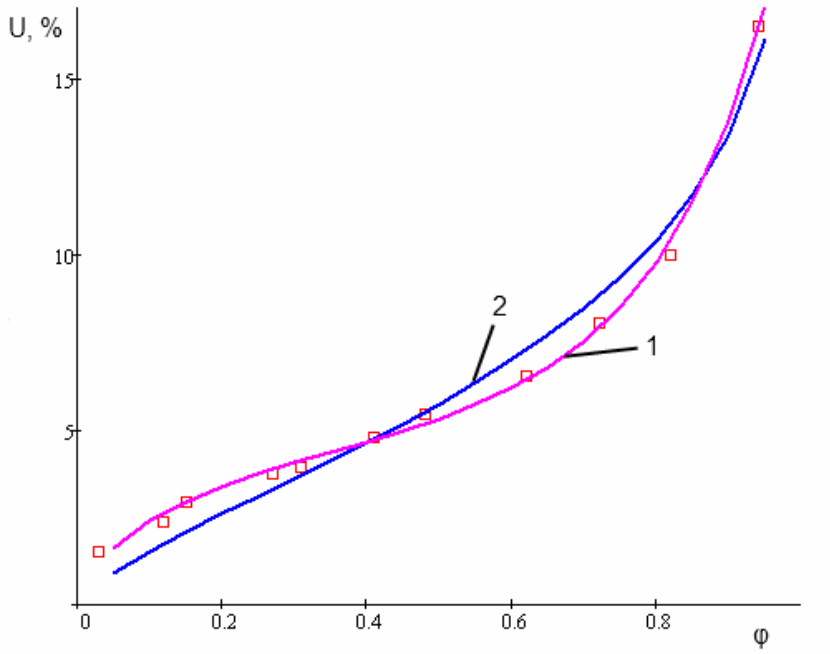


Рисунок 1. Экспериментальные (□) и расчётные зависимости равновесного влагосодержания НКМ от относительной влажности воздуха. 1- уравнение Цимермaниса, 2 – уравнение Гендерсона

Графики, представленные на рисунке 1 и проведённый анализ показывают, что уравнение Цимермaниса наиболее целесообразно использовать для описания сорбционных зависимостей НКМ.

Таким образом, установлено, что уравнение изотермы сорбции Цимермaниса для капиллярно-пористых материалов наиболее точно аппроксимирует экспериментальные сорбционные кривые нетканого клеёного материала на основе вискозных и лавсановых волокон. Именно это уравнение целесообразно использовать в расчётах процессов сушки,

экстрагирования технологических загрязнений, пропитки и других процессов термовлажностной обработки текстильных, в том числе нетканых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сажин Б.С., Кошелева М.К., Сажина М.Б.* Процессы сушки и промывки текстильных материалов. М.: ФГБОУ ВПО МГУДТ, 2013 - 213 с.

2. *Кошелева М.К., Власов А.Е.* Исследование сорбционных свойств нетканых клеёных материалов // Текстильная промышленность, № 1, 1992, С.30.

3. *Реутский В.А., Кошелева М.К., Власов А.Е.* Исследование процессов сушки и термообработки нетканых клеёных материалов // Текстильная промышленность, № 3, 1992, С.37

4. *Henderson, S.M.* A Basic Concept of Equilibrium Moisture / S.M. Henderson // Agr. Eng. Vol. 33, 1952, p. 29–33.

5. *Цимерманис, Л.-Х. Б.* Сорбция, структурообразование, массоперенос (термодинамика влажного тела) [Текст] / Л.-Х. Б. Цимерманис М.: «Алекс», 2006. 232 с.

8. *Кошелева М.К., Дорняк О.Р., Новикова Т.А.* Исследование сорбционных свойств хлопчатобумажных тканей в технологических операциях отделки // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 3 (363). С. 242-246.

УДК 37.523.9

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА
DISCRETE MODELS APPLICATION FOR CONVECTIVE HEAT TRANSFER RESEARCH

Сергей Петрович Бобков, Анастасия Сергеевна Чернявская
Sergei P. Bobkov, Anastasiya S. Chernyavskaya

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail: bsp@isuctl.ru)

Аннотация: Рассмотрена модель процесса переноса тепла в движущейся среде, основанная на дискретном аналоге кинетического уравнения Больцмана. Разработано программное приложение, позволяющее моделировать и визуализировать процесс переноса тепла движущейся сплошной средой. Анализ результатов компьютерного эксперимента позволяет утверждать, что полученные данные не противоречат реальным представлениям о процессах теплопереноса в движущейся жидкости.

Abstract: It is considered the model of heat transfer process in a moving medium based on the discrete analogue of the Boltzmann kinetic equation. It was developed a software application that allows to simulate and visualize the process of heat transfer by a moving continuous medium. Analysis of the computer experiment results allows us to state that the data obtained do not contradict the real concepts of the heat transfer processes in a moving fluid.

Ключевые слова: конвективный теплоперенос, дискретные модели, решеточный газ.

Keywords: convective heat transfer, discrete models, lattice gas.

Классический подход к моделированию процессов теплопереноса в сплошной среде базируется на использовании дифференциальных уравнений с частными производными. Эти математические модели хорошо изучены и успешно используются в науке и практике. В то же время при использовании указанных непрерывных детерминированных моделей возникают значительные трудности, особенно при описании поведения среды в объектах с границами сложной формы, при нелинейных свойствах среды и т.д. Это усложняет и ограничивает применимость традиционных моделей для решения практических задач.

Существуют взгляды, согласно которым интеграция микроскопических взаимодействий может приводить к тем же формам макроскопических уравнений, из которых исходит традиционное моделирование. Данная концепция стимулирует развитие дискретных подходов для моделирования теплопереноса. Среди них большое распространение получили модели, использующие системы клеточных автоматов, которые позволяют рассматривать изучаемый процесс в дискретном пространстве и времени [1].

Процесс передачи тепла в движущихся средах обусловлен совместным действием следующих механизмов:

макроскопический перенос тепловой энергии в результате перемещения потока сплошной среды;

перенос теплопроводностью, т.е. молекулярным (микроскопическим) движением;

обмен теплом между сплошной средой и ограничивающими поверхностями (стенки, препятствия и т.д.).

Очевидно, что моделирование конвективного теплопереноса неразрывно связано с моделированием движения жидкости.

Достаточно распространенными дискретными подходами для описания гидродинамических процессов на микроуровне являются модели решеточных газов. Они симулируют поведение отдельной частицы, движущейся по регулярной пространственной решетке, и сталкивающейся с другими частицами. Основным критерием при разработке данных моделей было соблюдение законов сохранения. При этом макроскопические параметры, такие как плотность, скорость, момент импульса, вычисляются путем усреднения величин, получаемых на микроскопическом уровне.

Развитием дискретного подхода является метод, основанный на модели решеточного газа, которая основана на дискретном аналоге кинетического уравнения Больцмана. Как и все решеточные газы, данная модель рассматривает частицы, движущиеся между узлами пространственной решетки определенной конфигурации, в данном случае ортогональной. Но при этом рассматривается не поведение каждой частицы в отдельности, а функция распределения плотности вероятности частиц по координатам и по скоростям. Это позволяет рассматривать эволюцию функции распределения частиц сплошной среды по шагам дискретного времени. Кроме того, наличие в уравнении функции плотности распределения дает возможность удобного перехода к исследованию тепловых процессов.

Возможности решеточной модели Больцмана для изучения течения жидкостей рассматривались рядом авторов и достаточно подробно описаны ранее. Для адаптации модели к описанию процесса конвективного теплопереноса нами были введены следующие положения.

Сплошная среда разбивается на дискретные ячейки (клетки), которые являются окрестностями узлов ортогональной пространственной решетки. Каждая клетка включает в себя определенное количество частиц, которое характеризуется локальной плотностью ρ. Кроме того, каждая клетка обладает некоторым количеством теплоты Q.

В отличие от реальной жидкости, где в любой момент времени каждая частица может двигаться в произвольном направлении, в решеточных моделях частицы могут двигаться только к соседним узлам пространственной решетки. То есть частицы здесь распределены по дискретному набору разрешенных скоростей. Для двухмерной задачи было выбрано девять направлений движения (скоростных каналов) c_i, включая направление с нулевой скоростью. Таким образом, в произвольный момент времени клетка содержит частицы, общее направление движения которых (макроскопическая скорость u) определяется как векторная сумма скоростей всех частиц. Количество теплоты Q, характеризующее клетку, также распределено по указанным скоростным каналам (направлениям). То есть частицы, перемещаясь в конкретном направлении, переносят с собой тепловую энергию и, таким образом, в модели описывается макроскопический теплоперенос.

Если пронумеровать разрешенные направления скорости индексом i, то долю частиц, переносящих теплоту в направлении i, за шаг времени можно обозначить q_i . Тогда дискрет-

ный аналог уравнения Больцмана, применительно к процессу переноса тепла запишется следующим образом:

$$q_i(r + c_i, t_{k+1}) - q_i(r, t_k) = \Lambda_i(q), \quad (1)$$

где: r – координата клетки; c_i – единичный вектор направления скорости; t_k –дискретный момент времени; $\Lambda_i(q)$ – оператор теплообмена, характеризующий перераспределение теплоты из-за столкновения частиц, находящихся в одной клетке.

Правая часть уравнения (1) описывает процесс релаксации тепловой энергии к равновесному состоянию, т.е. учитывает микроскопический перенос тепла.

Оператор теплообмена можно вычислить по следующей формуле:

$$\Lambda_i(q) = \frac{1}{\tau_q}\left(q_i(r,t) - q_i^{eq}(r,t)\right), \quad (2)$$

где q_i^{eq} – плотность равновесного распределения количества теплоты по скоростным каналам, τ_q - время тепловой релаксации, которое характеризует скорость обмена тепловой энергией между частицами вещества и связано с показателем теплопроводности.

Если предположить, что распределение частиц по скоростным каналам подчиняется закону Максвелла-Больцмана, то можно найти выражения для вычисления равновесных функций распределения q_i^{eq} . Для этого закон Максвелла-Больцмана следует записать в виде асимптотического равенства, а затем разложить его в ряд Маклорена до членов второго порядка точности. Опуская подробности вывода можно записать

$$q_i^{eq} = W_i Q\left(1 + 3c_i u\right), \quad (3)$$

где W_i – специальные множители, числовые значения которых зависят только от модуля вектор направления скорости $|c_i|$.

Конкретные числовые значения множителей W_i указаны в литературе [2].

Для описания поведения у стенок потока и препятствий при моделировании движения сплошной среды нами использовался принцип отражения частиц «на полпути» от препятствия. Теплообмен на границе рассчитывался

$$q_i(r + c_i, t_{k+1}) = q_i(r, t_k) - 0{,}5C[q_i(r, t_k) - q_i^b(r, t_k)], \quad (4)$$

где qib(r,t)- плотность распределения количества теплоты на стенке, C – коэффициент, учитывающий обмен теплом между сплошной средой и веществом неподвижной стенки.

Для анализа адекватности предложенной модели было создано программное приложение, имитирующее течение жидкости. Результаты моделирования представлены на рис.1. Рассматривалось движение нагретой жидкости в направлении слева направо. Распределение температуры показано градиентом цвета. Более темными оттенками отображаются наиболее горячие зоны, более светлыми – холодные. Шкала в условных единицах температуры приведена в верхней части рисунка.

На рисунке 1а показано течение нагретой жидкости в прямой трубе. Можно видеть, что нагретая жидкость, подаваемая с левой стороны, постепенно охлаждается от стенок. На рисунке 1б представлен процесс протекания нагретой жидкости через щель (стенки препятствия имеют более низкую температуру). Иллюстрация показывает, что после прохождения препятствия поток жидкости имеет более низкую температуру. Однако непосредственно у стенок за щелью температура жидкости высока, что, возможно, связано с наличием турбулентных потоков в этой области.

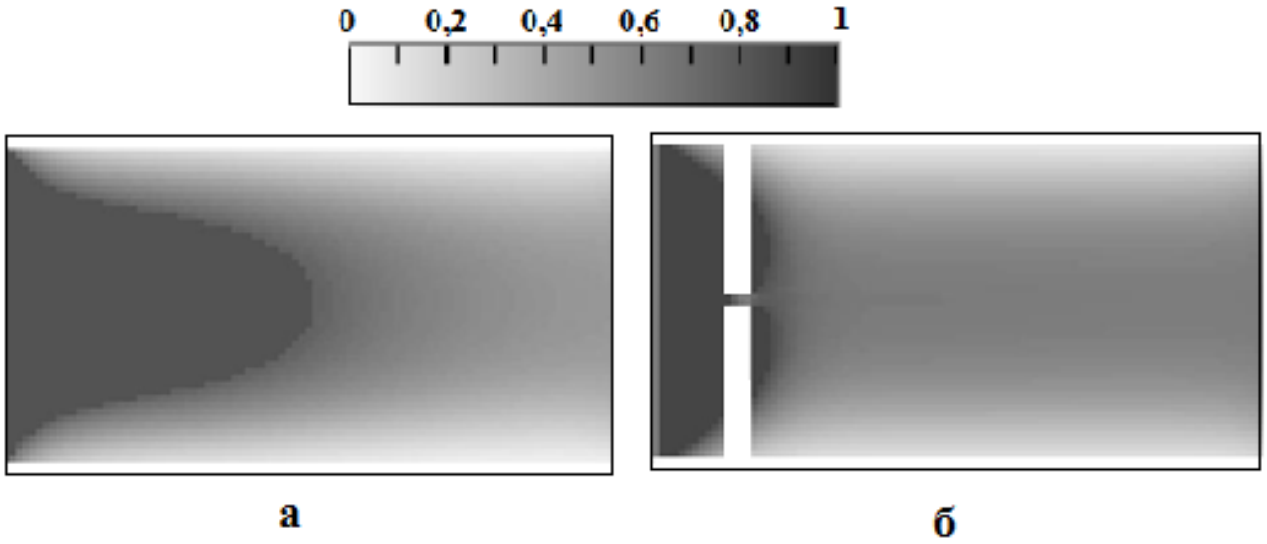


Рис. 1. Результаты компьютерного моделирования процесса охлаждения нагретой жидкости при ее течении в трубе.

В ходе компьютерного моделирования были получены результаты, совпадающие с теоретическими представлениями о реальных процессах теплопереноса в движущейся жидкости. Это доказывает возможности применения дискретных подходов и, в частности, метода решетчатого газа Больцмана для исследования данных процессов. Преимущества практического применения предложенного метода, с одной стороны, заключаются в отсутствии необходимости проведения реального физического эксперимента Кроме того, описанный подход позволяет изучать поведение жидкости в объектах сложной геометрической формы, что затруднительно при использовании классических математических моделей

ЛИТЕРАТУРА

1. *Toffoli T*. Cellular Automata Machines. Massachusetts Institute of Technolog, 1987,

2. *Dieter A. Wolf-Gladrow*. Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models: / Editors: A. Dold, Heidelberg,F. Takens, Groningen, B. Teissier, Paris, 2005.

УДК 66.047

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАГРЕВА ЧАСТИЦ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ ПРИ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕМ ИНФРАКРАСНОМ ЭНЕРГОПОДВОДЕ
MODELLING THE DYNAMICS OF HEATING PARTICLES IN A FLUIDIZED BED UNDER OSCILLATING INFRARED ENERGY SUPPLY

Станислав Павлович Рудобашта*, Галина Альбертовна Зуева**
Stanislav P. Rudobashta*, Galina A. Zueva**

** 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, Иваново*
***Ivanovo state University of Chemistry and Technology, Russia, Inanovo*
(e-mail: zueva_galina15@mail.ru)

Аннотация: Проведено математическое моделирование динамики нагрева частиц сферической формы в псевдоожиженном слое при осциллирующем инфракрасном энергоподводе. Численный эксперимент позволяет подобрать параметры процесса для реализации заданного технологического режима.

Abstract: A mathematical modelling of heating dynamics of spherical particles in a fluidized bed under an oscillating infrared energy supply was carried out. A numerical experiment allows to select process parameters for the implementation of the required process mode.

Ключевые слова: инфракрасный нагрев, динамика нагрева, осциллирующий режим, сферическая частица.

Keywords: infrared heating, heating dynamics, oscillating regime, spherical particle.

Инфракрасный нагрев материалов достаточно часто применяется при сушке материалов в химической, пищевой, микробиологической и других отраслях промышленности. Требование сохранить высокие кондиционные свойства высушиваемого термолабильного материла, заставляет применять осциллирующие (прерывистые) режимы, при которых стадия инфракрасного нагрева чередуется со стадией остывания материала без облучения его электромагнитным полем. Такие режимы позволяют не перегревать материал выше допустимой температуры.

Математические модели, описывающие осциллирующий (прерывистый) процесс сушки, приведены в [1-4]. Нами в [5] сформулирована и аналитически решена задача, описывающая тепло-массоперенос при сушке сферического тела в условиях осциллирующего электромагнитного подвода энергии, при граничных условиях тепло- и массообмена третьего рода.

В работе [1] показано, что анализ прерывистого тепломассообмена, выполненный применительно к одному сферическому телу, можно распространить на процесс осциллирующей конвективной сушки сферических частиц одинакового диаметра в псевдоожиженном или виброожиженном слое, принимая, что слой идеально перемешан и все частицы, таким образом, находятся в одинаковых условиях, что справедливо. Следуя этому подходу, используем построенную нами в [5] математическую модель тепломассопереноса при сушке одиночной сферической частицы для описания динамики нагрева частицы при осциллирующей инфракрасной сушке частиц в псевдо- или виброожиженном слое, продуваемом потоком газа. В этих условиях из-за хаотического перемещения частиц в слое при идеальном перемешивании частиц каждая частица практически равномерно облучается электромагнитным полем по всей своей поверхности. Поэтому анализ осциллирующего электромагнитного нагрева (без сушки) или осциллирующей электромагнитной сушки можно выполнить применительно к единичному

сферическому телу - аналогично тому, как это было сделано в [1] для осциллирующей конвективной сушки.

При формулировке задачи было положено, что поглощение лучистой энергии происходит по экспоненциальному закону Бугера-Ламберта-Бера. Кроме того, были приняты следующие условия и допущения: тело имеет сферическую форму; термодиффузия и молярный перенос влаги в теле отсутствуют (это условие правомерно, поскольку рассматривается низкотемпературная сушка термолабильных материалов); электродиффузией согласно [6] также пренебрегали; следовательно, внутренний массоперенос осуществляется только путём массопроводности; отсутствуют внутренние фазовые превращения (сток теплоты на испарение влаги имеет место у поверхности тела); поток лучистой энергии, перемещающийся внутрь частицы, затухает по экспоненциальному закону и полностью поглощается до достижения им центра частицы; все теплофизические и электрофизические характеристики материала, кинетические характеристики процесса, а также температура сушильного агента и концентрация пара в нем постоянны. Полученное при этих условиях аналитическое решение задачи [5] в данной работе использовано для численного моделирования процесса осциллирующей инфракрасной сушки частиц.

В численном эксперименте исследовали влияние следующих параметров процесса на динамику нагрева сферической частицы в псевдоожиженном слое: 1) плотности лучистого потока, падающего на частицу q_0, 2) длительности цикла $\tau_ц$ и времени нагрева в цикле $\tau_{наг}$. В расчетах эквивалентный диаметр частицы был принят равным d=2R=2,23 мм. Теплофизические свойства частицы брали равными [7]: коэффициент теплопроводности $\lambda = 0{,}33$ Вт/(м К), коэффициент температуропроводности $a = 0.21 \times 10^{-6}$ м^2/с (следовательно, объемная теплоемкость частицы равна $c\rho = \lambda/a = 1.57 \times 10^6$ Дж/(м^3 К), коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи, согласно расчетам в [5], приняли соответственно равными: $\alpha = 109$ Вт/(м^2 К), $\beta = 0{,}084$ м/с. Кроме того, приняли начальную температуру частицы $t_н = 18^oC$, температуру воздуха, обдувающего частицу $t_c = 20^oC$, коэффициент поглощения $A = 0{,}9$, коэффициент экстинкции $\mu^* = 3000$ 1/м (при таком значении коэффициента μ^* по экспоненциальному закону поглощения энергия лучистого потока, достигающая центра частицы, составляет 3,5% лучистой энергии, поступающей на частицу).

Расчеты показали, что с увеличением плотности лучистого потока при прочих равных условиях возрастает температурный максимум нагрева материала t_{max} , а температурный минимум t_{min} остается без изменения. На рис. 1 показан один из результатов этого расчета, при котором достигается $t_{max} = 40^oC$.

Изменение длительности цикла при прочих равных условиях не влияет на максимальную и минимальную температуры частицы (рис. 2), но при чрезмерно большой длительности цикла приводит к неоправданной задержке температуры материала на низшем температурном уровне и поэтому не целесообразно. Правильное сочетание длительности цикла и продолжительности стадии нагрева в нем иллюстрирует рис. 2.

Увеличение длительности нагрева материала в цикле приводит к повышению минимальной температуры частицы. Таким образом, проведенный численный эксперимент показал, что с помощью представленной математической модели путем вариантных расчетов можно находить необходимый технологический режим осциллирующей электромагнитного нагрева частиц в псевдоожиженном слое, что представляет интерес для термолабильных материалов. Эта возможность иллюстрируется ниже.

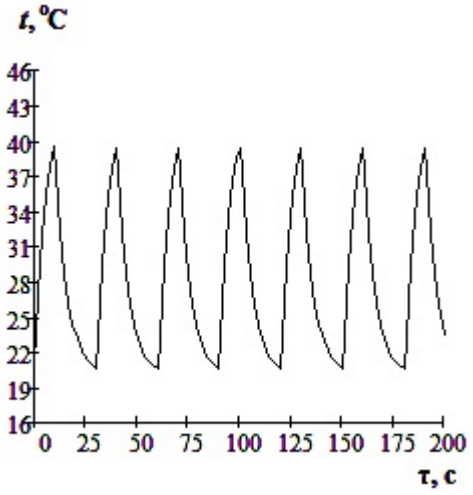


Рис. 1. Динамика нагрева частицы при $t_c = 20^oC$, $\tau_ц = 30$ с, $\tau_{наг} = 10$ с; $q_0 = 6000$ Вт/м^2.

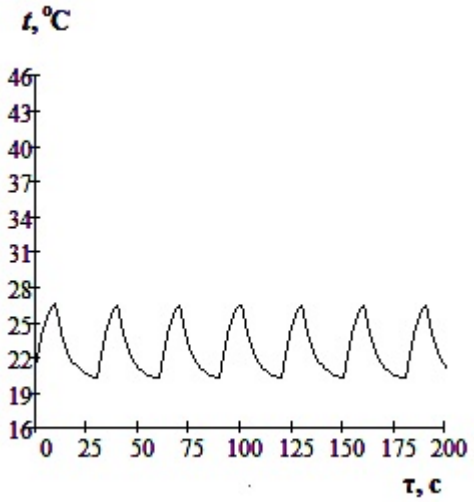


Рис. 2. Динамика нагрева частицы при $t_c = 20^oC$, $\tau_{наг} = 10$ с, $q_0 = 2000$ Вт/м^2; $\tau_ц = 30$ с.

В [8] было установлено, что проведение инфракрасной сушки семян в осциллирующем температурном режиме вызывает стимуляцию семян. Поскольку рассматриваемая математическая модель описывает динамику нагрева частиц также в условиях сушки [5], то представляло интерес с ее помощью численным методом проанализировать влияние технологических параметров процесса на динамику температурного поля в условиях сушки семян в псевдоожиженном слое. Численный анализ проводили применительно к семени лука репчатого. Семена лука репчатого сорта были выбраны в качестве объекта анализа по той причине, что для них имеются данные по коэффициенту массопроводности k [9], равновесному влагосодержанию $u_р$ [10], необходимые для расчетов. В [8, 11] был рекомендован режим осциллирующей ИК-сушки семян, при котором в циклах «нагрев-остывание» их температура колеблется в пределах от $t_{min} = 34^oC$ до $t_{max} = 40^oC$, а продолжительность цикла составляет $\tau_ц = 23$ с.

В расчетах варьировали плотность теплового потока q_0, поступающего на семя, соотношение длительностей стадий нагрева $\tau_{наг}$ и остывания $\tau_{ост}$ в цикле, температуру воздуха t_c, обдувающего семена. В итоге проведенных расчетов были найдены технологические режимы, удовлетворяющие приведенным выше условиям по длительности цикла и температурам t_{min} и t_{max}. Вычисления показали, что достичь заданный в расчетах технологический режим ($t_{min} = 34^oC$, $t_{max} = 40^oC$, $\tau_ц = 30$ с) можно при разных сочетаниях плотности лучистого потока и температуры воздуха, обдувающего семена, а именно: 1) при $q_0 = 5000$ Вт/м^2, $t_c = 20^oC$, $\tau_ц = 30$ с, $\tau_{наг} = 28$ с; 2) при $q_0 = 2000$ Вт/м^2, $t_c = 34^oC$, $\tau_ц = 30$ с, $\tau_{наг} = 10$ с. Как видно из выше указанных режимов, во втором из них обдув семени осуществляется не атмосферным, а предварительно нагретым воздухом. Создание чрезмерно больших значений плотности лучистого потока нецелесообразно, поэтому в практическом отношении второй технологический режим представляется более предпочтительным. Динамика нагрева частицы в этом режиме показана на рис. 3. Из него видно, что данный режим обеспечивает необходимую устойчивую осцилляцию температуры частицы в интервале от $t_{min} = 34^oC$ до $t_{max} = 40^oC$.

Найденные технологические режимы стимуляции семян лука могут быть реализованы в условиях псевдоожижения при порозности слоя $\varepsilon = 0{,}6$ и скорости воздуха $v = 0{,}72$ м/с, что превышает первую критическую скорость псевдоожижения, равную 0,62 м/с, (число псевдоожижения равно 1,16 [5].

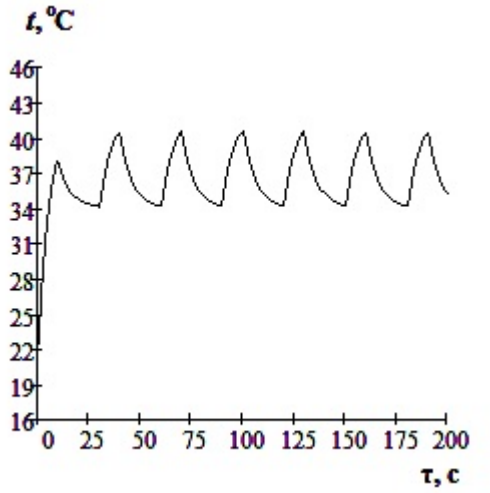


Рис. 3. Рабочий режим нагрева частицы в пределах от t_{min} = 34°C до t_{max} = 40°C, который достигается при q_0 = 2000 Вт/м^2, t_c = 34°C, $\tau_ц$ = 30 с, $\tau_{наг}$ = 10 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенного анализа показаны возможность и целесообразность численного моделирования динамики осциллирующего электормагнитного нагрева частиц в псевдо-или виброожиженном слое на основе математической модели, приведенной в [5], с целью нахождения нужного технологического режима.

2. Найдены технологические параметры проведения процесса осциллирующей инфракрасной сушки семян лука репчатого в псевдо- или виброожиженном слое, соответствующие требуемым параметрам процесса по максимальной и минимальной температурам нагрева семян в процессе и длительности циклов облучения, которые соответствуют максимальному эффекту их стимуляции.

3. Для проведения процесса осциллирующей инфракрасной сушки семян в псевдоожиженном слое в режиме, обеспечивающем значения температур t_{min} = 34°C, t_{max} = 40°C, целесообразно обдувать семена воздухом, предварительно нагретым до температуры 34°C. При этом плотность потока облучения должна быть q_0 = 2000 Вт/м^2, длительность цикла $\tau_ц$ = 30 с, а длительность стадии нагрева в нем $\tau_{наг}$ = 10 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bon J.*, *Kudra T.* Enthalpy-Driven Optimization of Intermittent Drying // Drying Technology. 2007. V. 25. Issue 4. P. 523.

2. *Vaquiro H. A.*, *Clemente G.*, *Garcia-Perez J.V.*, *Mulet A., Bonb J.* Enthalpy-driven optimization of intermittent drying of Mangifera indica L. // Chemical Engineering Research and Design. 2009. V. 87. P. 885.

3. *Гринчик Н.Н., Акулич П.В., Адамович А.Л., Куц П.С., Кундас С.П.* Моделирование неизотермического тепло- и влагопереноса в капиллярнопористых средах при периодическом микроволновом нагреве // ИФЖ. 2007. Т. 80, № 1. С. 3–12.

4. *Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zuev N.A.* Heat and Mass Transfer in Drying in Oscillating Electromagnetic Field // Theor. Found. Chem. Eng. 2011. V. 45, № 6. P. 830.

5. *Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kartashov E.M.* Heat and Mass Transfer when Drying a Spherical Particle in an Oscillating Electromagnetic Field // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2016. V. 50. № 5. P. 718.

6. *Лыков А. В.* Теория сушки. М.: Энергия, 1968.

7. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочное пособие / Под. ред. *Гинзбурга А.С.* М.: Пищевая промышленность. 1975.

8. *Рудобашта С.П.*, *Григорьев И.В.* Импульсная инфракрасная сушка семян // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33. № 8. С. 85.

9. *Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А.* Массопроводность при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. Вып. 1. С. 103.

10. *Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А.* Гигроскопические свойства семян // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. Вып. 1. С. 68.

11. Рудобашта С.П.,Зуева Г.А., Зуев Н.А. Стимуляция семян путем осциллирующей инфракрасной термообработки // Промышленная теплотехника. 2013. Т. 35. № 7. С. 218.

УДК 53.08

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В СИСТЕМЕ ДВУХ ТЕЛ НА СТАДИИ ОСТЫВАНИЯ
MATHEMATICAL MODEL OF HEAT PROPAGATION IN THE SYSTEM OF TWO BODIES DURING THE COOLING

Николай Павлович Жуков, Нина Филипповна Майникова, Иван Владимирович Рогов
Nikolai P. Zhukov, Nina F. Mainikova, Ivan V. Rogov

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(e-mail: teplotehnika@nnn.tstu.ru)

Аннотация: Представлена математическая модель распространения тепла в сферическом полупространстве на стадии остывания. Решение краевой задачи теплопроводности возможно применить в методах неразрушающего теплового контроля.

Abstract: The mathematical model of distribution of heat in the spherical half-space during the cooling phase. The solution of the boundary value problem of heat conduction may be used in methods of non-destructive thermal inspection.

*Ключевые слова***:** моделирование; математическая модель, сферическое полупространство; температурное поле; неразрушающий контроль; теплофизические свойства.

Keywords: modeling; mathematical model, the spherical half-space; temperature field; nondestructive testing; thermal properties.

Математическая модель, описывающая распространение тепла в системе двух полуограниченных тел на стадии остывания, получена на основе решения следующей краевой задачи теплопроводности [1].

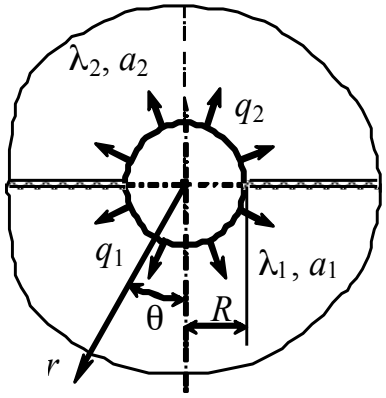


Рис. Тепловая схема системы с поверхностным сферическим нагревателем

Два полуограниченных тела с различными теплофизическими свойствами (ТФС) при температуре $T(r, \theta, 0) = 0$ находятся в идеальном тепловом контакте с поверхностным сферическим источником тепла. Источник тепла постоянной мощности имеет радиус R и удельную поверхностную мощность - q. Вне источника тепла, в плоскости соприкосновения тел, существует идеальная теплоизоляция (рисунок). Источник тепла действует заданное время, затем отключается и система остывает.

Конечное распределение температуры после окончания действия источника тепла принимается близким к стационарному [1, 4].

Математически задача записывается следующим образом:

$$\frac{\partial T_1(r,\theta,\tau)}{\partial \tau} =$$

$$= a_1\left(\frac{\partial^2 T_1(r,\theta,\tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T_1(r,\theta,\tau)}{\partial r} + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial T_1(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\right)\right), \quad (1)$$

$$r > R,\ 0 \le \theta < \frac{\pi}{2},\ \tau > 0;$$

$$\frac{\partial T_2(r,\theta,\tau)}{\partial \tau} =$$

$$= a_2\left(\frac{\partial^2 T_2(r,\theta,\tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T_2(r,\theta,\tau)}{\partial r} + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial T_2(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\right)\right), \quad (2)$$

$$r > R,\ \frac{\pi}{2} < \theta \le \pi,\ \tau > 0;$$

$$T_1(r,\theta,0)\Big|_{\substack{r\ge R\\ 0\le\theta\le\frac{\pi}{2}}} = f(r), \quad T_2(r,\theta,0)\Big|_{\substack{r\ge R\\ \frac{\pi}{2}\le\theta\le\pi}} = f(r); \quad (3)$$

$$T_1(\infty,\theta,\tau)\Big|_{\substack{\tau>0\\ 0\le\theta<\frac{\pi}{2}}} = T_2(\infty,\theta,\tau)\Big|_{\substack{\tau>0\\ \frac{\pi}{2}<\theta\le\pi}} = 0; \quad (4)$$

$$T_1(R,\theta,\tau)\Big|_{\substack{\tau>0\\ 0\le\theta\le\frac{\pi}{2}}} = T_2(R,\theta,\tau)\Big|_{\substack{\tau>0\\ \frac{\pi}{2}\le\theta\le\pi}}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_1(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\Big|_{\substack{\theta=\frac{\pi}{2}-0\\ r>R\\ \tau>0}} = \frac{\partial T_2(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\Big|_{\substack{\theta=\frac{\pi}{2}+0\\ r>R\\ \tau>0}} = 0,$$

$$\frac{\partial T_1(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\Big|_{\substack{\theta=0\\ r>R\\ \tau>0}} = \frac{\partial T_2(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\Big|_{\substack{\theta=\pi\\ r>R\\ \tau>0}} = 0; \quad (6)$$

$$\lambda_1\frac{\partial T_1(R,\theta,\tau)}{\partial r}\Big|_{0\le\theta<\frac{\pi}{2}-0} = 0, \quad \lambda_2\frac{\partial T_2(R,\theta,\tau)}{\partial r}\Big|_{\frac{\pi}{2}+0<\theta\le\pi} = 0,\ \tau > 0, \quad (7)$$

где $f(r)$ – функция начального распределения температуры в каждом полуограниченном теле (после отключения нагревателя); $f(r) = \dfrac{2qR^2}{(\lambda_1+\lambda_2)r}$ [1].

Запишем уравнения (1) и (2) в виде [1]:

$$\frac{\partial T_1(r,\tau)}{\partial\tau} = a_1\left(\frac{\partial^2 T_1(r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T_1(r,\tau)}{\partial r}\right), \quad r > R,\ \tau > 0,\ 0 \le \theta < \frac{\pi}{2}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_2(r,\tau)}{\partial\tau} = a_2\left(\frac{\partial^2 T_2(r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T_2(r,\tau)}{\partial r}\right), \quad r > R,\ \tau > 0,\ \frac{\pi}{2} < \theta \le \pi. \quad (9)$$

Решения (8) и (9) в области преобразования Лапласа имеют вид [1, 4]:

$$rT_{1L}(r,p) - \frac{2qR^2}{(\lambda_1+\lambda_2)p} = A\exp\left[-\sqrt{\frac{p}{a_1}}r\right] + B\exp\left[\sqrt{\frac{p}{a_1}}r\right],\ 0 \le \theta < \frac{\pi}{2}; \quad (10)$$

$$rT_{2L}(r,p)-\frac{2qR^2}{(\lambda_1+\lambda_2)p}=C\exp\left[-\sqrt{\frac{p}{a_2}}r\right]+D\exp\left[\sqrt{\frac{p}{a_2}}r\right],\ \frac{\pi}{2}<\theta\le\pi. \tag{11}$$

Граничные условия для изображения можно записать в виде:

$$T_{1L}(\infty,p)\Big|_{0\le\theta<\frac{\pi}{2}}=T_{2L}(\infty,p)\Big|_{\frac{\pi}{2}<\theta\le\pi}=0, \tag{12}$$

$$T_{1L}(R,p)\Big|_{0\le\theta\le\frac{\pi}{2}}=T_{2L}(R,p)\Big|_{\frac{\pi}{2}\le\theta\le\pi}, \tag{13}$$

$$\lambda_1\frac{dT_{1L}(R,p)}{dr}\Big|_{0\le\theta<\frac{\pi}{2}-0}=0,\quad \lambda_2\frac{dT_{2L}(R,p)}{dr}\Big|_{\frac{\pi}{2}+0<\theta\le\pi}=0. \tag{14}$$

Из условия (12) следует, что $B = D = 0$.

Постоянную A определим из граничного условия (14):

$$\begin{aligned}&\lambda_1\frac{A}{R^2}\exp\left[-\sqrt{\frac{p}{a_1}}R\right]\left(\sqrt{\frac{p}{a_1}}R+1\right)+\frac{2\lambda_1 q}{(\lambda_1+\lambda_2)p}=\\&=-\lambda_2\frac{C}{R^2}\exp\left[-\sqrt{\frac{p}{a_2}}R\right]\left(\sqrt{\frac{p}{a_2}}R+1\right)-\frac{2\lambda_2 q}{(\lambda_1+\lambda_2)p}.\end{aligned} \tag{15}$$

Из условия (13) имеем:

$$A\exp\left[-\sqrt{\frac{p}{a_1}}R\right]=C\exp\left[-\sqrt{\frac{p}{a_2}}R\right],\quad \text{тогда}\quad C=A\exp\left[R\left(\sqrt{\frac{p}{a_2}}-\sqrt{\frac{p}{a_1}}\right)\right]. \tag{16}$$

Подставляя выражение (16) в (15) получим

$$A=-\frac{2qR^2}{p\exp\left[-\sqrt{\frac{p}{a_1}}R\right]\left(\lambda_1\left(\sqrt{\frac{p}{a_1}}R+1\right)+\lambda_2\left(\sqrt{\frac{p}{a_2}}R+1\right)\right)}.$$

Следовательно, решение (10) примет вид:

$$T_{1L}(r,p)=\frac{2qR^2}{rp(\lambda_1+\lambda_2)}-\frac{2qR\exp\left[-(r-R)\sqrt{\frac{p}{a_1}}\right]}{rp(\varepsilon_1+\varepsilon_2)\left(\sqrt{p}+\frac{\lambda_1+\lambda_2}{R(\varepsilon_1+\varepsilon_2)}\right)},\quad 0\le\theta<\frac{\pi}{2}.$$

Перейдя от изображения к оригиналу и воспользовавшись разложением функции erfc(x) в ряд при больших значениях τ для первого полуограниченного тела, получим

$$T_1(r,\tau)=\frac{2qR^3(\varepsilon_1+\varepsilon_2)}{r\sqrt{\pi}(\lambda_1+\lambda_2)^2}\left(\frac{(r-R)(\lambda_1+\lambda_2)}{\sqrt{a_1}\,R(\varepsilon_1+\varepsilon_2)}+1\right)\frac{1}{\sqrt{\tau}},\quad r>R,\ \tau>0,\ 0\le\theta<\frac{\pi}{2}, \tag{17}$$

При $r = R$

$$T_1(R,\tau)=\frac{2qR^2(\varepsilon_1+\varepsilon_2)}{\sqrt{\pi}\ (\lambda_1+\lambda_2)^2}\frac{1}{\sqrt{\tau}},\ \tau>0,\ 0\le\theta<\frac{\pi}{2}. \tag{18}$$

Таким образом, получены математические модели (17 и 18), описывающие распространение тепла в системе двух полуограниченных тел на стадии остывания. Полученные результаты возможно использовать при разработке методов и средств неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и теплового контроля структурных превращений (фазовых и релаксационных) в полимерных материалах [2, 3, 5].

Обозначения: a– температуропроводность, м^2/с; q – плотность теплового потока, Вт/(м^2); R– радиус сферического нагревателя, м; T– температура, К; λ– теплопроводность, Вт/(м·К);

$c\rho$ – объёмная теплоемкость, Дж/(м^3·К); r, θ – координаты; ρ – плотность, кг/м^3; τ – время, с; ***Индексы*:** 1, 2 – первое и второе тело.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков, Н.П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий. / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова. – М.: Машиностроение-1. 2004. – 288 с.

2. Zhukov, N.P. Modeling of the process of heat transfer from a plane heat source of constant strength in thermophysical measurements / N.P. Zhukov, N.F. Mainikova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2005. – V. 78, № 6. – P. 1104 – 1112.

3. Zhukov, N.P. Multimodel method of nondestructive determination of the thermophysical properties of solid materials / N.P. Zhukov, N.F. Mainikova, I.V. Rogov, E.V. Pudovkina// Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2012. – V. 85, № 1. – P. 203 – 209.

4. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа. 1967. – 599 с.

5.Майникова, Н.Ф. Методы и средства неразрушающего теплового контроля структурных превращений в полимерных материалах / Н.Ф. Майникова, С.В. Мищенко, Н.П. Жуков, И.В. Рогов. – М.: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ». 2012. – 320 с.

УДК 66.071.7:532.5.001.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ МАРАНГОНИ В ПРОЦЕССЕ АБСОРБЦИИ ГАЗОВ
MATHEMATICAL MODELING OF THE MARANGONI INSTABILITY IN GAS ABSORPTION

Евгений Федорович Скурыгин, Тарас Анатольевич Поройко
Evgeny F. Skurygin, Taras A. Poroyko

Ярославский государственный технический университет, Россия, Ярославль
Yaroslavl State Technical University, Russia, Yaroslavl
(e-mail: skouryguine@rambler.ru, poroykota@gmail.ru)

Аннотация: Рассматриваются закономерности перехода процесса абсорбции газа из диффузионного в конвективный режим, вызванный термокапиллярной неустойчивостью. На основе упрощенной нелинейной модели получена зависимость критического времени от физических характеристик процесса.

Abstract: Some features of the transition of the gas absorption process from a diffusion to a convective regime caused by thermocapillary instability are considered. On the basis of the simplified nonlinear model, the dependence of the critical time on the physical characteristics of the process is obtained.

Ключевые слова: абсорбция, неустойчивость Марангони
*Keywords:*absorption, Marangoni instability.

Термокапиллярная неустойчивость, известная также как эффект Марангони, интересна своей способностью оказывать сильное влияние на скорость массопереноса на границе систем жидкость-газ [1]. Ускорение массопереноса может иметь практическое применение для интенсификации химико-технологических процесов [2].

Рассматривается нестационарный процесс физической абсорбции газа слоем первоначально неподвижной жидкости бесконечной толщины. В начальный момент концентрация абсорбируемого вещества в жидкости равна нулю.

Переход процесса абсорбции в неустойчивый конвективный режим определяется двумя двумя резко различающимися масштабами времени [3,4]. Первое – время стационарной точки возмущений, когда возникающие флуктуации скорости жидкости, температуры и концентрации абсорбируемого вещества перестают и начинают совместно расти. второе -

время перехода процесса в конвективный режим, когда развитые возмущения приводят к увеличению скорости массообмена. Первое время определяется следующей формулой

$$t_{st} = \tau_{st}(Le)t_*, \quad t_* = \frac{1}{D}\left(\frac{\lambda\mu}{\varepsilon\Delta H c_*}\right)^2$$

где $\tau_{st}(Le)$ - безразмерная функция числа Льюиса, t_* - характерное время, λ – теплопроводность жидкости, μ - ее динамическая вязкость, ε - температурный коэффициент поверхностного натяжения, ΔH – удельная теплота растворения, c_* - равновесная концентрация абсорбируемого вещества в жидкости. для чисел Льюиса Le>50 функция $\tau_{st}(Le)$ описывается следующей аппроксимационной формулой [5]

$$\tau_{st} = \pi(1 + 3\pi^{1/3} Le^{-1/3} + 12 Le^{-2/3})$$

Второе время можно представить в виде

$$t_{cr} = \tau_{cr}(\mathrm{Pr}, Le, P)t_* \qquad (1)$$

где Pr – число Прандтля, P – набор параметров, характеризующих начальную интенсивность возмущений. Произвол в выборе начальных интенсивностей возмущений не позволяет вычислить критическое время, однако функция

$$f(Le, \mathrm{Pr}, P) = \frac{\tau_{cr}(Le, \mathrm{Pr}, P)}{\tau_{cr}(Le_0, \mathrm{Pr}_0, P)} \qquad (2)$$

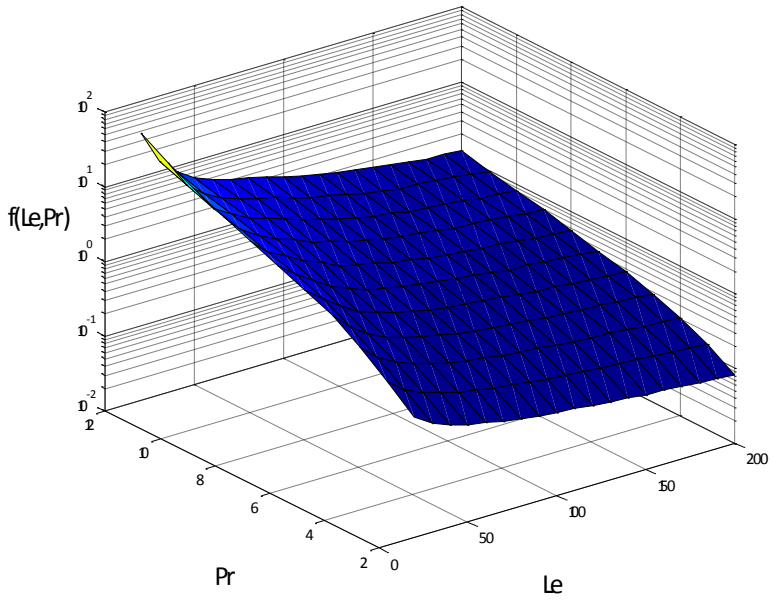


Рис. 1. Функция критического времени от числа Льюиса и числа Прандтля.

позволяет определить как изменяется критическое время с изменением чисел Льюиса и Прандтля. Для расчетов использовалась упрощенная нелинейная модель [4]. .Расчеты, выполненные для Pr_0=7, Le_0=80, показали, что функция *f(Le,Pr,P)* слабо зависит от параметров P. На рис. 1 представлены результаты расчетов функции *f(Le,Pr)*

В таблице 1 представлены известные экспериментальные данные критического времени и результаты расчетов по нелинейной модели. Для случая абсорбции CO_2водой при температуре 24.5^0C принимаем экспериментальное значение критического времени 100 с. Теоретические оценки для других систем выполнялись по формулам (1), (2).

Таблица 1. Сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными данными.

система	t_*, с	Le	Pr	t_{cr} , с эксперимент	t_{cr},с расчет по модели
Диоксид углерода-вода, 24.5^0C	0.0171	76.6	6.19	100[676]	100
Диоксид углерода-вода, 18^0C	0.0155	88	7.45	120[7]	115
Диоксид углерода -толуол, 25^0C	$2.06*10^{-4}$	20.2	6.88	10.75[8]	6.9
Диоксид углерода -метанол, 25^0C	$1.09*10^{-4}$	27.6	6.80	9.13[8]	2.4

Как видим, теоретические оценки согласуются с экспериментальными данными абсорбции диоксида углерода в воде и толуоле. Заниженная оценка критического времени для абсорбции диоксида углерода в метаноле может быть объяснена неучтенным эффектом плотностной конвекции. Для метанола характерны высокие значения коэффициента теплового расширения и равновесной концентрации диоксида углерода.

ЛИТЕРАТУРА

1. L.E.Scriven, C.V.Sternling, Interfaciel turbulence: Hydrodynamic instability and the Marangoni effect //AIChE Journal/ V.5. No 4. P.514.

2. Аксельрод Ю.В., Газожидкостные хемосорбционные процессы. М. Химия. 1989.

3. TA Poroyko and EF Skurygin. On the Marangoni Instability in Gas Absorption // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V 495 012033. Doi :10.1088/1742-6596/495/1/012033

4. EF Skurygin and TA Poroyko. A simplified nonlinear model of the Marangoni Instability in Gas Absorption // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V710 012036 Doi :10.1088/1742-6596/710/1/012036

5. Поройко Т.А., Скурыгин Е.Ф., Влияние толщины слоя жидкости на неустойчивость процесса абсорбции // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т.47, № 6, С. 618-624.

6. Plevan R.E., Quin J.A., The effect of monomolercular films on the rate of gas absorption into a quiescent liquid //AIChE Journal. 1966. V12, P.894.

7. K. K. Tan and R. B. Thorpe, Gas Diffusion into Viscous and Non-Newtonian Liquids, //Chem. Eng. Sci., 1992. V.47. P.3565.

8. Z. F. Sun, K. T. Yu, S. Y. Wang, and Y. Z. Miao, Absorption and Desorption of Carbon Dioxide into and from Organic Solvents: Effects of Rayleigh and Marangoni Instability // Ind. Eng. Chem. Res. 2002, V 41. 1905.

УДК 531.3

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДСОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ С ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ДАВЛЕНИЕМ
COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF PRESSURE SWING ADSORPTION PROCESSES

Евгений Игоревич Акулинин, Андрей Анатольевич Ишин, Сергей Александрович Скворцов, Дмитрий Станиславович Дворецкий, Станислав Иванович Дворецкий
Evgeniy I. Akulinin, Andrey A. Ishin, Sergey A. Skvortsov, Dmitriy S. Dvoretsky, Stanislav I. Dvoretsky

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(e-mail: sdvoretsky@tstu.ru)

Аннотация: В результате проведенных вычислительных экспериментов с использованием математической модели динамики PSA (Pressure swing adsorption)- процесса разделения многокомпонентных газовых смесей с целью концентрирования водорода было определено влияние изменения температуры, состава и давления исходной газовой смеси на чистоту, степень извлечения и температуру продукционного водорода в широком диапазоне изменения длительности стадии адсорбции. Изучены динамика процесса адсорбции компонентов газовой смеси и характер движения сорбционного и теплового фронтов по высоте слоя адсорбента в адсорбере, связь производительности PSA- установки с чистотой получаемого водорода.

Abstract: The paper analyses the results of computational experiments using the mathematical model for the dynamics of PSA (Pressure swing adsorption) process of multicomponent gas mixtures separation for hydrogen concentration. The influence of changes in temperature, composition and pressure of the initial gas mixture on purity, recovery rate and temperature of product in the wide range of the adsorption stage duration was considered. The dynamics of the gas mixture components adsorption process, the behavior of sorption and thermal waves in the adsorbent bed were studied, as well as the influence of PSA unit performance on hydrogen purity.

Ключевые слова: короткоцикловая безнагревная адсорбция, 4-х адсорберная установка, многокомпонентная газовая смесь, концентрирование водорода, возмущающие воздействия, управляющие переменные, динамика, математическая модель, вычислительный эксперимент

Keywords: pressure swing adsorption, 4-bed adsorption unit, multicomponent gas mixture, hydrogen concentration, disturbances, control variables, dynamics, mathematical model, computational experiment.

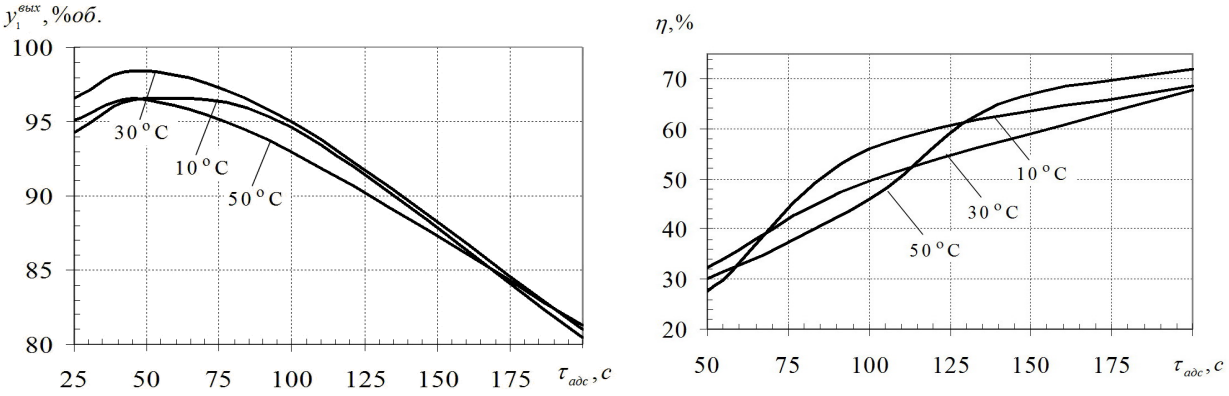
Анализ процесса получения водорода методом короткоцикловой безнагревной адсорбции (КБА) при разделении трехкомпонентной газовой смеси (содержит продукционный газ 1- H_2 и попутные вещества 2- CO_2, 3- CO) как объекта исследования позволил определить [1,2]: входные переменные (состав газовой смеси на входе в установку КБА $y^{вх} = (y_1^{вх}, y_2^{вх}, y_3^{вх})$, температуру $T_g^{вх}$ и давление $P^{вх}$ исходной газовой смеси); - выходные переменные (давление на стадии адсорбции $P^{адс}$, состав $y^{вых} = (y_1^{вых}, y_2^{вых}, y_3^{вых})$, расход $G^{вых}$ и температуру $T_g^{вых}$ газовой смеси на выходе из установки КБА, производительность установки $G_{H_2}^{вых} = y_1^{вых} \cdot G^{вых}$); управляющие воздействия (расход $G^{вх}$ исходной газовой смеси, длительность цикла $\tau_{адс}$ стадии адсорбции).

С целью численного исследования влияния входных переменных и управляющих воздействий на выходные переменные процесса адсорбционного разделения газовой смеси и получения водорода проводились вычислительные эксперименты. Варьируемые переменные и диапазоны их изменения представлены в таблице.

Таблица. Исходные данные для численного моделирования

Наименование параметра	Диапазон изменения
Длительность стадии адсорбции, $\tau_{адс}$, с	25 – 200
Отношение длительности стадии десорбции к длительности стадии адсорбции, $\tau_{дес} / \tau_{адс}$	0,2 – 0,8
Концентрация $y_2^{вх}$ двуокиси углерода в исходной смеси (концентрация $y_3^{вх}$ оксида углерода остается неизменной и равной 1% (об.)), %(об.)	25 – 45
Температура исходной смеси, $T_g^{вх}$, ^0C	10 – 50
Давление исходной газовой смеси $P^{вх}$, МПа	0,5 – 3

На рис. 1 представлены зависимости концентрации продукционного водорода $y_1^{вых}$ и степени η его извлечения от длительности цикла стадии адсорбции $\tau_{адс}$ при $y_2^{вх}$=34%(об.) и $T_g^{вх}$=10, 30, 50^{0}C , соответственно.



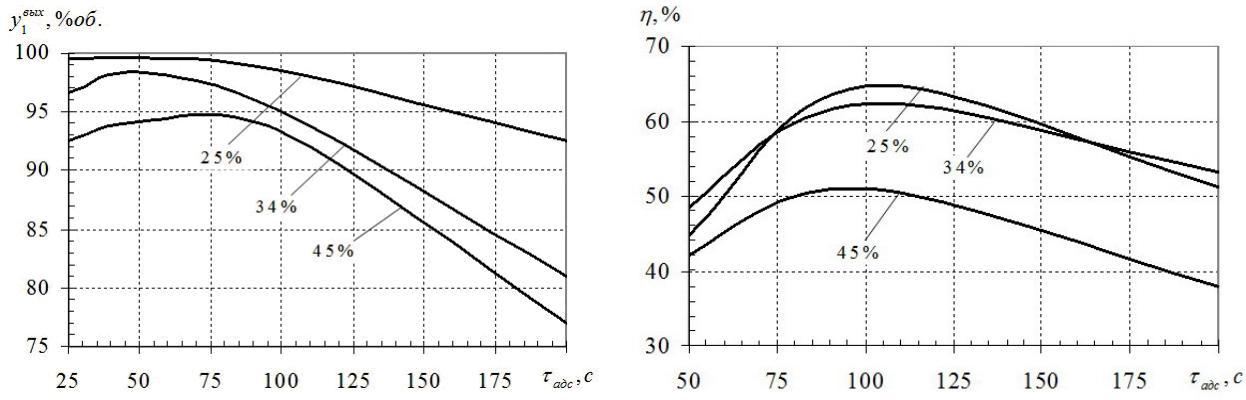
а) б)

Рис. 1. Зависимость концентрации $y_1^{вых}$ и степени извлечения продукционного водорода η от длительности стадии адсорбции $\tau_{адс}$: а) $\tau_{дес} / \tau_{адс} = 0{,}5$; б) $\tau_{дес} / \tau_{адс} = 0{,}2$

Как следует из графиков (рис. 1а), имеет место экстремальная зависимость $y_1^{вых}$ от $\tau_{адс}$. Максимальное значение $y_1^{вых}$=98,4%(об.) достигается при температуре $T_g^{вх}$=30^{0}C.

На отрезке времени до $\tau_{адс}$≈ 125с (рис. 1б) максимальная степень извлечения водорода η=60% достигается при $T_g^{вх}$=10^{0}C, а при $\tau_{адс}$>125с и $T_g^{вх}$=50^{0}C - более 70%.

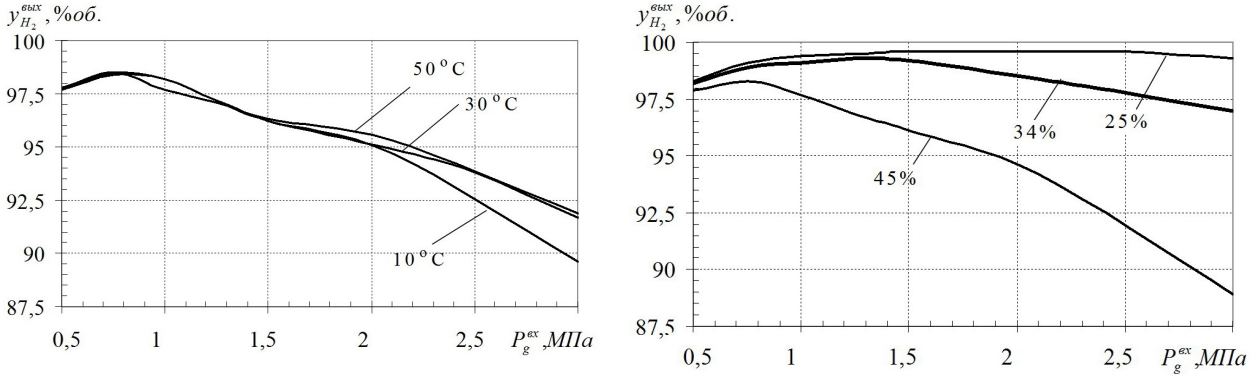
Анализ графиков на рис. 2а показывает, что с увеличением $y_2^{вх}$ происходит уменьшение концентрации $y_1^{вых}$. Так при $y_2^{вх}$=34%(об.) на отрезке времени $50c \le \tau_{адс} > 125c$ концентрация продукционного водорода $y_1^{вых}$ уменьшается с 98% (об.) до 80% (об.). Максимальное по графику значение $y_1^{вых}$ ≈99,7%(об.) достигается при $\tau_{адс}$ ≈50 с и $y_2^{вх}$ = 25%(об.).



а) б)

Рис. 2. Зависимости $y_1^{вых}$ и η от $\tau_{адс}$ при отношении $\tau_{дес}/\tau_{адс} = 0{,}5$, температуре исходной смеси $T_g^{вх}$=30^{0}C и $y_2^{вх}$=25, 34 и 45% (об.), соответственно

Как видно из графиков на рисунке 2б, зависимость степени извлечения водорода η от продолжительности стадии адсорбции также носит экстремальный характер. Максимальная степень извлечения η по графику достигается при $\tau_{адс}$≈100с и $y_2^{вх}$=25%(об). Увеличение концентрации $y_2^{вх}$ приводит к уменьшению η , при этом также возрастет чувствительность η к изменению $y_2^{вх}$.

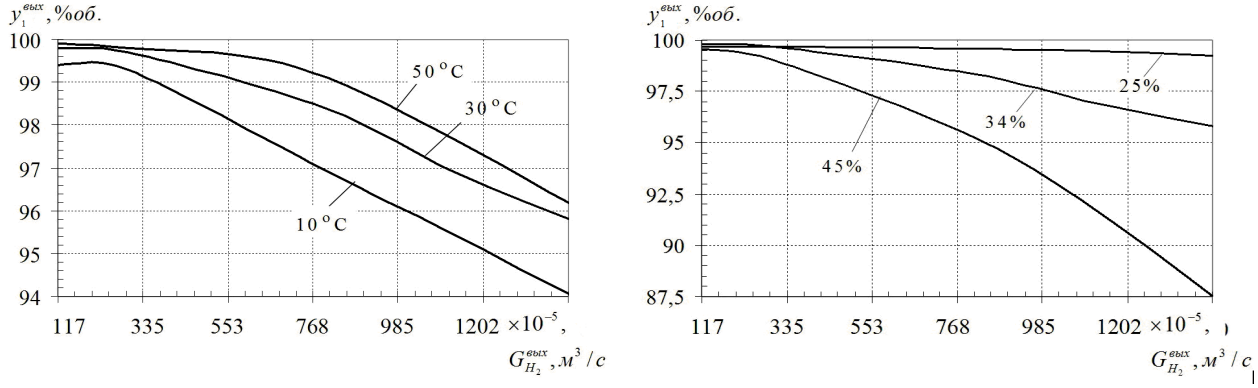


а) б)

Рис. 3. Зависимость $y_1^{вых}$ от $P^{вх}$ при $\tau_{адс}$= 50 с и отношении $\tau_{дес}/\tau_{адс}$= 0,5: а) $y_2^{вх}$ =34%(об.), $T_g^{вх}$=10, 30, 50^{0}C, соответственно; б) $T_g^{вх}$=30^{0}C , $y_2^{вх}$= 25, 34, 45%(об.), соответственно

Из анализа графиков на рисунке 3а следует, что зависимость $y_1^{вых}$ от давления газовой смеси $P^{вх}$ на входе установки КБА носит экстремальный характер на начальном участке давлений от 0,5 до 1,0 МПа и монотонно убывающий характер при $P^{вх}$>1,0 МПа и всех значениях $T_g^{вх}$=10, 30, 50^{0}C.

Как следует из графиков на рисунке 3б, максимальное значение $y_1^{вых}$=99,6%(об.) наблюдается при $P^{вх}$=0,75 МПа и $y_2^{вх}$=45%(об.). С уменьшением $y_2^{вх}$ максимум смещается вправо, а при $y_2^{вх}$=25%(об.) график практически приобретает вид кривой с насыщением.



а) б)

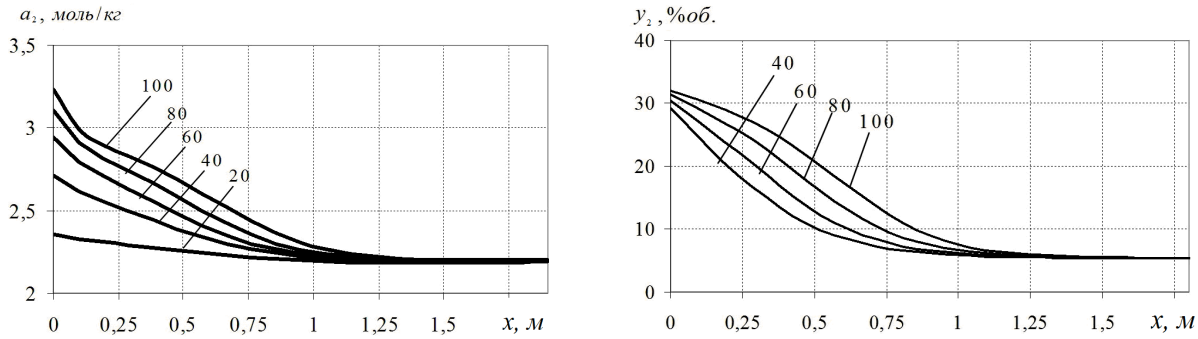
Рис. 4. Зависимость $y_1^{вых}$ и $T_g^{вх}$ от производительности $G_{H_2}^{вых}$ установки КБА при $\tau_{адс}$ = 100 с и отношении $\tau_{дес}/\tau_{адс}$ = 0,5: а) $y_2^{вх}$=34%(об.), $T_g^{вх}$=10, 30,50 ^{0}C, соответственно; б) $T_g^{вх}$=30^{0}C, $y_2^{вх}$=25%, 34% и 45% (об.), соответственно

Из анализа графиков на рис. 4 следует, что $y_1^{вых}$ обратно пропорциональна производительности при всех рассматриваемых температурах и концентрациях CO_2 в исходной газовой смеси. Повышение производительности $G_{H_2}^{вых}$ установки КБА приводит к тому, что на стадии регенерации десорбция адсорбата производится недостаточно полно, что приводит к снижению поглотительной способности адсорбента и чистоты получаемого продукта.

На графиках (рис. 4а) можно выделить 2 участка: 1) при малых значениях производительности $G_{H_2}^{вых}$ чистота продукта $y_1^{вых}$ практически постоянна и равна ее предельному значению для данных условий, кривые стремятся к насыщению; 2) для значений производительности $G_{H_2}^{вых}$ выше некоторого порога $y_1^{вых}$ начинает заметно уменьшаться (зависимость практически линейна), причем величина этого порога зависит от $T_g^{вх}$. При $T_g^{вх}$=50◦С производительность $G_{H_2}^{вых}$ составляет $550\cdot10^{-5}$ м^3/с, при $T_g^{вх}$=10, 30ºС – $250\cdot10^{-5}$ м^3/с.

Наибольшая чувствительность $y_1^{вых}$ к изменению производительности установки КБА $G_{H_2}^{вых}$ наблюдается при $y_2^{вх}$=45%(об.), а при $y_2^{вх}$=25%(об.) уменьшение $y_1^{вых}$ незначительно (рис. 4б). Это означает, что повышение $T_g^{вх}$ в некоторых пределах или уменьшение $y_2^{вх}$ до 25%(об.) позволяет существенно повысить производительность установки $G_{H_2}^{вых}$ практически без снижения $y_1^{вых}$.

На рисунке 5 представлены графики изменения величины сорбции a_2 и концентрации CO_2 в газовой фазе по высоте слоя адсорбента на стадии адсорбции при температуре исходной смеси $T_g^{вх}$=30^{0}С; $y_2^{вх}$=34 %(об.), отношении $\tau_{дес}/\tau_{адс}$= 0,5 и времени цикла адсорбции $\tau_{адс}$ = 20, 40, 60, 80,100 с, соответственно.



а) б)

Рис. 5. Изменение величины сорбции a_2 и концентрации CO_2 в газовой фазе (y_2) по высоте слоя адсорбента

В начальный момент времени интенсивное поглощение примесей CO и CO_2 происходит в лобовом слое адсорбента, и далее начинается режим параллельного переноса сорбционного и теплового фронтов вдоль слоя адсорбента.

В ходе адсорбции в лобовом слое адсорбента происходит интенсивное поглощение адсорбтива (H_2, CO_2, CO) и выделение тепла, что приводит к росту температуры адсорбента до 328-348 K. Температурные кривые (рис. 6а) имеют максимум, находящийся на некотором расстоянии от начала слоя адсорбента, что объясняется переносом теплоты сорбции за счет конвективного потока в направлении движения газа. Тепловой фронт движется вместе с сорбционным (на рисунке не показаны). Тепловые потери в данном режиме работы минимальны, что способствует проведению десорбции адсорбата на стадии регенерации без дополнительного нагрева адсорбента.

Кривые скорости газа в адсорбере коррелируют с графиками изменения концентрации диоксида углерода, как основной примеси, и распределением температуры адсорбента по высоте слоя. Изменение состава и температуры газовой фазы в адсорбере приводит к изменению таких параметров как динамическая вязкость, плотность и молярная масса газовой смеси, которые определяют характер гидродинамики потока, выражающийся, в том числе, и в изменении скорости газа.

Численные исследования процесса получения водорода методом короткоцикловой безнагревной адсорбции при разделении многокомпонентной газовой смеси позволили определить наиболее опасные возмущающие (состав $y^{вх} = (y_1^{вх}, y_2^{вх}, y_3^{вх})$, температуру $T_g^{вх}$ и давление $P^{вх}$ газовой смеси на входе установки КБА) и эффективные управляющие (расход $G^{вх}$ газовой смеси, длительность цикла стадии адсорбции $\tau_{адс}$) воздействия, необходимые для постановки задач динамической оптимизации и управления процессом адсорбционного получения водорода.

Работа выполнена в рамках проектной части Государственного задания № 10.3533.2017/ПЧ

ЛИТЕРАТУРА

1. *Васильев, А.С.* Математическое моделирование процесса получения водорода методом адсорбционного разделения газовой смеси //Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2014. №3(53). С.37.

2. *Ишин А.А.* Имитационное исследование процесса адсорбционного получения водорода // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследования: сб. мат. XV Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2015. С. 157.

УДК 66.063.61

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ГРАНУЛЯЦИОННЫЕ БАШНИ С ЗАМКНУТЫМ ЦИКЛОМ ПО ХЛАДОАГЕНТУ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОТЫ ГРАНУЛИРОВАНИЯ И СХЕМЫ ИХ РАСЧЁТА

PROPOSED GRANULATION TOWERS WITH THE CLOSED REFRIGERANT CIRCULATION CYCLE AND USING THE HEAT OF GRANULATION AND THEIR CALCULATION SCHEMES

Александр Леонидович Таран, Юлия Александровна Таран, Юлия Ивановна Смирнова
Alexandr L. Taran, Yulia A. Taran, Yuliya I. Smirnova

Институт тонких химических технологий, Московский технологический университет (МТУ ИТХТ), Россия, Москва
Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University, Russia, Moscow
(e-mail: capsula2@mail.ru, taran_y@mirea.ru)

Аннотация: В предложенной грануляционной башне с замкнутым по хладоагенту циклом, использованием низкопотенциальной теплоты гранулирования дана схема расчета процесса приллирования крупнотоннажных продуктов. Кратко рассмотрены основные стадии технологии (узлы гранулирования, гидродутья, утилизации теплоты гранулирования) и их связь друг с другом.

Abstract: In the proposed granulation tower with the closed refrigerant circulation cycle and using the low potential heat of granulation the calculation scheme of large-tonnage products prilling process is given. The main technologies are briefly reviewed (nodes of granulation, hydro-blowing, utilization of granulation heat) and their connection with each other.

Ключевые слова: приллирование, энергосбережение, крупнотоннажные продукты, минеральные азотсодержащие удобрения.

Keywords: prilling process, energy-saving, large-tonnage products, nitrogen-containing mineral fertilizers.

Организация и эксплуатация энергосберегающих технологий требуют детального изучения и инженерного расчета каждой стадии процесса [1,2,3]. Научно-практическое значение этой работы для создания новых и реконструкции действующих производств не вызывает сомнения. ресурсо-энергосберегающих технологий Схема приллирования с замкнутым по охлаждающему воздуху циклом и использованием низкопотенциальной теплоты гранулирования за счёт является (рис.1) [1,2], для производства крупнотоннажных продуктов (азотсодержащих удобрений, компонентов промышленных ВВ, щелочей, серы, шлаков и др.) [1-3,4-7].

Процесс проводят в грануляционных башнях с рабочей высотой 20–82,5 м круглого диаметра 8–27 м или прямоугольного сечения 8х11 м производительностью 30-60 т/ч с в восходящем потоке воздуха, движущегося со скоростью до 0,5-2 м/с [1-3,6,7].

В гидродутьевых полостях (1), форсунками (5) диспергируют водный раствор гранулируемого продукта прямотоком потоку гранулируемых в башне (2) капель расплава [1,3]. Выбор того или иного распылительного устройства (центробежного, статического, вибростатического, форсуночного [1,2]) определяется требуемым размером основной и самой крупной фракции продукта, поскольку высоту грануляционной башни и режим её работы оценивают по кристаллизации наиболее крупной фракции.

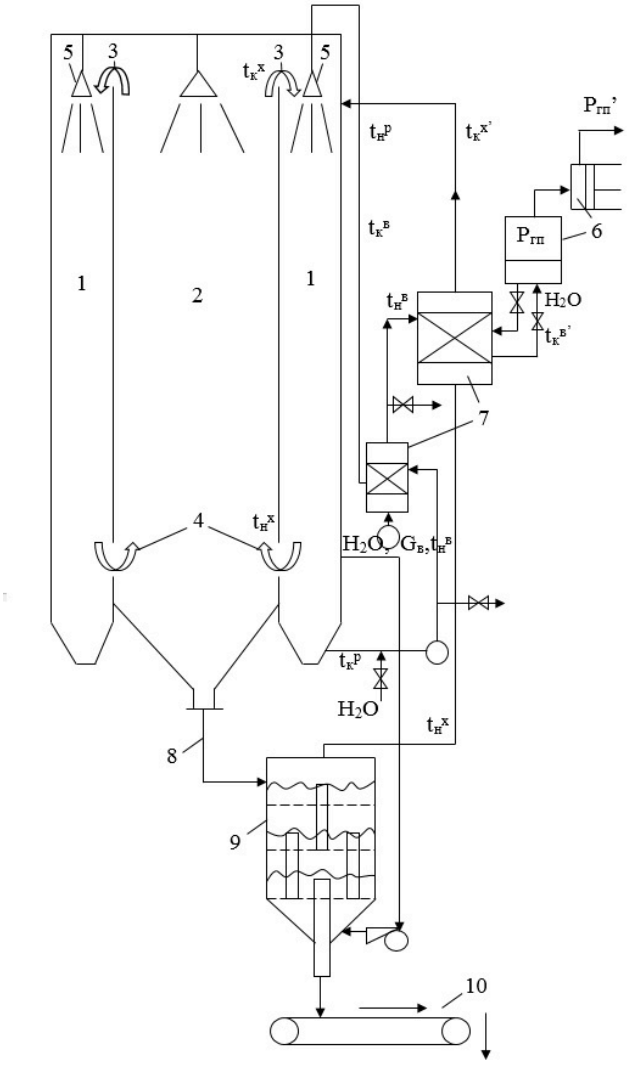


Рис.1. Схема грануляционной башни с замкнутым по хладоагенту циклом и использованием теплоты гранулирования.

Кристаллизации расплава предшествует начальное переохлаждение, зависящее от скорости зарождения центров кристаллизации в лобовой части гранулы. Далее начинается рост кристаллической корочки от поверхности к центру гранулы, контролируемый отводом тепла превращения от межфазной границы и линейной скоростью её роста. У некоторых веществ, например, NH_4NO_3, полиморфные превращения в кристаллической фазе также контролируются отводом тепла и кинетикой. Из-за наличия перед фронтом кристаллизации переохлаждённого расплава могут возникать новые центры превращения и меняться устойчивость фазового фронта, а разность плотностей расплава и кристаллической фазы в центральной области капли увеличивает сосредоточенную усадочную полость. После структурообразования следует охлаждение гранул. При охлаждении у гранул крупных фракций завершается кристаллизация, а у гранул мелкой фракции проходят полиморфные превращения. Выходя из нижней части башни горячие гранулы с температурой $0{,}85T_{кр}$ (8) доохлаждаются в псевдоожиженном слое (9) до температуры затаривания (50^0C) и поступают на склад [1,3,6,7].

Исследование процессов гранулообразования кристаллизацией капель расплавов, позволяет рассчитать узел гранулирования, количество теплоты гранулирования и ее параметры (положений границ кристаллизации, усадочной полости, полиморфных превращений в расплаве и кристаллической фазе капель расплавов, кристаллизующихся при падении в башне) для дальнейшей организации энергосбережения [1].

Наличие окон для засасывания (3) и нагнетания (4) обеспечивает циркуляция воздуха с требуемыми температурами $t_н^х$ и $t_к^х$. Поток раствора охлаждает засасываемый воздух, параллельно очищая его от пылевидных и аэрозольных частиц продукта, и компримируя его за счёт спутного течения гидродутьём, для создания которого необходимо иметь выше перечисленные параметры, теплофизические данные водных растворов и кристаллической фазы, а также иметь в том числе достоверное соотношение между массовым расходом промывочного раствора $G_р$ и гранулируемого в башне расплава $G_ж$. Требуемое соотношение выражается из условия гидростатического равновесия $2^х$ фазных систем в грануляционной башне и в гидродутьевой полости в зависимости от размеров гранул ($d_р/d_ж$), площадей сечений башни и полости ($S_б/S_к$) и соотношения скоростей воздуха и витания капель расплава ($\omega_с/\omega_в$) [1]:

$$\frac{G_р}{G_ж} = \frac{\left(\frac{d_р}{d_ж}\right)^2 + \frac{\omega_с^ж}{\omega_в^ж} \times \frac{S_б}{S_к}}{1 - \frac{\omega_с^ж}{\omega_в^ж}} \cdot \frac{h_б + \Delta h_б}{h_к}, \quad (1)$$

где $h_б$, $h_к$ – высота рабочих зон грануляционной башни и гидродутьевых полостей.

Экспериментально установлено, что необходимые дутьевые характеристики ($\omega_с \leq 0{,}5$ м/с) достигаются при диспергировании раствора с высоты 6 м [1,2,5,6].

Необходимый, для функционирования гидродутья, напор воздуха (от 50 до 300 Н/м^2) обеспечивается и регулируется плотностью орошения промывочной жидкостью гидродутьевых полостей в пределах от 3 до 40 т·ч/м^2 [5,6]:

$$q = \frac{8}{3} \Delta P \frac{\rho_ж}{\rho_с} \left[\int_0^\infty \int_0^H \frac{\xi \cdot w_в^{p^2} \cdot f(r_р)}{r_р \cdot \omega^р} dr_р \, dh \right]^{-1}. \quad (2)$$

где: q – среднее значение плотности орошения промывочной жидкости в зоне очистки и охлаждения воздуха, ΔP – напор воздуха, $\rho_ж$, $\rho_в$ – плотности воздуха и промывочной жидкости соответственно, H, h – протяженность зоны очистки, охлаждения, компримирования воздуха и ее текущий размер соответственно, $r_р$ – радиус капель промывочного раствора, м; $f(r_р)$ – плотность распределения капель по радиусу, $w_в^{p^2}$, $\omega^р$ – скорости обтекания витания капель и встречного потока воздуха в компримирующей башне соответственно, ξ – коэффициент лобового сопротивления капель промывочной жидкости.

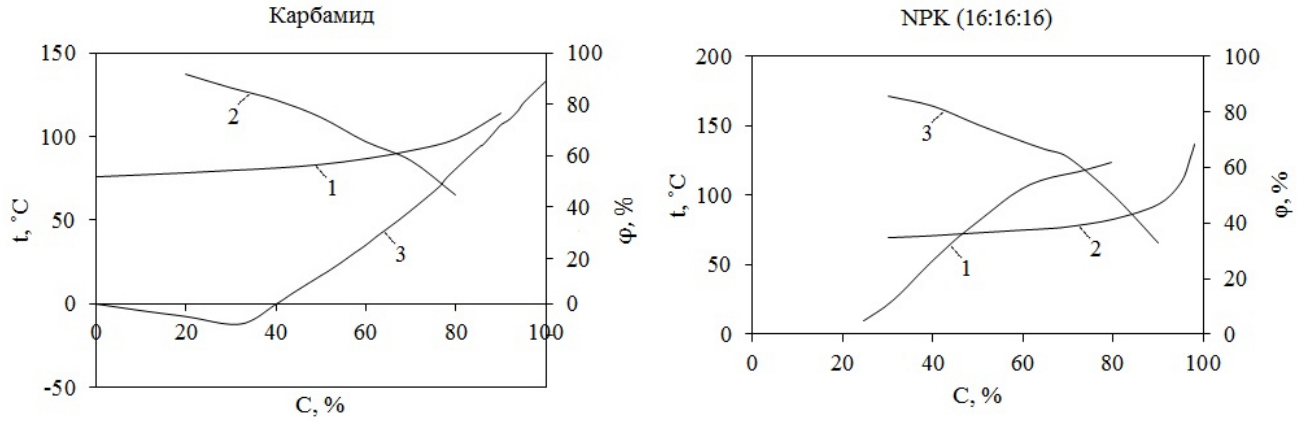


Рис.2. Зависимости температуры от концентрации водного раствора, при которых упругость паров воды над раствором равна упругости паров воды над гранулируемым расплавом (кривая 1), рассчитанная по этим данным относительная влажность воздуха грануляционной башне (2), температура ликвидуса системы вещество - H_2O (3).

При снижении плотности орошения промывочной жидкости менее 3 т·ч/м^2 не создается необходимый напор воздуха для преодоления сопротивления газоходов и противодействия потоку падающих гранул, с увеличением плотности орошения свыше 40 т·ч/м^2 наблюдается слияние капель жидкости, которое приводит к фактическому снижению напора воздуха [5].

В отличие от работы башни с разомкнутым по хладоагенту циклом в башне с замкнутым циклом нужно контролировать возможность начала увлажнения гранулированного продукта (рис.2). Технологические зависимости у других продуктов (аммиачная селитра, KNO_3, KOH, NaOH) полученные в [1] также показывают возможность успешной реализации технологии приллирования расплавов в гранбашнях с замкнутым циклом.

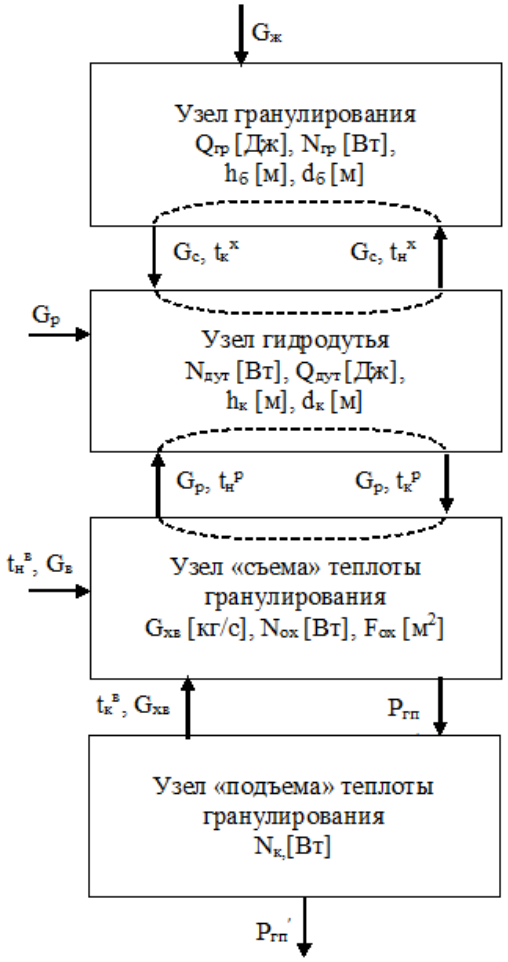


Рис.3. Принципиальная схема гранулирования с замкнутым по хладоагенту циклом и использованием теплоты гранулирования.

Из гидродутьевых полостей промывочный раствор с температурой $t_к^р$ поступает в теплообменник (7), где охлаждающей $t_н^в$ водой с него «снимается» теплота гранулирования расплава, и с температурой $t_н^р$ раствор направляется обратно в полости для диспергирования. Нагретая вода с температурой $t_к^в$ и частично влажный пар, принявшие на себя теплоту гранулирования поступают в «тепловой насос» (6), где водяной пар с давлением $P_{гп}$ компрессором «теплового насоса» сжимается до давления $P_{гп}'$, требуемого потребителем [1].

Вышеизложенное можно представить упрощенной схемой (рис.3) и алгоритмом ее расчета [1]: $Q_{гр}$ (теплота гранулирования) → G_c (расход хладоагента) → $G_ж$ (расход расплава) → $G_р$ (расход промывочного раствора) → $h_б$,$h_к$,$d_б$,$d_к$ (размеры башни и гидродутьевой полости) → $N_{гр}$ (затраты энергии на диспергирование расплава) → $N_{дут}$ (затраты энергии на гидродутье) → $Q_{дут}$ (теплота гидродутья) → $F_{ох}$ (поверхность теплообменника для охлаждения промывочного раствора водой) → $G_{хв}$ (расход охлаждающей воды) → $N_{ох}$ (мощность, затрачиваемая на «снятие» теплоты гранулирования через теплообменник) →$P_{гп}$ (давление водяного пара, поступающего в компрессор теплового насоса) → $N_к$ (мощность, затрачиваемая в компрессоре теплового насоса на сжатие водяного пара) → $P_{гп}'$ (давление водяного пара, требуемое потребителям).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Таран Ю.А.* Разработка и анализ процессов гранулирования расплавов с использованием экологически безопасных энергосберегающих схем. Дис. … канд. техн. наук М.: МИТХТ, 2011. 245 с.

2. *Таран А.Л.* Исследование процесса кристаллизации методом электроаналогии. Дис. … канд. техн. наук. М.: МИТХТ, 1976. 287 с.

3. *Таран А.Л., Долгалёв Е.В., Таран Ю.А.* Математическое описание процесса гранулирование известково-аммиачной селитры в башнях // Химическая технология. 2007. Т. 8. №8. С. 376.

4. *Иванов М.Е., Малкин Б.И.* Численное решение задачи определения механики и теплообмена при башенном гранулировании // Сб. Производство азотных удобрений, Труды ГИАП, М.: ГИАП, 1985. С. 99.

5. *Иванов М.Е., Беркович А.Ш., Иванов А.Б. и др.* А. с. 1137631 РФ // Б. И. 1990. №43.

6. *Иванов М.Е.* Теоретические основы аммиачной селитры и разработки крупнотоннажных агрегатов её производства. Автореферат дис. … докт. техн. наук. – М., ГИАП. 1988. 38 с.

7. *Таран Ю.А., Захаров М.К.* Энергосберегающие схемы в технологиях производства продуктов, гранулированных кристаллизацией капель расплавов // Вестник МИТХТ. 2011. Т. 6. № 1. С.1.

УДК 664.723.047

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ЗЕРНА ПО ТЕМПЕРАТУРЕ И ВЛАЖНОСТИ ОТРАБОТАВШЕГО СУШИЛЬНОГО АГЕНТА
TEMPERATURE CALCULATION OF GRAIN ON THE EXHAUST TEMPERATURE AND HUMIDITY OF THE DRYING AGENT

Владимир Федорович Сорочинский, Алексей Львович Догадин
Vladimir F. Sorochinskiy, Alexey L. Dogadin

Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки (ФГБНУ «ВНИИЗ»), Россия, Москва
All-Russian Scientific Research Institute of grain and its products (FGBNU «VNIIZ»), Russia, Moscow
(e-mail: vlafest@bk.ru, dogadin1@inbox.ru)

Аннотация: Приведены результаты исследований процесса сушки зерна с определением температуры и относительной влажности сушильного агента, выходящего из зерносушилки. Установлена взаимосвязь этих параметров, получено уравнение для определения температуры нагрева зерна при его сушке.

Abstract: Results of research of grain drying process with determination of temperature and relative humidity of the drying agent coming out of the dryer. The interrelation between these parameters, equation for determining the temperature of grain when it is drying is obtained.

Ключевые слова: сушка, температура, влажность, , зерно, фильтрация.
Keywords: drying, temperature, humidity, grain, filtering.

В соответствии с Инструкцией по сушке продовольственного, кормового зерна, маслосемян и эксплуатации зерносушилок №9-3-82 основными контролируемыми параметрами в процессе сушки являются температура сушильного агента, влажность и температура нагрева зерна. Вместе с тем, последние два параметра контролировать в процессе сушки затруднительно, а в ряде случаев невозможно. Влажность и температуру зерна определяют обычно в начале и в конце процесса сушки, а температуру нагрева зерна для зерносушилок различных типов – обычно в зонах его максимального нагрева. Для рециркуляционных зерносушилок ее измеряют в тепломассообменниках сушилок, при этом в шахтах сушилок дистанционно, как правило, не контролируют, да и отбирать пробы зерна вручную из этих зон затруднительно.

Это приводит к неопределенности показаний датчиков приборов, термочувствительная часть которых будучи размещена в слое зерна продувается либо сушильным агентом, либо охлаждающим воздухом, которые имеют температуру отличную от температуры зерна. Что касается влажности зерна, то ее измерение возможно только в отобранной пробе, что существенно усложняет контроль процесса сушки, и, в лучшем случае, делает его только периодическим.

Одним из традиционных способов измерения температуры и влажности зерна в процессе сушки является оборудование зерносушилки устройствами для отбора проб по высоте шахты с применением влагомеров для измерения температуры и влажности зерна в отобранной пробе, например, ПВЗ-20Д, «Фауна – МДР» и других [1]. Вместе с тем, эти устройства имеют достаточно сложную конструкцию и обуславливают некоторую неопределенность в показаниях прибора, так как эти показания будут зависеть от места установки устройства отбора зерна, в том числе по толщине и ширине сушильной шахты, которые, и в общем виде, могут не характеризовать реальное состояние высушиваемого зерна.

Альтернативой точечного отбора и измерения проб зерна является определение температуры и влажности зерна в процессе сушки по параметрам отработавшего сушильного

агента: температуры и относительной влажности воздуха, для определения которых в настоящее время выпускаются малогабаритные и надежные датчики. Этот прием, ввиду его простоты используется в ряде зарубежных зерносушилок для контроля и автоматизации процесса сушки.

Контроль параметров отработавшего сушильного агента имеет еще одно важное значение, так как может свидетельствовать об эффективности сушки зерна. В настоящее время потери теплоты с отработавшим сушильным агентом в шахтных зерносушилках достигают 15 - 20%. Увеличение влагосодержания отработавшего сушильного агента будет свидетельствовать о повышении эффективности процесса сушки [2].

Кроме того, прежде всего для таких масличных культур как подсолнечник, рапс превышение температуры отработавшего сушильного агента будет свидетельствовать о возможности загорания сушилки и необходимости регулировки процесса сушки для предотвращения опасной ситуации. Актуальным является также контроль температуры нагрева зерна в процессе сушки по параметрам отработавшего сушильного агента для сушки кукурузы и зернобобовых культур, для предотвращения трещинообразования и снижения качества зерна.

Одно из первых устройств для контроля процесса сушки по параметрам отработавшего сушильного агента было предложено работниками Рузаевской хлебной базы №32 ПО «Мордовхлебопродукт» для контроля нагрева зерна и повышения пожаробезопасности прямоточных и рециркуляционных зерносушилок. Устройство состоит из первичных датчиков, установленных на выходе из отводящих коробов зерносушилки, вторичного прибора с цифровой индикацией и датчика температуры, расположенного на пульте управления.

В качестве термочувствительных элементов датчиков контроля температуры отработавшего сушильного агента использовались полупроводниковые термометры (диоды) или медные термометры сопротивления типа ТСМ.

Полупроводниковые термометры закреплены в каркасе между двух пластин прямоугольного сечения и размещены на стойках блока установки датчиков, представляющего собой полую трубу, закрепленную на стенке сушильной секции в зоне измерения температур, с проложенными внутри нее соединительными проводами, идущим к вторичному прибору. Термометры сопротивления закреплены на блоке установки датчиков аналогично полупроводниковым приборам с размещением чувствительных элементов датчиков в отводящих коробах.

Каждый датчик имеет свой номер и индикацию о подключении к системе контроля управления зерносушилкой. Для контроля за температурой отработавшего сушильного агента установлен датчик контроля температурного режима.

Устройство контроля температуры отработавшего сушильного агента сблокировано с механизмами и приборами сушилки. Превышение заданных значений температуры отработавшего сушильного агента обуславливает подачу звукового сигнала и при непринятии мер по устранению причин превышения температуры отработавшего сушильного агента, отключение топки сушилки с одновременной остановкой транспортных механизмов подачи сырого и выпуска сухого зерна.

Производственная проверка этого устройства проведена на трех зерносушилках ПО «Мордовхлебопродукт»: реконструированных на рециркуляцию ДСП – 32сн и ВТИ – 15 на Рузаевской хлебной базе №32 и шахтной прямоточной ДСП -24сн на Саранском элеваторе.

На реконструированной зерносушилке ДСП – 32сн датчики в качестве микросхем установлены на выходе из 27 и 31 ряда коробов 1 сушильной зоны и 19 ряда коробов второй зоны сушки рециркуляционной шахты, по 8 датчиков в каждом ряду. Испытания проведены на зерна ржи начальной влажностью 17,4 -18,7%.

На зерносушилке ВТИ – 15 датчики в качестве термометров сопротивления в количестве 14 штук установлены на выходе из 5 и 12 ряда коробов сушильной шахте и на

выходе из 16 ряда коробов сушильно-охладительной шахты. Испытания проведены на зерносмеси пшеницы и ржи начальной влажностью 19,9 -20,2%.

На прямоточной зерносушилке ДСП - 24сн датчики в виде полупроводниковых диодов установлены в 14 и 23 рядах коробов. Испытания проведены на зерносмеси пшеницы и ржи начальной влажностью 17,8 - 21,9%.

Температура сушильного агента в реконструированных зерносушилках изменялась от 141 до 178 ^{0}C, средняя температура зерна по коробам – от 40,8 до 54,1^{0}C, а в прямоточной сушилке соответственно от 117 до 128^{0}C, и от 46,0 до 57,9^{0}C.

По результатам испытаний этих зерносушилок установлено, что значения температур отработавшего сушильного агента, измеренные установленными датчиками и контрольным термометром близки между собой, среднеквадратичное отклонение по всем точкам измерения составило 1,4 ^{0}C, т.е. устройство контроля температуры отработавшего сушильного агента правильно показывает измеренные значения температуры. Установлено также, что при средней скорости фильтрации сушильного агента на выходе из коробов 4,5 - 7,0 м/с температура зерна в сушилке отличается от температуры отработавшего сушильного агента не более чем на 2 - 3^{0}C. При скорости фильтрации сушильного агента свыше 7,0 до 8,5 м/с температура отработавшего сушильного агента превышает температуру нагрева зерна в этих зерносушилках до 6,5 – 9,5 ^{0}C, что свидетельствует о нерациональном режиме сушки, т.к. температурный потенциал сушильного агента не успевает срабатываться в слое зерна.

Для расчета температуры нагрева зерна в сушилке по параметрам отработавшего сушильного агента получено уравнение регрессии:

$$\Theta = 4{,}5 + t^1_{\text{с.а}} - 0{,}04\,\varphi^1_{\text{с.а}},$$

где R2 = 0,89, $t^1_{\text{с.а}}$, ^{0}C и $\varphi^1_{\text{с.а}}$ % – температура и относительная влажность отработавшего сушильного агента;

Область определения уравнения: $t^1_{\text{с.а}} = 33 – 57^0$C; $\varphi^1_{\text{с.а}}$ =10 - 65%.

Таким образом установлено, что подобная система работоспособна и позволяет контролировать температуру нагрева зерна.

По результатам производственных испытаний подготовлено техническое задание на разработку системы контроля отработавшего сушильного агента для шахтных зерносушилок СКТ – 50.

С целью установления зависимости параметров отработавшего сушильного агента от режимных параметров процесса сушки, включая температуру и влажность зерна, проводятся дополнительные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Влагомер зерна поточный «Фауна – МДР». Руководство по эксплуатации РКГЯ 4.844.008 РЭ// ООО «Лепта». С.22.

2. *Сорочинский, В.Ф.* Эффективность сушки зерна на зерносушилках различных типов // Хлебопродукты. 2009. №4. С.39–41.

УДК 621.577:66.048:66.065

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ СМЕСЕЙ ПУТЕМ СОЧЕТАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕКТИФИКАЦИИ И ФРАКЦИОННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

USE OF HEAT PUMPS FOR THE SEPARATION OF MIXTURES BY A COMBINATION OF RECTIFICATION AND FRACTIONAL CRYSTALLIZATION PROCESSES

Геннадий Алексеевич Носов, Михаил Владимирович Михайлов, Бейбарыс Карамырзаулы Оразов
Gennadiy A. Nosov, Mikhail V. Mikhailov, Beibarys K. Orazov

Институт тонких химических технологий, Московский технологический университет (МТУ ИТХТ), Россия, Москва
Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University, Russia, Moscow
(e-mail: nosovga@mail.ru, mv_90@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрена возможность использования тепловых насосов для повышения энергетической эффективности разделения бинарных эвтектических смесей путем сочетания процессов ректификации и фракционной кристаллизации.

Abstract: The possibility of using heat pumps to increase the energy efficiency of separation of binary eutectic mixtures by combining rectification and fractional crystallization processes is considered.

Ключевые слова: ректификация, фракционная кристаллизация, сопряженные процессы, рекуперация тепла, тепловые насосы.

Keywords: rectification, fractional crystallization, associated processes, heat recovery, heat pumps.

Как известно [1-3], сочетание различных массообменных процессов позволяет существенно расширить диапазоны возможного разделения. В частности, при сочетании процессов ректификации и фракционной кристаллизации появляется возможность разделения эвтектикообразующих и азеотропобразующих смесей с получением довольно чистых продуктов. Однако использование сопряженных методов разделения обычно связанно со значительными энергетическими затратами, что обусловлено необходимостью нагрева и охлаждения потоков разделяемых смесей при их передаче с одной стадии разделения на другую. Частично снизить затраты тепловой энергии можно организуя рекуперативный теплообмен между подводимыми и отводимыми потоками разделяемых смесей, а также потоками рециркулирующих фракций. Известно, что эффективность рекуперативного теплообмена сильно зависит от разности температур потоков. Для изменения температурных потенциалов потоков можно использовать различные тепловые насосы, что часто позволяет существенно снизить энергетические затраты на проведение технологических процессов [4, 5].

В рамках данной работы нами были рассмотрены особенности разделения бинарных эвтектикообразующих смесей путем сочетания процессов фракционной кристаллизации и ректификации. При таком разделение, как и в случае большинства сопряженных массообменных процессов, имеет место целый ряд возможных вариантов разделения [1-4]. На рис. 1 изображен вариант, в котором разделение производится путем сочетания ректификации с двумя стадиями кристаллизации.

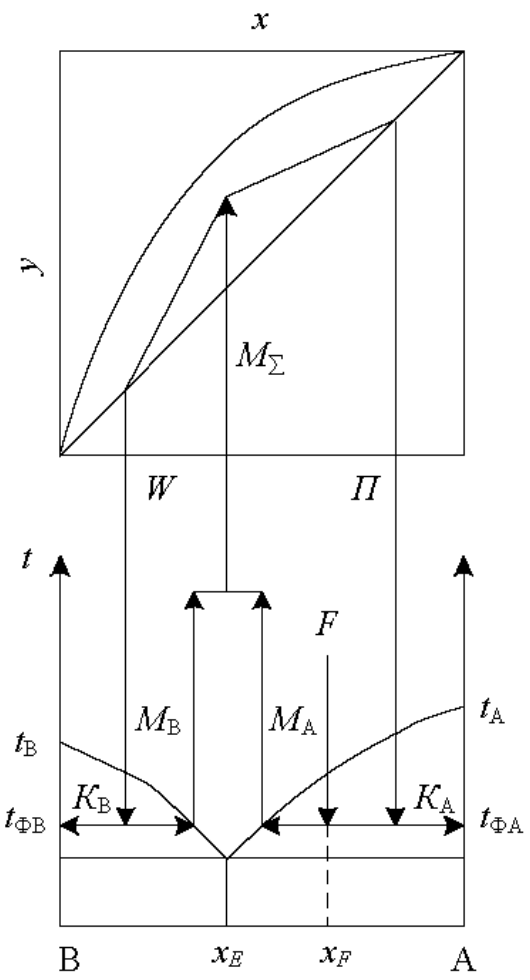


Рис. 1. Разделение путем сочетания ректификации с двумя стадиями кристаллизации

В этом варианте смесь F с концентрацией x_F легколетучего компонента A больше эвтектического x_E первоначально подается на стадию кристаллизации $Кр_A$, где она с потоком дистиллята $П$ охлаждается до температуры $t_{ФА}$. На стадии кристаллизации $Кр_A$ образуется кристаллическая фаза K_A (практически чистый компонент A) и маточник M_A. Кристаллическая фаза K_A отбирается в качестве одного из целевых продуктов, а маточник M_A вместе с маточником второй стадии кристаллизации $Кр_B$ возвращается на стадию ректификации РК. В результате ректификации объединённого потока маточника $M_\Sigma=M_A+M_B$ получается дистиллят $П$ и кубовый остаток W. Дистиллят $П$ подается на стадию кристаллизации $Кр_A$, а кубовый остаток на стадию кристаллизации $Кр_B$, где он охлаждается до температуры $t_{ФВ}$. При этом получается кристаллическая фаза K_B, которая представляет собой практически чистый компонент B, и маточник M_B. В данном варианте разделения ректификация используется в основном для перехода через эвтектическую точку.

Возможны и другие варианты сопряженного разделения. Так, при $x_F < x_E$ исходная смесь может первоначально подаваться на стадию кристаллизации $Кр_B$ или на стадию ректификации. Можно использовать так же варианты, в которых один из конечных продуктов получается на стадии кристаллизации, а другой на стадии ректификации виде дистиллята $П$ или кубового остатка W.

При проведении сопряженного разделения образующиеся пары дистиллята необходимо конденсировать. Полученный дистиллят $П$ и кубовый остаток W требуется охлаждать перед их подачей на стадии кристаллизации. В свою очередь, объединенный маточник M_Σ необходимо нагревать перед его подачей на стадию ректификации. Для снижения указанных энергетических затрат можно использовать тепловые насосы закрытого и открытого типа, с помощью которых тепло, выделяющиеся при конденсации паров дистиллята, можно использовать для нагрева и даже частичного испарения маточника M_Σ перед его подачей в ректификационную колонну.

На рис. 2 показана принципиальная схема установки для проведения, описанного выше процесса разделения бинарной смеси путем сочетания ректификации с двумя стадиями кристаллизации при использовании открытого теплового насоса. В данном варианте пары D, выходящие из ректификационной колонны РК, подаются в компрессор теплового насоса ТК, где они сжимаются от давления p_1 до давления p_2. Далее сжатые пары направляются в конденсатор К, где они конденсируются, нагревая тем самым объединенный маточник M_Σ до температуры $t_{М3}$. Образующийся конденсат проходит через дроссельный вентиль ДВ, в результате чего его давление снижается от p_2 до p_1.

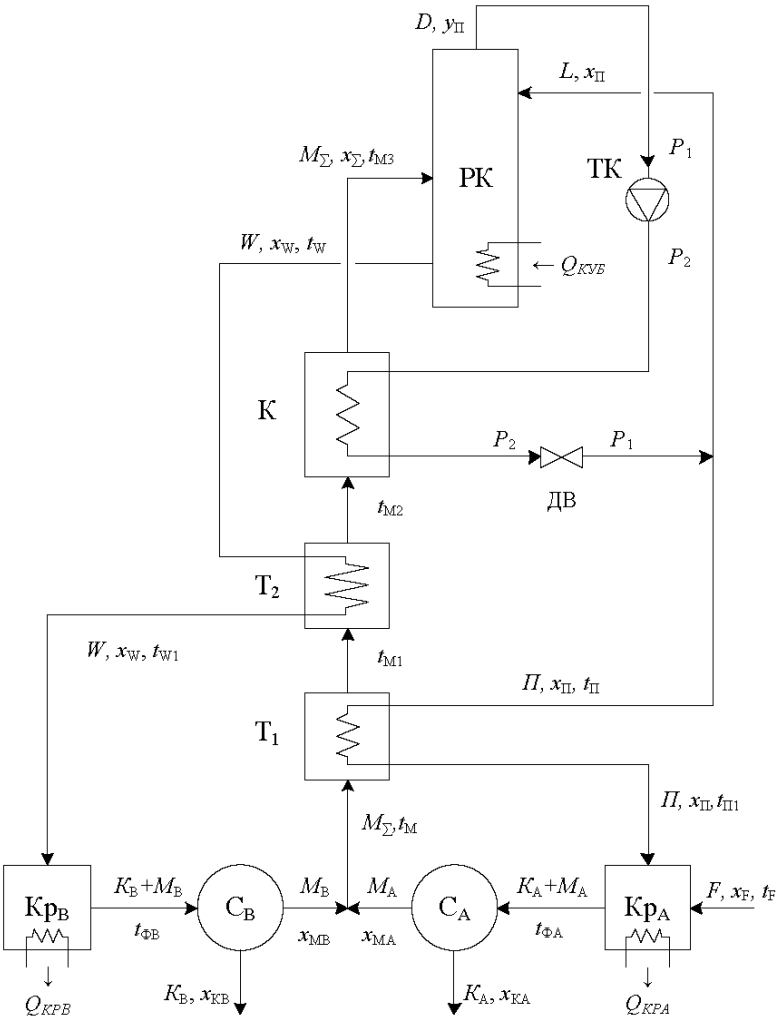


Рис. 2 Принципиальная схема разделения путем сочетания ректификации с двумя стадиями кристаллизации

Затем конденсат разделяется на дистиллят *П* и флегмовый поток *L*. Поток *L* возвращается в ректификационную колонну РК в качестве флегмы, а дистиллят *П* после его охлаждения в теплообменнике $Т_1$ от температуры $t_П$ до $t_{П1}$ за счет теплообмена с объединенным маточником $M_Σ$, поступающим со стадии кристаллизации $Кр_А$ и $Кр_В$, подается на стадию кристаллизации $Кр_А$. При этом маточник $M_Σ$ нагревается от температуры t_M до температуры t_{M1}. Отводимый из колонны кубовый остаток *W* направляется в теплообменник $Т_2$, где он охлаждается от температуры t_W до t_{W1} в результате теплообмена с потоком маточника $M_Σ$, который нагревается от t_{M1} до t_{M2}.

Необходимо отметить, что тепловые насосы открытого типа могут быть применены не только для нагрева рециркулирующих маточников перед их подачей в ректификационные колонны за счет теплоты отводимых потоков. Иногда тепловые насосы можно использовать для обогрева кубов ректификационных колонн, используя тепло, выделяющееся при конденсации сжатых паров дистиллятов [5, 6]. Это выгодно при незначительных различиях температур кипения разделяемых компонентов, когда требуются незначительные степени сжатия паров компрессором теплового насоса. При большой разности температур кипения разделяемых компонентов требуется значительные степени сжатия паров, что приводит к росту мощности привода компрессоров. В таком случае применение теплового насоса при проведении процесса ректификации может оказаться невыгодным.

Кроме того, для осуществления рекуперативного теплообмена между конденсирующимися парами дистиллята и нагреваемыми маточниками может быть использован, также тепловой насос закрытого типа [5, 7], в замкнутом контуре которого циркулирует промежуточный теплоноситель. При этом в конденсаторе установки при давлении p_1 происходит теплообмен между парами дистиллята *П* и испаряющимся теплоносителем $G_П$. Выходящие из конденсатора пары теплоносителя $G_П$ сжимаются компрессором до давления p_2, в результате чего повышается их температурный потенциал до нужной величины. Далее сжатые пары теплоносителя подаются в испаритель, где в результате их конденсации производится нагрев и частичное испарение маточников. После дросселированный теплоноситель снова подается в конденсатор.

Анализ возможностей снижения энергетических затрат, связанных с проведением рассматриваемых вариантов разделения, за счет организации рекуперативного теплообмена между рециркулирующими потоками и использование тепловых насосов был выполнен нами применительно к разделению ряда эвтектикообразующих смесей: нафталин-дифенил, бензол-п-ксилол, вода-пропионовая кислота и др. Этот анализ базировался на использовании уравнений материальных и тепловых балансов всех стадий разделения с учетом физико-химических и теплофизических свойств разделяемых смесей.

Проведенные расчеты показали, что затраты тепла на испарение смесей в кубе ректификационных колонн $Q_{КУБ}$ и рекуперативном нагреве маточников, количества отводимого тепла при конденсации паров дистиллята в тепловом насосе и его охлаждении за счет рекуперативного теплообмена, а также при кристаллизации смесей $Q_{КРА}$ и $Q_{КРВ}$ сильно зависят от состава исходной смеси, температур охлаждения смесей на стадиях кристаллизации, состава маточников, дистиллятов, кубовых остатков, а также от температур смесей, с которыми они подаются на стадии ректификации и кристаллизации. При этом влияние указанных параметров на тепловые потоки для различных вариантов разделения может проявляться по-разному. Проведенные исследования также показали, что использование тепловых насосов открытого и закрытого типа при осуществлении сопряженных процессов позволяют существенно (на 30-50%) снизить затраты тепловой энергии по сравнению с обычной организацией такого разделения. При этом также понижаются расходы хладоагентов на конденсацию паров дистиллятов и охлаждение рециркулирующих потоков дистиллята и кубового остатка перед их подачей на стадии кристаллизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гельперин Н.И., Носов Г.А.* Разделение смесей путем сочетания некоторых массообменных процессов // Хим. пром. 1979. № 11 С. 677-681.

2. *Гельперин Н.И., Носов Г.А.* Основы техники фракционной кристаллизации. М.: Химия, 1986. 304 с.

3. *Гельперин Н.И., Носов Г.А.* Разделение расслаивающихся смесей путем сочетания процессов ректификации и фракционной кристаллизации. // Хим. пром. 1984. № 8 С. 38-40.

4. *Айнштеин В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. и др*. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. М: Теревинф, 2015. 1784 с.

5. *Янтовский Е.И., Левин Л.А.* Промышленные тепловые насосы. М.: Энергоиздат, 1989. 128 с.

6. *Носов Г.А., Таран А.В., Жильцов В.С*. Разделение эвтектикообразующих смесей путем сочетания процессов фракционной кристаллизации и однократной дистилляции с применением тепловых насосов открытого типа // Журн. Вестник МИТХТ. 2014. Т.9. № 5. С. 11-15.

7. *Носов Г.А., Бельская В.И., Жильцов В.С.* Разделение смесей путем сочетания процессов кристаллизации и непрерывной дистилляции с использованием тепловых насосов // Журн. Вестник МИТХТ. 2014. Т.9. № 3. С. 31-35.

УДК 664.723

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВРЕМЯ ОХЛАЖДЕНИЯ СЛОЯ ЗЕРНА В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИЛОСАХ
INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS ON THE TIME OF COOLING OF THE LAYER OF GRAIN IN METAL SILOS

Анна Сергеевна Ванцкул*, Елена Михайловна Горячева*,
Андрей Борисович Гаряев*, Владимир Федорович Сорочинский**
Anna S. Vanckul*, Elena M. Goryacheva *, Andrei B. Garyaev *, Vladimir F. Sorochinsky**

**Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», Россия, Москва*
**National Research University "Moscow Power Engineering Institute», Russia, Moscow*
(e-mail: anutason777@gmail.com, elena-goryacheva@mail.ru, gab874@yandex.ru)
***«Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки», Россия, Москва*
***Federal State Budgetary Institution «All-Russian Scientific Research Institute of Grain and products of its processing», Russia, Moscow*
(e-mail:vlafest@bk.ru)

Аннотация: Представлена математическая модель охлаждения слоя зерна в металлических силосах при активном вентилировании. Исследовано влияние скорости и начальной температуры воздуха и вида зерновых культур на продолжительность охлаждения слоя до температуры окружающей среды. Показано, что наиболее существенное влияние на продолжительность охлаждения оказывает скорость движения воздуха. При этом время охлаждения зерна зависит от начальной температуры воздуха.

Abstract: The mathematical model of the cooling of a grain layer in metal silos with active ventilation is presented. The influence of the speed and initial air temperature and the type of grain crops on the cooling time of the layer to the ambient temperature was studied. It is shown that the speed of air movement has the most significant effect on the duration of cooling. In this case, the cooling time of the grain depends on the initial air temperature.

Ключевые слова: математическая модель, зерно, активная вентиляция, охлаждение слоя.
Keywords: mathematical model, corn, active ventilation, layer cooling.

В настоящее время актуальной является проблема поддержания температурно-влажностного режима при хранении зерна в металлических силосах. Это связано с их интенсивным строительством и со значительными потерями зерна в результате несоблюдений условий хранения.

Температурно-влажностный режим зависит в этом случае от погодных условий (температуры и влагосодержания воздуха, подаваемого на активное вентилирование), свойств зерна и его начальной температуры, а так же скорости движения воздуха в слое. При этом скорость воздуха в слое зерна определяет время процесса термовлажностной обработки и аэродинамические потери. Для эффективного хранения необходим выбор скорости воздуха в зависимости от температуры, влажности воздуха и свойств зерновых культур.

Для выбора режима активной вентиляции необходимо разработать математическую модель процесса. При математическом описании сделаны следующие допущения [1]: продольное перемешивание газовой фазы отсутствует, слой имеет однородную порозность, в нем отсутствуют застойные зоны и явления проскока и рециркуляции воздуха.

Математическое описание процесса охлаждения и осушки зерна, записанное в одномерном приближении приведено [2]. Оно представляет собой систему дифференциальных уравнений, в которой неизвестными функциями являются температура и влагосодержание воздуха в слое, а так же температура и влагосодержание зерна. Данная система позволяет определить их изменения во времени и по высоте слоя. В систему

дифференциальных уравнений входит также уравнение, описывающее зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи *Nu* от *Re* в слое [3], а также соотношения, связывающие температуру, парциальное давление и влагосодержание влажного воздуха на линии насыщения. Следует отметить, что процесс описывается этой моделью приближенно, поскольку не учитывается перенос влаги внутри отдельного зерна от его центра к его поверхности. В части расчета влагосодержания модель требует в будущем уточнения с учетом изменения коэффициентов диффузии влаги и массоотдачи единичной зерновки [4]. Тем не менее, описание процесса охлаждения слоя зерна, продуваемого холодным воздухом, в том случае, если не учитывается влагоперенос, описывается моделью достаточно строго. В случае отсутствия массообмена модель принимает вид:

$$c_{\text{р}_{\text{возд}}} \cdot \frac{dt_{\text{в}}}{dz} \cdot G\text{в} = K \cdot (t_{\text{в}} - \Theta) \cdot f_1 \quad (1)$$

$$\frac{d\Theta}{d\tau} \cdot c_{\text{рз}} \cdot \rho = K \cdot (t_{\text{в}} - \Theta) \cdot f_1 \quad (2)$$

Здесь $\Theta(\tau)$ − температура зерна, ºС, $t_{\text{в}}(\tau)$− температура воздуха, ºС, τ – время, с, $c_{\text{р}_{\text{возд}}}$ – теплоемкость воздуха, кДж/кг, Gв – расход воздуха, кг/с, f_1, вычисляется по формуле:

$$f_1 = S \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{F_{\text{з-на}}}{V_{\text{з-на}}} \quad (3)$$

Коэффициент теплопередачи рассчитывается с учетом внутреннего термического сопротивления отдельных зерен:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{d}{2\lambda}} \quad (4)$$

Коэффициент теплоотдачи α от зернового слоя к воздуху определяется по числу Нуссельта, вычисляемому по следующему критериальному соотношению:

$$\text{Nu} = 1.38\text{Re}^{0.5}\text{Pr}^{0.33} \quad (5)$$

Данная система решена в среде имитационного моделирования *Mathlab Simulink*, что позволяет автоматизировать процесс расчета и наглядно представлять результаты. Данная модель позволила исследовать влияние на процесс охлаждения таких факторов, как скорость движения воздуха, начальная температура воздуха, вид зерновой культуры, хранящейся в силосе. Исследовались три зерновые культуры, которые выбраны таким образом, чтобы характеристики зерна существенно различались: пшеница, кукуруза, рапс. Необходимые данные для расчета для каждой зерновой культуры приведены в таблице 1.

Таблица 1 Теплофизические свойства зерновых культур

Зерновая культура	c_p, кДж/кг·К	λ, Вт/м·К	$\rho_{нас}$, кг/м^3	$d_{\text{экв}}$, мм
Пшеница	2450	0,315	850	3,5
Кукуруза	1870	0,48	750	7,6
Рапс	2600	0,16	650	2,1

Исследования проводились для скорости движения воздуха от 2 см/с до 10 см/с, и температуры воздуха от 5 °С до 15 °С. Высота слоя зерна составляла при этом 10 м, начальная температура зерна в слое равна 30 °С.

Влияние скорости воздуха на длительность процесса охлаждения является существенным. Зависимости температур от времени в верхнем слое пшеницы представлены на рис. 1. Видно, что при увеличении скорости от 2 см/с до 10 см/с время охлаждение слоя с температуры 30 °С до 15 °С уменьшается от $10{,}4 \cdot 10^5$ до $4{,}1 \cdot 10^5$ секунд (от 288 до 114 часов).

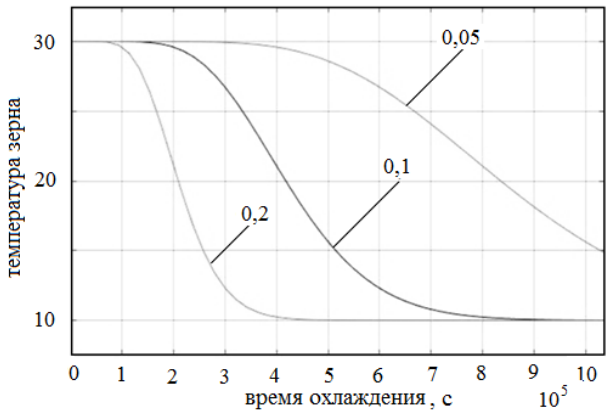


Рис. 1 Изменение температуры в верхнем слое зерна пшеницы с течением времени при различных скоростях воздуха 0,05, 0,1, 0,2 м/с

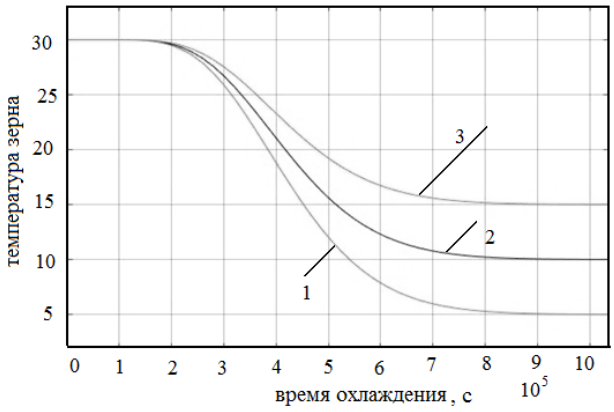


Рис. 2 Изменение температуры зерна в верхнем слое зерна с течением времени при различных начальных температурах воздуха (1 - 5 ºС, 2 - 10, 3 - 15 ºС).

Влияние начальной температуры воздуха представлено на рисунке 3. На основании графика можно сделать вывод, что общая продолжительность охлаждения верхнего слоя зерна до температуры воздуха слабо зависит от начальной температуры воздуха. Однако скорость этого процесса будет существенно разной и увеличиваться с увеличением градиента температур для разных зерновых культур (рис. 2).

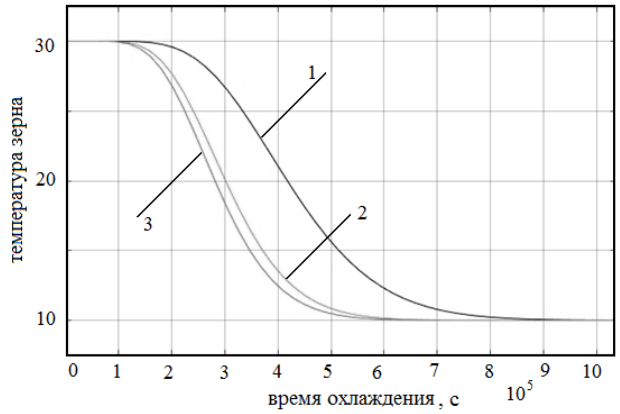


Рис. 3 Изменение температуры зерна в верхнем слое для различных культур (1 – пшеница, 2 – рапс, 3 – кукуруза) с течением времени.

Влияние параметров зерновых культур представлено на рис. 3.

Таким образом, полученная математическая модель и программа расчета позволяет проводить расчеты тепловых режимов для различных зерновых культур, причем, как при постоянных, так и при изменяющихся скоростях и температурах воздуха на входе в силос.

Решение тепловой задачи станет основной для решения задачи с изменением влагосодержания зерна.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рудобашта С. П.* Теплотехника, М.: Перо, 2015. 627 с.

2. *Гаряев А.Б., Сорочинский В.Ф., Горячева Е.М.* Математическая модель процесса переноса влаги при активном вентилировании зерна в элеваторах. // Сб. науч. тр. Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского «Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности». М.: ФГБОУ ВО МГУДТ, 2016. Т. 1 С. 320-324

3. *А.Н. Плановский, В.И. Муштаев, В.М. Ульянов*. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. М.: Химия, 1979. 228 с.

4. *Сорочинский В.Ф.* Изменение коэффициентов диффузии влаги и массоотдачи единичной зерновки в процессах сушки и охлаждения. // Сб.науч.тр. 1-ой Междунар. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». М.: МГАУ, 2002. Т.4. С.76-79.

УДК 536.241

РАСЧЕТ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ СУШКЕ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
CALCULATION OF THERMORESISTANCE AT CONTACT DRYING FOR CAPILLARY AND POROUS MATERIALS

Ольга Роальдовна Дорняк*, Виктор Михайлович Попов*,
Алексей Николаевич Внуков, Наталья Анатольевна Анашкина***
Olga Roaldovna Dornyak*, Victor Mikhaylovich Popov*,
Alexey Nikolaevich Vnukov **, Natal'ya Anatol'yevna Anashkina*

**Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.Морозова, Россия, Воронеж*
**Voronezh state forestry engineering University named after G. F. Morozov, Russia, Voronezh (e-mail: etgvglta@mail.ru)*
*** Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж*
The Military training and scientific center Sky force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Russia, Voronezh», Russia, Voronezh

Аннотация: Получена математическая модель тепловых процессов в капиллярно-пористом материале при контактной сушке с учетом наличия неидеального теплового контакта. Предложена модификация формулы для термического сопротивления контактных пар с учетом неидеальности контакта.

Abstract: The mathematical model of thermal processes in capillary and porous material during contact drying taking into account existence of imperfect thermal contact is received. Modification of a formula for the thermal resistance of contact couples taking into account not ideality of contact is offered.

Ключевые слова: теплопроводность, термосопротивление, идеальный и неидеальный термический контакт, капиллярно-пористые материалы, многофазные системы.

Keywords: heat conductivity, thermoresistance**,** ideal and nonideal thermal contact, capillary and porous materials, multiphase systems.

Математическое моделирование тепло- и массопереноса в процессе контактной сушки капиллярно-пористых материалов большинство исследователей проводят с использованием условий идеального температурного контакта, заключающихся в равенстве температур и тепловых потоков на условной границе высушиваемого тела и нагревательного элемента [1-4]. Применение таких идеальных условий обусловлено, в том числе, отсутствием данных о реальных условиях теплообмена для изучаемых контактных пар. Данная работа посвящена созданию математической модели тепловых процессов, происходящих в капиллярно-пористом материале при сушке контактным способом, и определению на ее основе температурной проводимости неидеального контакта.

В [5-6] на основе механики гетерогенных систем [7] построена математическая модель контактного теплообмена для двух капиллярно-пористых материалов, которые подвергаются температурному и механическому воздействию. В [5] показано, что в общем случае требует решения нестационарная сопряженная задача для напряженно-деформированного и теплового состояния материалов. Если в пористой системе образцов присутствует жидкая фаза, то расчет температурной проводимости в зоне контакта становится еще более сложным.

Общая математическая модель нестационарного термоконтактного взаимодействия металлической плиты и капиллярно-пористого образца включает уравнения переноса в трех

фазах – твердой, жидкой и газообразной. Концентрация фаз изменяется в процессе сушки, но в данной работе исследовано тепловое взаимодействие элементов контактной пары для фиксированных значений концентрации паровоздушной смеси, жидкости и компонент твердой фазы. Механическое взаимодействие тел не рассматривается.

Следуя [6], выделим три характерных зоны теплопередачи изучаемой системы: верхний слой высотой h_1 из пористого материала, например, из древесины; нижний слой высотой h_2 из непористого материала (стали); промежуточный тонкий слой толщиной h, который формируется за счет неровностей профиля контактирующих поверхностей (рис. 1). Области (21) и (22) не содержат твердой фазы из материала 2-го и 1-го типа соответственно. Слой толщиной h содержит фрагменты 1 и 2 материала, включения жидкой фазы (воды), а также зоны, заполненные газом (воздухом). Наличие такого слоя связано с учетом неидеальных условий термического взаимодействия нагревательного элемента и дисперсного материала.

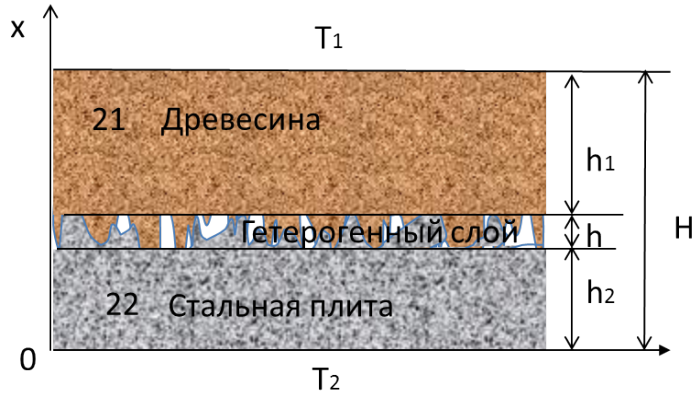


Рис.1. Расчетная схема.

Материал промежуточного контактного слоя высотой h - самостоятельная гетерогенная среда, при этом ее твердая фаза является двухкомпонентной, она содержит фрагменты вещества первого и второго материала, которые обладают разными физико-механическими свойствами.

Уравнения сохранения энергии записаны для теплофизических переменных, усредненных по объемам V_1 - первой (газообразной) фазы; V_2 - второй (твердой) фазы, V_3 - третьей (жидкой) фазы [7-8]. Важно, что усреднение для микроуравнений твердой фазы проведено отдельно по объему первого и второго материала V_{21} и V_{22} ($V_{21}+V_{22}=V_2$).

В математическую модель рассматриваемых тепловых процессов включены уравнения теплопроводности (знак усреднения везде опущен):

- для газообразной фазы

$$c_{p1}\rho_1^o\alpha_1\frac{dT_1}{dt}=\frac{\partial}{\partial x^k}\left(\alpha_1\lambda_1\frac{\partial}{\partial x^k}T_1\right)+Q_{\Sigma1(21)}+Q_{\Sigma1(22)}+Q_{\Sigma1(3)}; \quad (1)$$

- для твердой компоненты первого материала

$$c_{p21}\rho_{21}^o\alpha_{21}\frac{dT_{21}}{dt}=\frac{\partial}{\partial x^k}\left(\alpha_{21}\lambda_{21}\frac{\partial}{\partial x^k}T_{21}\right)+Q_{\Sigma21(1)}+Q_{\Sigma21(22)}+Q_{\Sigma21(3)}; \quad (2)$$

- для твердой компоненты второго материала

$$c_{p22}\rho_{22}^o\alpha_{22}\frac{dT_{22}}{dt}=\frac{\partial}{\partial x^k}\left(\alpha_{22}\lambda_{22}\frac{\partial}{\partial x^k}T_{22}\right)+Q_{\Sigma22(1)}+Q_{\Sigma22(21)}+Q_{\Sigma22(3)}; \quad (3)$$

- для жидкости

$$c_{p3}\rho_3^o\alpha_3\frac{dT_3}{dt}=\frac{\partial}{\partial x^k}\left(\alpha_3\lambda_3\frac{\partial}{\partial x^k}T_3\right)+Q_{\Sigma3(21)}+Q_{\Sigma3(22)}+Q_{\Sigma3(1)}. \quad (4)$$

Объемные концентрации фаз удовлетворяют условию

$$\alpha_1+\alpha_{21}+\alpha_{22}+\alpha_3=1. \quad (5)$$

Интенсивность теплообмена между фазами определяется с помощью соотношений вида

$$Q_{\Sigma i(j)}=s_{i\_j}\alpha_{i\_j}^{\Sigma}(T_i|_{\Sigma i\_j}-T_i)\ ;i,j=1,21,22,3; \quad (6)$$

На внутренних межфазных поверхностях выполняются условия теплового баланса

$$Q_{\Sigma i(j)} = -Q_{\Sigma j(i)} \;; i,j = 1,21,22,23. \tag{7}$$

Начальные условия задают распределение температуры каждой фазы в объемах плиты и высушиваемого образца:

$$T_i\big|_{t=0} = T_0,\ i = 1,21,22,3. \tag{8}$$

В качестве граничных условий приняты краевые условия первого рода:

$$\begin{gathered} T_i\big|_{x=0} = T_2,\ i = 22,3;\ T_1\big|_{x=0} = T_c; \\ T_i\big|_{x=H} = T_1,\ i = 21,3; T_1\big|_{x=H} = T_c; \\ T_1 < T_2. \end{gathered} \tag{9}$$

Начально-краевая задача (1-9), по форме практически не отличается от тепловой части математической модели тепло- и массопереноса при сушке капиллярно-пористых материалов [8-9]. Новый элемент рассматриваемой постановки задачи – наличие гетерофазного пограничного слоя, благодаря учету свойств которого появляется возможность описания реальных условий контактного теплообмена двух разных тел.

Рассмотрим результаты анализа модельной задачи стационарного контактного теплообмена при условии отсутствия жидкой фазы, позволяющего определить влияние параметров неидеального теплового контакта на величину термического сопротивления теплопередачи через два слоя – металла и древесины.

Термическое сопротивление двухслойной пластины в случае идеального контакта может быть определено как отношение разности значений температуры на внешних поверхностях к постоянной величине плотности теплового потока [10] :

$$R_{ид.к} = \frac{T_{22}\big|_{x=0} - T_{21}\big|_{x=H}}{q}. \tag{10}$$

Использование формулы (10) для вычисления термического сопротивления контактной пары с учетом неидеальности теплового контакта не представляется удачным, поскольку в данном случае величина плотности теплового потока не является постоянной.

Полагаем, что для характеристики термического сопротивления неидеального контакта более подходит следствие формулы (10) вида

$$R_{неид.к} = \frac{T_{22}\big|_{x=0} - T_{21}\big|_{x=H}}{T_{22}\big|_{x=h_2+h} - T_{21}\big|_{x=H}} \cdot \frac{h_1}{\lambda_1}. \tag{11}$$

При отсутствии гетерогенного слоя в зоне контакта тел (h=0) формула (11) эквивалентна традиционной формуле (10).

Как следует из (11), для расчета контактного термического сопротивления необходимо иметь распределение температуры по сечению слоев. Для рассматриваемого случая, при фиксированных значениях объемного содержания фаз сопряженная задача (1-9) является линейной и может быть решена аналитически. Также можно использовать численное решение, которое реализовано методом контрольного объема [11].

Расчет температурного поля проведен для следующих значений параметров.

Геометрические параметры: $h_2=h_1=0.02$ *м*; $h=8\cdot10^{-6}$ *м*.

Теплофизические параметры: коэффициенты теплопроводности $\lambda_1=0.0248$ *Вт/(м·К)*; λ_{22} $\lambda_{22}=47$ *Вт/(м·К)*; $\lambda_{21}=0.4$ *Вт/(м·К)*. Коэффициенты теплоотдачи на межфазных поверхностях $\alpha^{\Sigma}_{1\_21} = \alpha^{\Sigma}_{21\_1} = 2\ Вт/(м^2К)$; $\alpha^{\Sigma}_{1\_22} = \alpha^{\Sigma}_{22\_1} = 5\ Вт/(м^2К)$; $\alpha^{\Sigma}_{21\_22} = 50\ Вт/(м^2К)$; $\alpha^{\Sigma}_{22\_21} = 500\ Вт/(м^2К)$.

Структурные параметры. Объемное содержание воздуха в области (21) $\alpha_1=0.7$, в гетерогенном слое $\alpha_1=0.75$, в области (22) $\alpha_1=0$. Объемное содержание материала древесины в области (21) $\alpha_{21}=0.3$, в гетерогенном слое $\alpha_{21}=(0.15\div0.1)$, в области (22) $\alpha_{21}=0$. Объемное содержание металла области (21) $\alpha_{22}=0$, в гетерогенном слое $\alpha_{22}=(0.1\div0.15)$, в области (22) $\alpha_{22}=1$. Здесь и ниже левая граница интервала относится к верхней точке слоя (с большей координатой x).

Значения удельной площади межфазной поверхности в зоне (21) $s_{1\_21}=1{,}5\cdot10^{6}$ $м^{-1}$, в гетерогенном слое $s_{1\_21}= s_{1\_21}\cdot(0.5\div0.25)$, $s_{1\_22}= s_{1\_21}\cdot0.17$, $s_{21\_22}= s_{1\_21}\cdot0.017$.

Температура на внешних границах $T_{22}\big|_{x=0}$=423 К; $T_{21}\big|_{x=H}$=333 К.

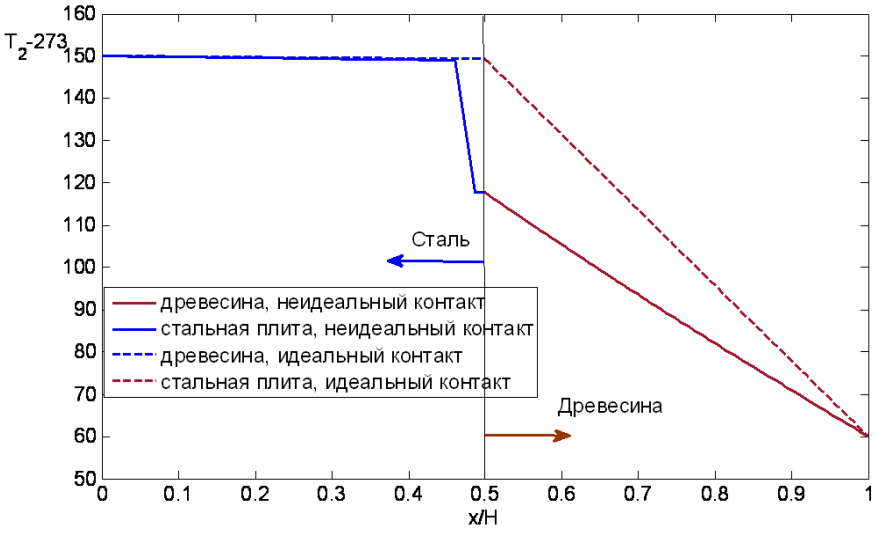


Рис. 2. Изменение температуры в поперечном сечении контактной пары сталь-древесина при идеальном и неидеальном тепловом контакте при $s_{21\_22}=2.5\cdot10^{4}м^{-1}$.

На рис. 2 приведено распределение температуры поперек сечения слоев в случае идеального и неидеального контакта. Нижняя сторона стальной плиты нагрета до температуры 150°С. Верхняя сторона образца древесины имеет температуру 60°С.

Для выбранных расчетных параметров потеря температурного напора в гетерогенном слое составила ~35°С.

На рис. 3 показана зависимость термического сопротивления контактной пары в зависимости от величины удельной поверхности контакта древесины и металла в выделенном гетерогенном слое s_{21_22}, которое зависит от характера дефектов поверхности нагрева и древесного образца. График, построенный в логарифмических координатах, иллюстрирует снижение термического сопротивления с ростом величины s_{21_22} , при этом скорость этого снижения немонотонна, она выше в среднем диапазоне изменения значений удельной поверхности контакта древесины и металла.

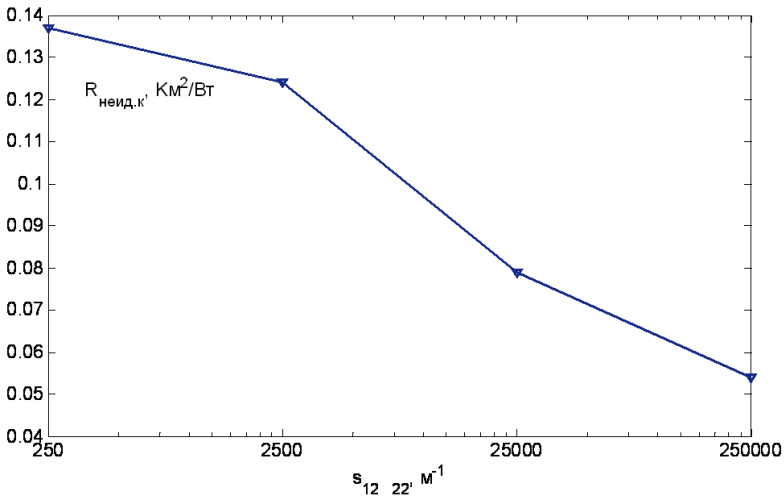


Рис. 3. Термическое сопротивление теплопередачи в двухслойной системе сталь-древесина в зависимости от значения удельной поверхности контакта компонент твердой фазы в пограничном гетерогенном слое h.

Выводы.

1. Получена математическая модель тепловых процессов в капиллярно-пористом материале при контактной сушке с учетом наличия неидеального теплового контакта.

2. Предложенная модель (1-9) может быть использована как элемент, более общей математической модели тепло- и массопереноса в процессах сушки капиллярно-пористых материалов, а также независимо для расчета контактного термического сопротивления теплопередачи с учетом параметров контактирующих поверхностей.

3. Модификация формулы для термического сопротивления контактных пар (10) может применяться в случае учета неидеальности контакта.

4. Проведенный модельный расчет показал, что сформулированная математическая модель контактного теплообмена и модифицированная формула для термического сопротивления теплопередачи качественно верно отражают роль гетерогенного контактного слоя в повышении его термосопротивления.

Список обозначений: c – теплоемкость, *Дж/(кг·К)*; R_k – термическое сопротивление теплопередачи, $м^2 \cdot К/Вт$; s_{i_j} – удельная поверхность раздела фаз *i* и *j*, $м^{-1}$; *p* – давление, *Па*; *T* – температура, *К*; *t* – время, *с*; q – плотность теплового потока, $Вт/м^2$; x^k – декартовы координаты (k=1,2,3), *м*; α - объемное содержание фазы; $\alpha^{\Sigma}_{i\_j}$ - коэффициент теплоотдачи между фазами *i* и *j*, $Вт/(м^2 К)$; λ -коэффициент теплопроводности, *Вт/(м·К)*; ρ – плотность, $кг/м^3$; *Нижние индексы* относятся: 1,2– к газообразной и твердой фазам, 21 и 22 – компоненты твердой фазы, сталь и древесина соответственно; 3 – к жидкой фазе; 0 – к начальным значениям; *c* – к окружающей среде; Σ_{ij} - к границам раздела фаз *i* и *j*. *Верхние индексы*: ° - истинное значение физической величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лыков А.В.* Тепломассообмен. М.: Энергия, 1971. 560 с.

2. *Павлюкевич Н. В.* Введение в теорию тепло–и массопереноса в пористых средах. Минск : Ин–т тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАНБ, 2003. 140 с.

3. *Рудобашта С.П., Карташов Э.М.* Диффузия в химико-технологических процессах. М.: КолосС, 2010. 478 с

4. *Байков В. И., Павлюкевич Н. В., Федотов А. К., Шнип А. И.* Теплофизика. Т. 2. Термодинамика необратимых процессов, теория конвективного теплообмена, перенос энергии теплового излучения, процессы переноса и фазовые превращения в твердых телах. – Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2014. 371 с.

5. *Дорняк, О. Р., Попов В. М., Анашкина Н. А.* Математическая модель термоконтактного взаимодействия двух капиллярно-пористых образцов // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности : сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского. - М.: 2016. - Т. 2. - С. 127-130.

6. *Попов В. М., Дорняк О. Р.* Соединения на клеях, модифицированных воздействием физических полей. – Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г. Ф. Морозова, 2016. 128 с.

7. *Нигматулин Р.И.* Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.

8. *Дорняк О.Р.* Тепломассоперенос в ненасыщенных коллоидных капиллярно-пористых анизотропных материалах. Автореф. дис... докт. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 2007. 32 с.

9. *Дорняк О.Р., Усачев С.М., Шмитько Е.И., Аль Сарраджи Салах Х. Мела.* Математическое моделирование тепло- и массопереноса при адсорбционно-контактной сушке керамических материалов (математическая модель) [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2013. - № 89 (05).

10 *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

11. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

УДК 66.018.8

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ
THE PREDICTION OF DURABILITY OF CONCRETE PRODUCTS

Сергей Викторович Федосов, Варвара Евгеньевна Румянцева,
Виктория Сергеевна Коновалова
Sergey V. Fedosov, Varvara E. Roumyantseva, Victoriya S. Konovalova

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

Аннотация: Проведен мониторинг проникновения хлорид-ионов через защитный слой бетона к поверхности арматуры посредством построения профилей концентраций по толщине образца в агрессивных средах. Установлены временные интервалы, соответствующие достижению концентрации хлорид-ионов, необходимой для начала коррозионного процесса на поверхности арматуры в бетоне при жидкостной коррозии.

Abstract: Monitoring of chloride ions penetration through the protective layer of concrete to the surface of the rebar by creation of profiles of the concentrations on the sample thickness in corrosive environments is carried out. The time intervals corresponding to the achievement of the chloride ions concentration necessary to start the corrosion process on the surface of rebar in concrete at liquid corrosion are established.

Ключевые слова: коррозионный массоперенос, коррозия бетона, коррозия стальной арматуры, агрессивные среды.

Keywords: corrosion mass transfer, corrosion of concrete, corrosion of steel reinforcement, aggressive environments.

Срок службы железобетонных конструкций может быть разделен на две отдельные фазы. Первая фаза – начало коррозии, в которой арматура находится под защитой пассивного слоя, но по ряду причин эта пассивность может быть нарушена, например, когда имеет место карбонизация или проникновение хлорид-ионов в бетонное покрытие. Вторая фаза – развитие коррозии, которая начинается, когда сталь депассивирована, и заканчивается, когда достигается предельное значение, после которого последствия коррозии не могу быть предотвращены [1, 2].

В течение начальной стадии агрессивные соединения (CO_2, хлориды), которые могут депассивировать сталь, проникают через поверхность в объем бетона:

- карбонизация: начинается на поверхности бетона и постепенно проникает к внутренним зонам, щелочность бетона может быть нейтрализована диоксидом углерода из атмосферы, что приведет к снижению значения pH поровой жидкости бетона до 9, когда пассивная пленка более не стабильна.
- хлорид-ионы из окружающей среды могут проникать в бетон и достигать арматуры; если их концентрация на поверхности арматуры достигает критического значения, то защитный оксидный слой может быть локально разрушен.

Продолжительность начальной фазы зависит от толщины покрытия и скорости проникновения агрессивных веществ, так же как от концентрации, необходимой для депассивации стали. Скорость проникновения агрессивных веществ зависит от качества бетонного покрытия (пористости, проницаемости) и от микроклиматических условий (влажные или сухие) на поверхности бетона [2, 3].

После разрушения защитного слоя, на поверхности стальных стержней незамедлительно появляются признаки коррозии в виде ржавчины. Химические реакции, происходящие при коррозии стали, одинаковы и в случае карбонизации, и в случае

воздействия хлоридов. Когда начинается процесс коррозии арматуры, железо растворяется в порах, содержащих воду, по анодной реакции (1) [4]:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\bar{e}. \quad (1)$$

Другая реакция – восстановление кислорода – катодная реакция (2) [4]:

$$2\bar{e} + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2OH^-. \quad (2)$$

Гидроксид-ионы увеличивают щелочность и незначительно уменьшают влияние карбонизации и хлоридов. Таким образом, установлено, что вода является главной причиной развития коррозионных процессов [5].

Катодные и анодные реакции являются первым шагом в процессе развития коррозии, так как гидроксид-ионы будут реагировать с ионами железа Fe^{2+} по реакции (3) [6]. В результате образуются гидроксиды железа, которые реагируют с кислородом и водой по реакции (4):

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2, \quad (3)$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3, \quad (4)$$

$$2Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3 \cdot H_2O + 2H_2O. \quad (5)$$

Химические уравнения показывают преобразование стали до последнего компонента $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ (ржавчины) по реакции (5) [5].

$Fe(OH)_3$ оказывает большее влияние на разрушение бетона и растрескивание бетонного покрытия, поскольку его объем увеличивает объем стальной арматуры в два или более раза. Когда железо гидратируется до Fe_2O_3 в присутствии воды, его объем увеличивается примерно в 10 раз [7, 8]. На этой стадии начинает растрескивание бетона до обрушения бетонного покрытия [8, 9].

Проведен расчет концентрации хлорид-ионов, поступающих через бетонное покрытие к стержню арматуры (рис. 1-3) [10]. Расчет основан на полученных ранее профилях концентрации «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонного покрытия и определенных параметрах массопереноса [11].

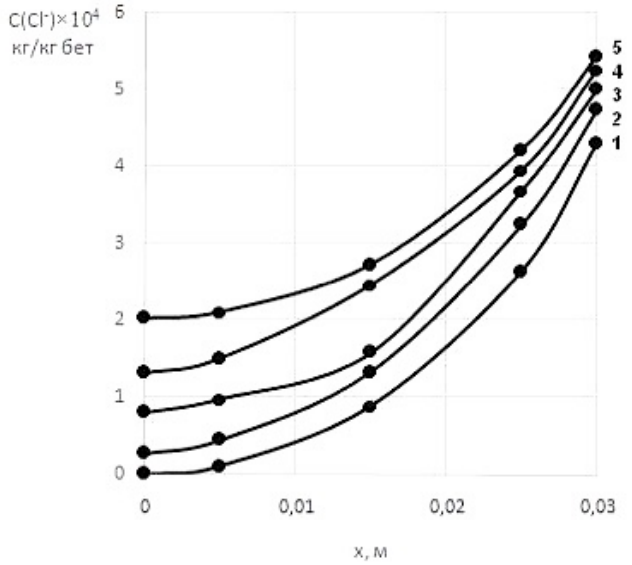


Рис. 1. Профили концентраций хлорид-ионов по толщине образца в 2%-ом водном растворе $MgCl_2$ при τ: 1 – 14 сут; 2 – 28 сут; 3 – 42 сут; 4 – 56 сут; 5 – 70 сут

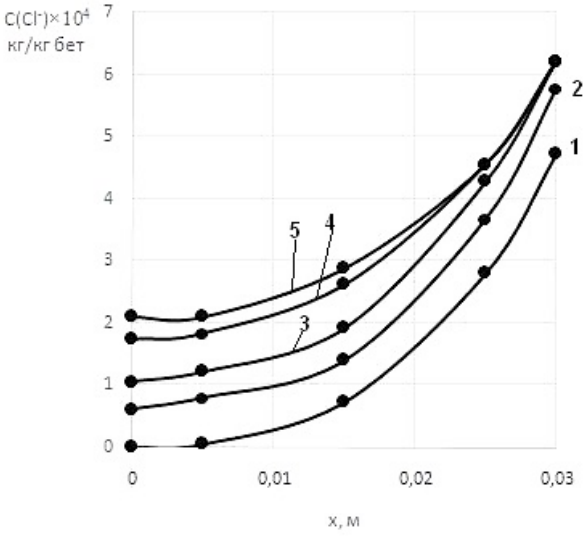


Рис. 2. Профили концентраций хлорид-ионов по толщине образца в водном растворе HCl (pH = 5) при τ: 1 – 14 сут; 2 – 28 сут; 3 – 42 сут; 4 – 56 сут; 5 – 70 сут

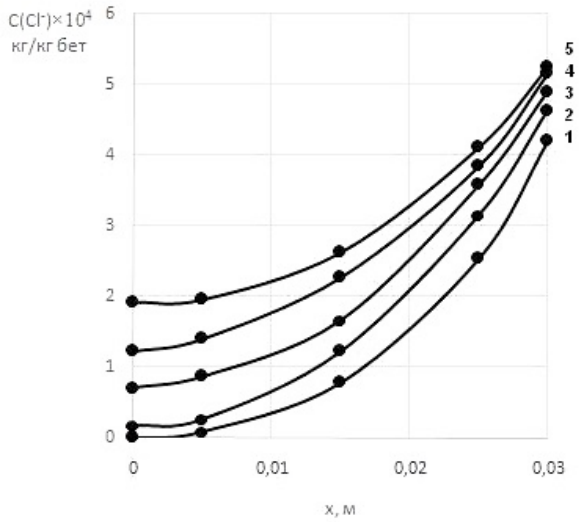


Рис. 3. Профили концентраций хлорид-ионов по толщине образца в 0,1 %-ом водном растворе $CaCl_2$ при τ: 1 – 14 сут; 2 – 28 сут; 3 – 42 сут; 4 – 56 сут; 5 – 70 сут

Полученные профили концентраций позволяют спрогнозировать время достижения концентрации хлорид-ионов, необходимой для начала коррозии арматурной стали. В качестве порогового значения концентрации хлорид-ионов, при превышении которого начинают развиваться коррозионные процессы на поверхности арматуры, традиционно принимается 0,4 % по массе цемента [5, 12]. Для исследуемых образцов пороговое значение содержания хлорид-ионов составляет $2{,}36 \cdot 10^{-4}$ кг/кг бетона. Для достижения такой концентрации хлорид-ионов у поверхности арматуры в бетоне при жидкостной коррозии в водном растворе HCl (pH = 5) понадобятся 331 сутки; в 2%-ом водном растворе $MgCl_2$ – 174 суток; в 0,1 %-ом водном растворе $CaCl_2$ – 210 суток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. // Swedish foundation for concrete research. Stockholm, 1982.

2. Bažant Z.P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures // Journal of the Structural Division. 1979. № 105 (ST6). pp. 1137-1166.

3. Леонович, С.Н. Модели периода инициирования коррозии арматуры / С.Н. Леонович, А.В. Прасол // Строительные материалы. 2012. № 9. С. 74-75.

4. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. М.: Стройиздат, 1976. 205 с.

5. Алексеев, С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / С.Н. Алексеев. М.: Стройиздат, 1968. 232 с.

6. Эванс, Ю.Р. Коррозия, пассивность и защита металлов / Ю.Р. Эванс. Л.: Металлургиздат, 1941. 885 с.

7. Бахвалов, Г.Т. Защита металлов от коррозии / Г.Т. Бахвалов. М.: Металлургия, 1964. 288 с.

8. Жук, Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. М.: Металлургия, 1976. 472 с.

9. Горшков, В.К. Защита строительных конструкций от коррозии / В.К. Горшков [и др.] Иваново: ИГХТУ, 2003. 192 с.

10. Федосов, С.В. Исследование процессов коррозионной деструкции железобетонных изделий в агрессивных средах с хлорид-ионами / С.В. Федосов, В.Е Румянцева, С.В. Коновалова // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 5 (58). С. 61-67.

11. Федосов, С.В. Вопросы прогнозирования долговечности строительных конструкций / С.В. Федосов [и др.] // Строительство и реконструкция. 2011. № 5 (37). С. 63-70.

12. Алексеев, С.Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев [и др.] М.: Стройиздат, 1990. 316 с.

УДК 678.742.2-405.8

НЕКОТОРЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ВСПЕНИВАНИЯ ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА
SOME MATHEMATICAL MODEL FOAMING POLYETHYLENE

Светлана Ивановна Бухкало
Svetlana I. Buhkhalo

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина
National Technical University «KhPI», Kharkiv, Ukraine
(e-mail: bis.khr@gmail.com)

Аннотация: Рассмотрены некоторые возможности повышения эффективности использования ТБО на комплексном предприятии, которое может обеспечивать все свои энергетические потребности самостоятельно соблюдая условия экологической безопасности. Исследования направлены на изучение таких вопросов, как разработка моделей вспенивания вторичного полиэтилена (в процессах утилизации-модификации полимерной части ТБО). При этом учитывались факторы выбора научно-обоснованных методов переработки и утилизации полимеров; разработка необходимых технологических схем и оборудования для переработки полимерных отходов; выбор предприятий для реализации утилизации полимеров и вида энергетических ресурсов.

Abstract: Some features of the possibilities of solving complex problems of improving the use of polymer wastes on enterprise that can provide all its energy needs alone. The problem of wastes utilization is present as mathematical model complex research and analysis of processes for treatment of polymer wastes of various origin. The research focused on the study of issues such as the development of models of waste-modifying polymer. The investigation are focused in researching such problems as selection of scientific based methods of wastes to be utilized or recycled; the development of appropriated process flow sheets and choice of modifications additives and equipment for polymers waste recycling. The choice of appropriate plants with selected energy resources is very important for projects realization environmental safety.

Ключевые слова: экологическая безопасность, интегрированные комплексные технологии, объект научно-обоснованной технологии, модели вспенивания.

Keywords: environmental safety, integrated complex technologies for waste, evidence-based methods, wastes conversion and recycling.

Исследования направлены на конкретизацию таких вопросов, как разработка экологически безопасных моделей утилизации-модификации полимерной части твердых бытовых отходов (ТБО) с учетом результатов, проведенных ранее работ [1-5] по получению вторичного полиэтилена. Цели исследования связаны с постоянным увеличением объемов выпуска полимерных материалов различного ассортимента и предполагают разработку процессов системы защиты техносферы и, таким образом, обеспечение производственной и экологической безопасности утилизации ТБО.

Важной отраслью народного хозяйства должна быть не только повторная переработка значительной части ТБО (рис. 1), в частности полимерной ее части [4-6], а также и высокотемпературная газификация ТБО (рис. 2) (с целью получения целевого сырья для химической промышленности и, практически, 100 %. утилизации-модификации и утилизации-газификации всех видов ТБО.

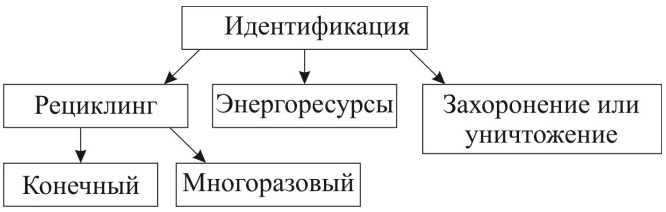


Рис. 1. Схема управления ТБО.

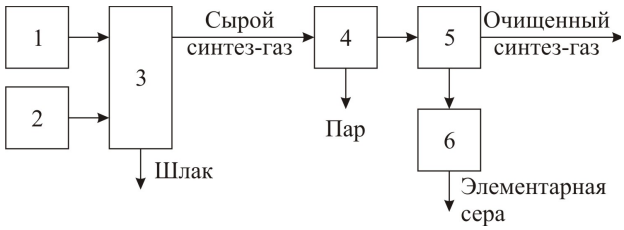


Рис. 2. Упрощенная схема газификации.

На основе создания отраслей промышленности повторной переработки ТБО необходимы исследования по разработке нового ассортимента товаров народного потребления. Использованы методы научно-обоснованного анализа основных направлений разработки инновационных полимерных материалов из отходов с применением методов математического моделирования [6-8]. С целью разработки процессов системы защиты техносферы и, таким образом, обеспечение производственной и экологической безопасности продолжены работы по совершенствованию технологии утилизации-модификации полимерных полиэтиленовых отходов как части ТБО [9-11]. В частности, исследовалась возможность получения вспененного вторичного полиэтилена (ВВПЭ) – крупнотоннажная часть ТБО. Для повышения качества изделий из ВВПЭ необходимо получить и исследовать математические модели влияния факторов: 1) изменения свойств в процессе эксплуатации полиэтиленовой пленки и 2) технологических параметров процесса вспенивания для разновидностей ассортимента отраслей использования изделий. При разработке процесса вспенивания вторичного полиэтилена, полученного на основе объекта исследования – полиэтиленовой пленки (табл. 1), прошедшей длительную эксплуатацию, использовали методы полного факторного эксперимента (ПФЭ).

Таблица 1. ПФЭ для функции отклика

№	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1
1	+	+	+	+	+	+	+	+	64,0
2	+	-	+	+	-	-	+	-	155,0
3	+	+	-	+	-	+	-	-	104,0
4	+	-	-	+	+	-	-	+	141,0
5	+	+	+	-	+	-	-	-	84,0
6	+	-	+	-	-	+	-	+	120,0
7	+	+	-	-	-	-	+	+	52,0
8	+	-	-	-	+	+	+	-	50,0

Исследовалось относительное удлинение при разрыве ВВПЭ, принятое в качестве выходного параметра Y (%). Факторами (табл. 1) являлись параметры проведения процесса вспенивания: X_1 – количество активирующего комплекса, %; X_2 – температура вспенивания, °С; X_3 – время выдержки при температуре вспенивания, мин. Исходные данные: X_{10}= 3; X_{20}=170; X_{30}= 15; ΔX_1= 1; ΔX_2= 10; ΔX_3= 5. Для функции отклика Y записываем линейную модель:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \quad (1)$$

которая дает такие значения коэффициентов и их д

Таблица 2. Параметры линейной модели и их доверительные интервалы

Параметр	Нижняя граница	Значения	Верхняя граница
b_0	64,2813	96,2500	128,2187
b_1	-52,2187	-20,2500	11,7187
b_2	-22,4687	95,000	41,4687
b_3	-12,2187	19,7500	51,7187

С доверительной вероятностью 95% доверительный интервал для b_1 включает ноль и уточненная модель имеет вид (2):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3, \quad (2)$$

которая имеет такие параметры и доверительные интервалы (табл. 3).

Таблица 3. Параметры уточненной модели Y и доверительные интервалы для них

Параметр	Нижняя граница	Значения	Верхняя граница
b_0	70,8376	96,2500	121.6624
b_1	-45,6624	-20,2500	5.1624
b_2	-15,9124	9,5000	34.9124
b_3	-5,6624	19.7500	45.1624
b_4	-36,9124	-11.5000	13.9124
b_5	-37,1624	-11.7500	13.6624
b_6	-41,4124	-16.0000	9.4124

Введение еще одной, восьмой базисной функции $X_1X_2X_3$, превращает задачу в интерполяционную (3): функция отклика Y будет точным аналитическим выражением:

$$Y = 96,25 - 20,25x_1 + 9,50x_2 + 19,75x_3 - 11,50x_1x_2 - \\ -11,75x_1x_3 - 16,00x_2x_3 - 2,00x_1x_2x_3, \quad (3)$$

доверительных интервалов нет.

Представленный ПФЭ для функции отклика показывает соответствует выбранным критериям относительной погрешности для экспериментальных точек соответственно для полиэтилена он составляет 4–5%.

Уравнение 3 определяет плоскости для функции отклика Y в пространстве X_1 – количество активирующего комплекса, %; X_2 – температура вспенивания, °С; X_3 – время выдержки при температуре вспенивания, мин. На рисунках 3–5 представлены двумерные сечения функции отклика при постоянном (минимальном или максимальном) значении одной из переменных $X_1; X_2$ или X_3.

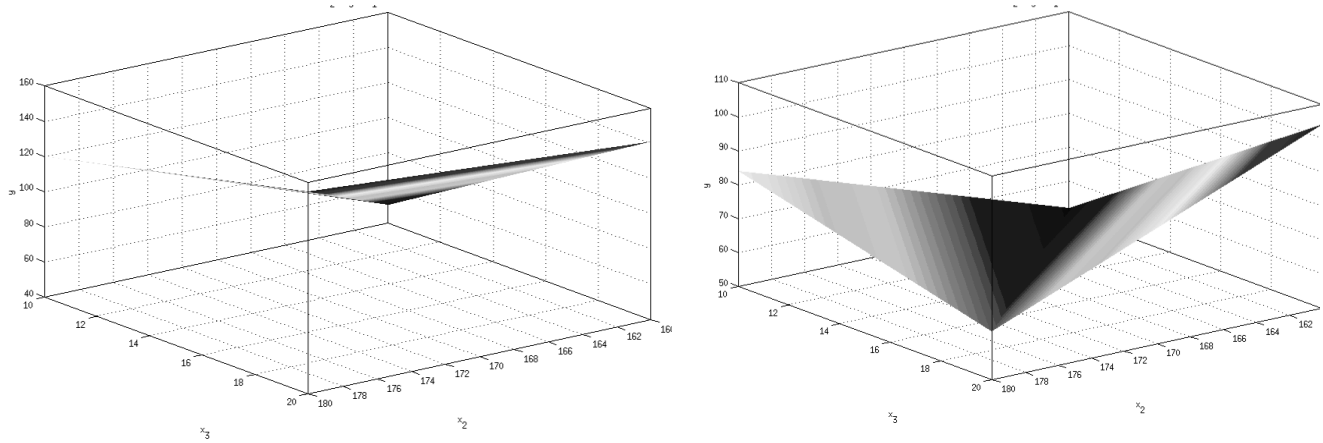


Рис. 3. Модели влияния параметров вспенивания X_1 для функции отклика Y.

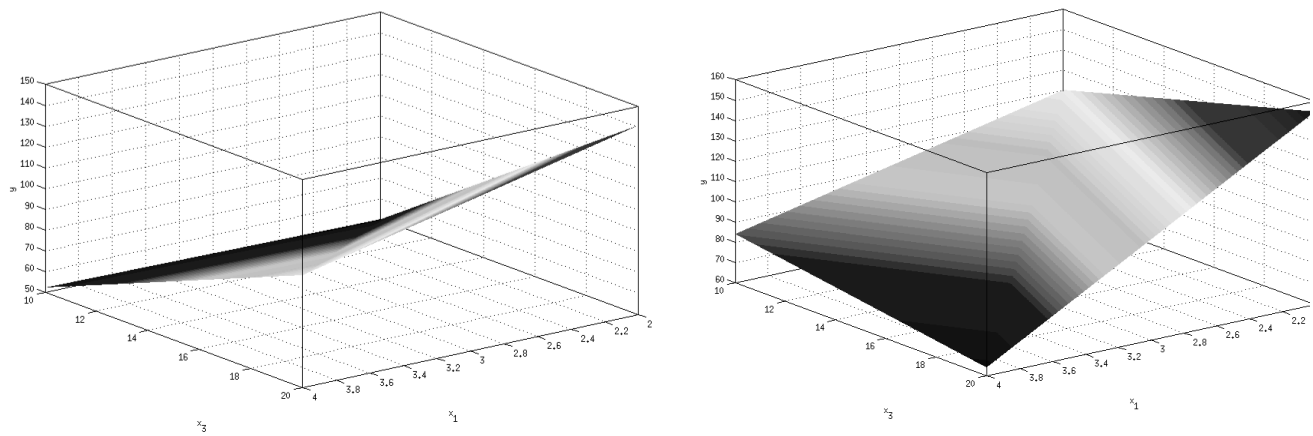


Рис. 4. Модели влияния параметров вспенивания X_2 для функции отклика Y.

Очевидно, что оптимальный набор параметров переработки (вспенивания) будет обусловлен координатами плоскостей: $Y = f(X_2X_3)$ (рис. 3), соответственно справа при $X_1 = 2$ и слева – $X_1 = 4$; $Y = f(X_1X_3)$ (рис. 4), соответственно справа при $X_2 = 160$ и слева – $X_2 = 180$; где $Y = f(X_1X_2)$ (рис. 5), соответственно справа при $X_3 = 10$ и слева – $X_3 = 20$.

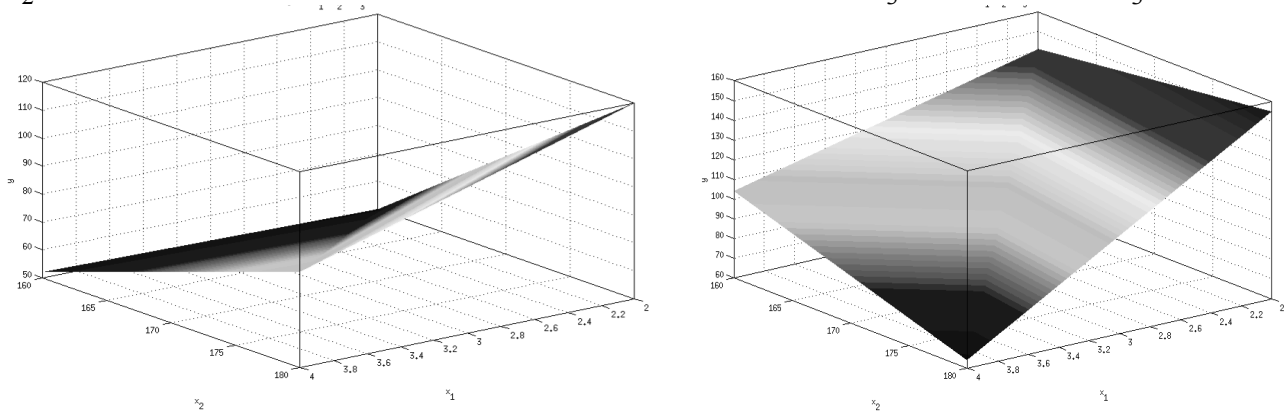


Рис. 5. Модели влияния параметров вспенивания X_3 для функции отклика Y.

На практике, прежде всего, для реализации представленных исследований необходимо: 1) определить принципы комплексного метода классификации-идентификации ТБО и отделения от нее полимерной части; 2) при решении вопросов управления экологической безопасностью утилизации ТБО учитывать систему экологического нормирования и экологической оценки рисков для здоровья населения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бухкало С.І.* Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи) [текст] підручник. Київ «Центр учбової літератури»: 2014, 456 с.

2. *Бухкало С.И.* Ресурсосберегающие технологии использования полимерных отходов / Інтегровані технології та енергозбереження // 2001. – № 2. – С. 106–112.

3. *Бухкало С.И.* К вопросу энергосбережения процесса агломерирования полимерной упаковки / Інтегровані технології та енергозбереження // 2005. – № 2. – С. 29–33.

4. *Бухкало С.И.* Деякі властивості полімерних відходів у якості сировини для енерго- і ресурсозберігаючих процесів // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХПІ». 2014. – № 4. – с. 29–33.

5. *Бухкало С.І.* Основні складові комплексних підприємств енергетичного міксу // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». 2015. – № 7 (1116). – с. 3–21.

6. *Товажнянский Л.Л., Кошелева М.К., Бухкало С.И.* Общая химическая технология в примерах, задачах, лабораторных работах и тестах (уч. пособие) / М. ИНФРА-М, 2015. 447 с.

7. *Бухкало С.І.* Моделі енергетичного міксу для утилізації полімерної частки ТПВ // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». 2016. – № 19 (1191). – с. 23–32.

8. *Бухкало С.І., Іглін С.П.* Деякі моделі дослідження структурно-хімічних змін при експлуатації полімерних виробів / Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХПІ». 2016. – № 3. – с.52–57.

9. *Бухкало С.І.* Інноваційні технології використання відходів. 4-й міжн. конгрес Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування, 21–23 вересня 2016 р., Львів. 2016, – с. 111.

10. *Бухкало С.І.* Деякі аспекти екологічної безпеки полімерної тари та пакування харчової промисловості / Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2014. – Вип. 45. Т. 3. – С. 76–79.

11. *Бухкало С.І.* Екологічні та економічні проблеми утилізації полімерної тари та пакування продуктів харчування / ІІІ міжн. н/практ. конф «Хімія біо- и нанотехнології, екологія та економіка в харчовій і косметичній промисловості». – Х.: НТУ «ХПІ». 2015. – с. 103–108.

УДК 674.04

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ В РЕАКТОРЕ ТАРЕЛЬЧАТОГО ТИПА
MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL TREATMENT OF WOOD WASTE IN THE REACTOR PLATE TYPE

Руслан Рушанович Сафин, Альбина Леонидовна Тимербаева, Ралия Тимерхановна Хасаншина, Радис Решидович Зиатдинов, Елена Александровна Белякова
Ruslan R. Safin, Albina L. Timerbaeva, Raliya T. Khasanshina, Radis R. Ziatdinov, Elena A. Belyakova

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань
Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan
(e-mail: cfaby@mail.ru, olambis@rambler.ru, rusl2881@mail.ru, radis226@rambler.ru)

Аннотация: В статье представлена математическая модель процесса термической обработки измельченной древесины в реакторе тарельчатого типа, разработанная на основание уравнений механики и термодинамики.

Abstract: The article presents a mathematical model of the thermal processing of wood waste in the reactor plate type, developed on the basis of the equations of mechanics and thermodynamics.

Ключевые слова: измельченная древесина, моделирование, термомодифицирование.

Keywords: shredded wood, modeling, thermomodification.

В последние годы активно ведутся исследования в области глубокой переработки древесины с целью получения качественных композиционных материалов [1, 2]. При этом одним из перспективных методов обработки древесного сырья рассматривается процесс термомодифицирования при высокой температуре без доступа кислорода воздуха [2, 3].

В процессе термообработки древесного вещества происходит разложение гемицеллюлозы на реактивные молекулы меньшего размера, что позволяет существенно снизить гигроскопичность, величину коробления в условиях переменой влажности и повысить биостойкость, долговечность [3].

Основные типы установок для термомодифицирования сыпучего сырья – это шнековые, барабанные, ленточные, тарельчатые устройства [1, 4]. При этом наиболее отработанной технологией считается использование тарельчатых реакторов, к основным достоинствам которых относят возможность регулирования продолжительности обработки сырья путем изменения скорости вращения мешалок. Однако тарельчатые реакторы также как и другие не лишены одного серьезного недостатка характерного для устройств

торрефикации древесины: вероятность неоднородности свойств конечного продукта вследствие обработки различных фракций сырья.

Таким образом, в работе была поставлена цель усовершенствования процесса термической обработки измельченной древесины в условиях тарельчатых реакторов и исследования свойств и сфер применения полученной продукции. При этом была разработана математическая модель расчета процессов термической обработки измельченной древесины в реакторах тарельчатого типа [4].

Физическая картина изучаемого процесса представлена на рисунке 1. При этом в качестве агента обработки были использованы топочные газы, полученные в результате сгорания отходов деревопереработки, так как это наиболее эффективный и низко затратный способ создания безкислородной высокотемпературной среды [4, 5].

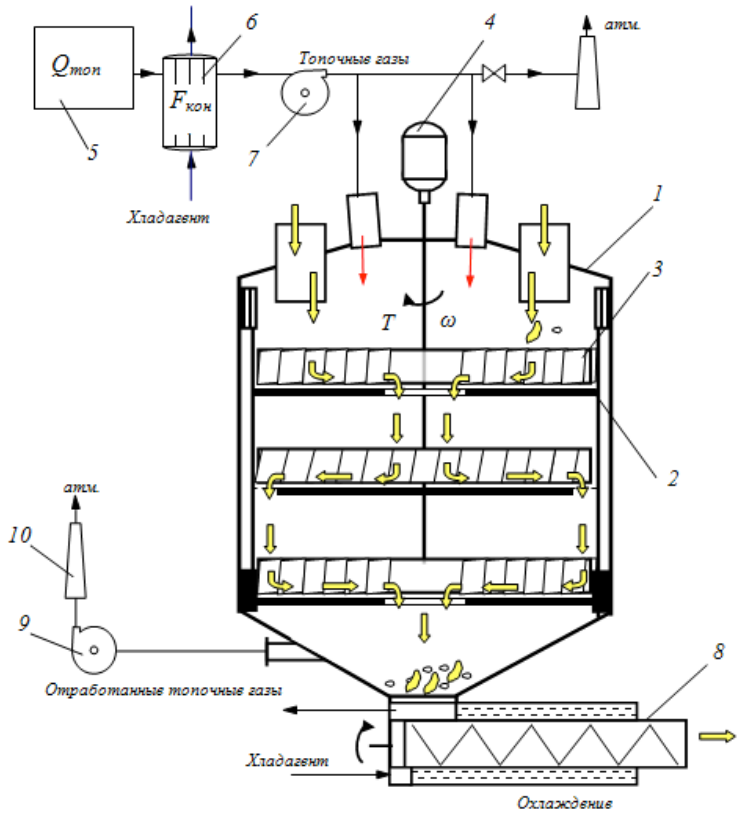


Рис. 1. Физическая картина тарельчатого реактора для термообработки древесного сырья в среде топочных газов.

Комплекс для термомодифицирования измельченной древесины состоит из реактора 1, тарелок 2, мешалки с лопатками 3, двигателя 4, топки 5, теплообменника 6, газодувок 7, 9, шнекового питателя 8, устройства дожига и утилизации отходящих газов 10.

Работа установки происходит следующим образом. После включения в работу системы получения топочного газа и прогрева всей установки, начинается подача измельченного сырья на верхнюю тарелку реактора. Благодаря вращению мешалки щепа распределяется по верхней тарелке, совершая движение по спирали и стремясь к центральному пересыпному отверстию, при достижении которого сырье ссыпается на следующую тарелку и продолжает движение в обратном направлении - к периферийному пересыпному отверстию. Таким образом, происходит пересыпание сырья с верхних тарелок на нижние. При этом движение частицы по тарелке носит толчкообразный характер: в момент захвата частицы лопаткой она находится в движении, при сходе с лопатки - в покое, до момента захвата следующей лопаткой.

Вследствие воздействия на частицу высокотемпературного теплоносителя на верхних тарелках реактора происходит досушка сырья до абсолютно сухого состояния и постепенный

выход на режим термической обработки, а на центральных и нижних тарелках - непосредственная термическая обработка до требуемой степени модификации, заканчивающаяся при достижении нижней части реактора. После чего обработанные древесные частицы попадают в шнековый питатель, где продвигаясь по длине питателя постепенно охлаждаются за счет теплопередачи хладагенту рубашки.

Скорость изменения температуры топочных газов в теплообменнике рассчитывается по формуле (1)

$$\frac{dT_{тг}}{d\tau} = \frac{Q_{кон} \cdot \rho_{тг} \cdot c_{тг} \cdot T'_{тг} - K_{кон} \cdot \Delta t_{кон} \cdot F_{кон}}{Q_{кон} \cdot \rho_{тг} \cdot c_{тг}}. \quad (1)$$

Тепловой агент из теплообменника подается в верхнюю часть реактора, в котором температурное поле газовой фазы может быть определено из дифференциального уравнения переноса энергии для движущейся парогазовой среды [6] запишется в виде:

$$\frac{\partial(w_z T)}{\partial z} = \frac{\left[q \cdot k \cdot \rho_м - \alpha\left(T - T_м\big|_{R_м=0}\right)\right] \cdot F^*_м}{c_{\mu.ср} \cdot \rho_{ср}}. \quad (2)$$

При этом в расчетах шаг по координате ∂z из уравнения (2) целесообразно принять равным расстоянию между тарелками реактора. Значение температуры поверхности материала $T_{пов.м}$ определяется из граничных условий для внутренней задачи, причем для каждого следующего шага по координате (т.е. для каждой следующей тарелки) принимается значение температуры поверхности материала, находящегося на выходе из предыдущей вышележащей тарелки.

Для определения температуры материала в процессе термического модифицирования воспользуемся дифференциальным уравнением теплопроводности, записанным в следующей форме (3):

$$\frac{\partial T_м}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T_м}{\partial R_м^{\,2}} + \frac{1}{R_м} \cdot \frac{\partial T_м}{\partial R_м}\right) - k \cdot q \cdot \rho_м \cdot \quad (3)$$

Граничное условие для решения данного дифференциального уравнения может быть представлено в виде (4)следующем виде:

$$\alpha \cdot \left(T - T_м\big|_{R_м=0}\right) - q \cdot k \cdot \rho_м = -\lambda_м \frac{\partial T_м}{\partial R_м}\bigg|_{R_м=0}. \quad (4)$$

Термическая обработка материала происходит с разложением древесной структуры. Описание данного процесса может быть представлено выражением (5)

$$\frac{\partial \rho_м}{\partial \tau} = k \cdot \rho_м \cdot \quad (5)$$

Снижение плотности обрабатываемого материала до заданного значения характеризует необходимое время процесса термического модифицирования.

Время нахождения древесной частицы на одной тарелке (равно как и продолжительность расчета процесса термической обработки частицы на конкретном шаге по координате ∂z в уравнении (2)) складывается из времени движения $\tau_{пути\ i}$ частицы при толкании лопаткой и времени нахождения в покое $\tau_{покоя\ i}$ при сходе с лопатки до подхода следующей.

Рассмотрим траекторию движения одиночной частицы по нечетной тарелке – тарелке с центральным пересыпным отверстием (рис. 2). При вращении мешалки лопатки толкают частицу по спирали к центру тарелки. При этом результирующая мгновенная скорость движения частицы направлена по нормали к лопатке, которая образует с мешалкой угол α:

$$\upsilon_м = \upsilon_{меш} \cdot \cos\alpha$$

Тогда составляющая скорости частицы, направленная по радиусу аппарата запишется в виде уравнения (6)

$$\upsilon_{м.г} = \upsilon_{м} \cdot \cos\alpha = \upsilon_{меш} \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha. \quad (6)$$

Поскольку в расчетах удобнее использовать угловую скорость вращения мешалки (7):

$$\upsilon_{меш} = \omega_{меш} \cdot R, \quad (7)$$

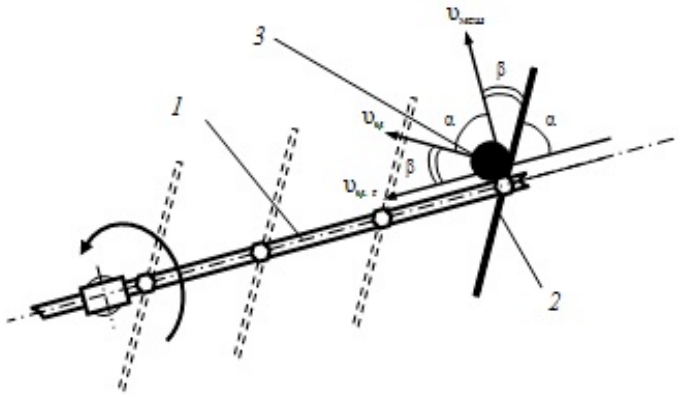


Рис. 2. Вектора скоростей одиночной частицы в процессе работы мешалки: *1* – мешалка; *2* – лопатка; *3* – частица.

тогда:

$$\upsilon_{м.г} = \omega_{меш} \cdot R \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha. \quad (8)$$

Полученное уравнение (8) позволяет определить радиальную составляющую мгновенной скорости $\upsilon_{м.г}$, характеризующую скорость продвижения частицы в направлении центрального пересыпного отверстия в зависимости от положения частицы на тарелке реактора. В этой связи в первом приближении с достаточной для инженерных расчетов точностью для дальнейших вычислений может быть использовано среднее значение $\overline{\upsilon}_{м.г}$ для данной тарелки, определяемое как радиальная составляющая мгновенной скорости для частицы с координатой, равной срединному радиусу тарелки. Тогда, по теореме Лагранжа имеем:

$$\overline{\upsilon}_{м.г} = \frac{\omega_{меш} \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha}{R_{б} - R_{ц}} \left[\left(\frac{R^2}{2} \right) \Bigg|_{R_{ц}}^{R_{б}} \right]. \quad (9)$$

Таким образом, определив по уравнению (9) среднюю составляющую скорости движения частицы по тарелке в направлении пересыпного отверстия и зная длину этого движения, равную кратчайшему расстоянию между проекциями пересыпных отверстий двух смежных тарелок, определяем время нахождения древесной частицы в движении по одной тарелке (10).

$$\tau_{движ} = \frac{\ell_{движ}}{\overline{\upsilon}_{м.г}}. \quad (10)$$

Для определения времени, нахождения частицы в покое между лопатками зададимся уравнением (11):

$$\tau_{покой} = \frac{2\pi}{\omega \cdot n}(i - 1). \quad (11)$$

Отсюда, находим полное время пребывания древесной частицы на одной тарелке

$$\tau_{1тар} = \tau_{движ} + \tau_{покой}.$$

Определив необходимое полное время пребывания частицы в аппарате находим количество тарелок необходимое для термического модифицирования всех частиц:

$$n_{тар} = \frac{\tau_{полн}}{\tau_{1тар}}.$$

Таким образом, расчет предложенной математической модели по заданным геометрическим параметрам аппарата позволяет определить температурное поле теплоносителя и время пребывания частицы в реакторе, необходимое для достижения требуемой степени термической обработки, а также недостающие конструктивные параметры установки: количество тарелок, необходимое число мешалок и лопаток на одной тарелке и т.п., что впоследствии позволит проводить оптимизационные расчеты конструктивной схемы реактора.

Обозначения: Т – температура, К; τ – текущее время, с; Q – количество теплоты, Дж; ρ – плотность, кг/м^3; с – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); К – коэффициент теплопередачи, Дж/(м^2·с·К); Δt – температурный напор, К; F – площадь поверхности, м^2; k – константа скорости химической реакции, сек$^{-1}$; q – удельная теплота химической реакции, Дж/кг; α – коэффициент теплоотдачи, Дж/(м^2 · с · К); F^* - площадь теплоотдающей поверхности, м^2; R’ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); υ – скорость, м/с; α^* – угол установки лопаток на мешалке, град; R – координата частицы (радиус) мм; ω – угловая скорость, об/с; ℓ - длина, мм; n – количество мешалок на тарелке, шт; i – количество лопаток, шт. Индексы: тг – топочные газы; кон – конденсатор; м – материал; ср – среда; меш – мешалка; б – боковой; м.г. – мгновенная; движ – движение; ц – центральный; топ – топка; покой – частица в покое.

Данная работа выполнялась при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (МД – 5596.2016.8).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Р., Разумов Е.Ю.* Технология производства композиционных материалов на основе модифицированных древесных наполнителей. Монография, Казань, КНИТУ, 2015. – 232 с.

2. *Khasanshin R.R., Safin R.R., Razumov E.Y.* High temperature treatment of birch plywood in the sparse environment for the creation of a waterproof construction veneer // Procedia Engineering. 2016. Т. 150. P. 1541-1546.

3. *Сафин Р.Р., Разумов Е.Ю.* Разработка технологий и оборудования термомодифицирования пиломатериалов. Монография, Йошкар-Ола, 2015. 380 с

4. *Кречето, И.В.* Сушка древесины топочными газами. М.: Гослесбумиздат, 1961. 270 с

5. *Тимербаева А.Л., Хасаншин Р.Р., Хазиева Д.Р.* Методика расчета процесса пиролиза древесины с учетом давления среды // Деревообрабатывающая промышленность. 2014. №. 2. С. 47-53.

6. *Лыков А.В.* Тепломассообмен: справочник. М.: Энергия, 1978. 479 с.

УДК 66.011

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБДИФФУЗИОННОГО ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕНОСА
SUBDIFFUSIVE MASS TRANSFER PROCESS MODELLING

Леонид Владимирович Королев, Донат Олегович Бытев
Leonid V. Korolev, Donat O. Bytev

Ярославский государственный технический университет, Россия, Ярославль
Yaroslavl state technical university, Russia, Yaroslavl
(e-mail: korolevlv@mail.ru)

Аннотация: Предложено кинетическое уравнение в форме Колмогорова - Феллера, моделирующее процесс массопереноса в режиме диффузии и субдиффузии. Уравнение является дифференциальным по времени и может применяться для описания нестационарных процессов, сопровождающихся сменой режимов переноса.

Abstract: A Kolmogorov – Feller type kinetic equation is proposed to model mass transfer process in diffusive and subdiffusive modes. The equation is differential in time and can be used to describe nonstationary processes accompanied by changes in the transfer modes.

Ключевые слова: массоперенос, кинетическое уравнение, субдиффузия.

Keywords: mass transfer, kinetic equation, subdiffusion.

Процессы случайного переноса вещества в средах с развитой микроскопической структурой, таких как капиллярно-пористые тела или полидисперсные сыпучие материалы, могут существенно отличаться от классической диффузии. Дело в том, что в подобных средах время установления локально равновесной концентрации переносимых частиц в микрообъеме может быть сравнимо со временем формирования равновесного поля концентрации частиц во всей системе. Процессам массопереноса в таких средах присущи эффекты «памяти», когда особенности первоначального распределения частиц сохраняются на протяжении всего времени наблюдения процесса. Для них характерны субдиффузионные режимы распространения частиц, при которых дисперсия положения частицы растет со временем медленнее, чем линейная функция [1 - 2].

Кинетические уравнения, описывающие эволюцию плотности распределения частиц при наличии таких эффектов, часто строятся на основе модели случайных блужданий с непрерывным временем (Continuous Time Random Walks - CTRW) [1]. В основе этого метода моделирования случайных процессов лежит разложение плотности распределения $f(x,t)$ нахождения частицы в точке x в виде суммы по числу случайных переходов, совершенных частицей к моменту наблюдения t. Эти переходы следуют один за другим в непрерывном времени, что дает возможность записать кинетическое уравнение процесса с помощью линейных интегральных операторов. Ядра операторов выражаются через плотности распределения смещения частицы из точки x' в точку x в результате единичного перехода $W(x|x')$ и длительности интервала между переходами $T(t)$. Формальное суммирование полученного разложения приводит к уравнению:

$$f(x,t)=\left(1-\int_0^t dt' T(t')\right)f_0(x)+\int_0^t dt'\int dx' W(x|x')T(t-t')f(x',t'), \quad (1)$$

где $f_0(x)$ - плотность распределения в начальный момент времени, а символ $\int dx'$ обозначает интегрирование по всему объему среды.

Характер процесса массопереноса, описываемого уравнением (1), определяется средним временем ожидания частицы $<t>=\int_0^\infty T(t)tdt$. Если $<t>$ конечно, то при временах наблюдения $t>>$ уравнение (1) сводится к уравнению Колмогорова - Феллера для

марковского случайного процесса [3]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \int dx' \left(\widetilde{W}(x|x') f(x',t) - \widetilde{W}(x'|x) f(x,t) \right), \tag{2}$$

где $\widetilde{W}(x|x') = W(x|x') / < t >$, а начальное условие имеет вид $f(x, t=0) = f_0(x)$. В тех случаях, когда средняя длина единичного смещения $|x - x'|$ мала по сравнению с характерным размером области массопереноса, разложение функции $f(x',t)$ в правой части уравнения (2) в окрестности точки x приводит к известному дифференциальному уравнению диффузии. При этом дисперсия локального возмущения концентрации частиц $Var(x) \sim t$. Если $< t >$ бесконечно (например, $T(t) \sim t^{-(1+\gamma)}$ при $t \to \infty$ и $0 < \gamma < 1$), то уравнение (1) остается интегральным по времени и описывает субдиффузионный массоперенос с $Var(x) \sim t^{\gamma}$.

Уравнения типа (1) удобно для описания процессов массопереноса в стационарной среде, когда функциональный вид и параметры распределений W и T остаются неизменными в течение всего времени наблюдения. Но при изучении различных систем могут встречаться ситуации, когда условия случайного транспорта частиц изменяются в ходе процесса. Если характерное время этих изменений t_C велико по сравнению с $< t >$, то их можно считать «адиабатическими» и учесть в уравнении (2), вводя соответствующую параметрическую зависимость функции $\widetilde{W}$ от времени t . Если же величина $< t >$ оказывается, как в случае субдиффузии, формально бесконечной (практически – большой по сравнению с t_C), то такой подход применить нельзя. В этом случае асимптотика при $t \to \infty$ плотности $T(t)$ в уравнении (1) определяет не только длительность ожидания очередного случайного перехода частицы, но и вид распределения $f(x,t)$. Другими словами, частица может «почувствовать» изменения среды только по окончании времени ожидания, которое распределено по закону $T(t)$ и может с заметной вероятностью быть сравнимым с t и превышать t_C.

Предлагаемый нами подход к описанию массопереноса в изменяющейся среде с «памятью» основан на формальной замене его марковским процессом с дополнительной фазовой координатой [4]. Эта координата τ определяет время, прошедшее с момента начала последнего по времени ожидания частицы, и может быть названа собственным временем частицы. Этот процесс в расширенном фазовом пространстве $\{x, \tau\}$ может быть описан следующим образом. В каждый малый промежуток времени $(t, t + d\tau)$ при $d\tau \to 0$, частица, находящаяся в момент t в ожидании очередного перехода в точке (x', τ), делает случайный выбор: с вероятностью $1 - q(\tau) d\tau$ остаться в состоянии ожидания или с вероятностью $q(\tau) d\tau$ совершить переход. В первом случае ее координата x' не меняется, а собственное время τ увеличивается на величину $d\tau$. Во втором случае новая координата x выбирается в соответствии с плотностью распределения $W(x|x')$, а собственное время τ становится равным нулю. Кинетическое уравнение для плотности распределения $f(x,\tau,t)$ данного процесса может быть записано в форме Колмогорова – Феллера [3]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial f}{\partial \tau} + \int_0^{\infty} d\tau' \int dx' \left(\widetilde{W}(x,\tau|x',\tau') f(x',\tau',t) - \widetilde{W}(x',\tau'|x,\tau) f(x,\tau,t) \right), \tag{3}$$

$$f(x,\tau,t=0) = f_0(x)\delta(\tau),$$

где $\widetilde{W}(x,\tau|x',\tau') = \delta(\tau) q(\tau') W(x|x')$, $\delta(\tau)$ - дельта – функция. Плотность $f(x,t)$ может быть получена интегрированием решения уравнения (3) по собственному времени τ : $f(x,t) = \int_0^{\infty} f(x,\tau,t) d\tau$.

Функция $q(\tau)$ легко выражается через плотность распределения длительности ожидания T . При данном выше определении собственного времени τ , величину $q(\tau) d\tau$ можно рассматривать как вероятность того, что частица совершит очередной переход в течение промежутка $(\tau, \tau + d\tau)$, найденную при условии, что на промежутке $(0, \tau)$ переходов

не было. Вычисление этой вероятности приводит к следующему результату:

$$q(\tau) = T(\tau) \Big/ \left(1 - \int_0^{\tau} T(\tau')d\tau'\right). \quad (4)$$

Уравнение (3) с учетом (4) и уравнение (1) при одинаковых W и T описывают один и тот же случайный процесс. В этом можно убедиться, если провести формальное разложение в ряд по степеням W решения уравнения (1) и решения уравнения (3) (последнее разложение необходимо проинтегрировать по τ). Заметим, что при выборе экспоненциального распределения длительности интервала между переходами $T(\tau) = < t >^{-1} \exp(-\tau / < t >)$ формула (4) дает $q(\tau) = < t >^{-1}$, а уравнение (3) после интегрирования по τ приобретает вид (2), описывающее марковский случайный процесс. Если принять $T(\tau) = \tau_0^{-1}\gamma(1+\tau/\tau_0)^{-1-\gamma}$, где $0 < \gamma < 1,\ \tau_0$ - параметр, имеющий размерность времени, то, согласно (4), $q(\tau) = \tau_0^{-1}\gamma(1+\tau/\tau_0)^{-1}$, и уравнение (3) будет моделировать субдиффузионный процесс.

Таким образом, в работе предложено кинетическое уравнение (3) типа Колмогорова – Феллера с дополнительной координатой, описывающее как диффузионный, так и субдиффузионный массоперенос. Поскольку это уравнение является дифференциальным по времени и допускает параметрическую зависимость ядра $\tilde{W}$ от t, оно может быть полезно при моделировании нестационарных процессов, в том числе сопровождающихся сменой режимов переноса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чукбар К. В*. Стохастический перенос и дробные производные // ЖЭТФ 1995, т. 108, вып. 5, с. 1875 - 1883.

2. *Королев Л. В., Бытев Д.О.* Случайный перенос в пористой сорбирующей среде // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология, т. 56, вып. 6, 2013 г., с. 86-89

3. *Гардинер К. В.* Стохастические методы в естественных науках М.: Мир, 1986, 538 с.

4. *Вентцель Е. С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1988, 208 с.

УДК 631.3:543.812.08

ВЛАГОМЕТРИЯ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
MOISTURE MEASUREMENTS IN PROCESSES OF DRYING OF PLANT MATERIALS

Юрий Петрович Секанов*, Михаил Александрович Степанов**
Yuriy P. Sekanov* , Mikhail A. Stepanov**

**Российский НИИ сельскохозяйственного приборостроения*
(ОАО «РНИИ «Агроприбор»), Россия, Москва
**Russian Resazch Institute of agricultural instruments, Russia, Moscow*
(e-mail: u.sekanov@gmail.com)
***ООО «Техносерв-менеджмент», Россия, Москва*
***OOO «Technoserv-management», Russia, Moscow*
(e-mail:mastepanov@gmail.com)

Аннотация: Приведены результаты исследований адаптированности к российским культурам, сортам и условиям производства электрических влагомеров зарубежных производителей, делается вывод о необходимости проведения их калибровки.

Abstract: The results of studies of adaptation to Russian crops, varieties and production conditions electric moisture meters manufacturers. The conclusion about the need for their calibration.

Ключевые слова: зерно, влагомеры, объемная плотность, культура, погрешность, качество, управление, зерносушилки.

Keywords: grain moisture meters, bulk density, culture, accuracy, control of the dryer.

Последние 2-3 года сельское хозяйство добивается заметных позитивных результатов. Страна становится экспортером ряда видов сельскохозяйственной продукции. В 2016 году получено 117 млн. т. зерна, что позволяет экспортировать до 40 млн. т. Министерством планируется дальнейшее наращивание производства зерна. Ослабляющим устойчивость этих достижений фактором является то, что они в значительной мере получены с использованием зарубежной техники, технологий и семян. Такое положение вызвано отставанием от мирового уровня в направлениях механизации, электрификации и автоматизации, определяющих состояние научно-технического прогресса в отрасли [1].

В условиях рынка качество реализуемой продукции является главенствующим фактором конкурентоспособности. Заметим, что проблема качества важнейших видов продукции растениеводства еще не получает должного внимания. Как результат невысокое качество зерна [2,3]. На Всероссийском агропромышленном совещании, где подведены итоги работы отрасли в 2016 г., приведены следующие показатели качества пшеницы: доля зерна 3 класса составила 24%, 4-го – 28% и 5-го (фуражного) – 48%.

Повышение качества травяных кормов остается одним из важнейших направлений укрепления кормовой базы. По данным ФГБНУ ВНИИМЖ качество заготавливаемых кормов не отвечает требованиям стандартов: более 50% сена, сенажа, силоса, составляющих свыше 60% кормового баланса, ежегодно относят по результатам анализа к категории некондиционных [4]. Из-за низкого качества основных объемистых кормов расходуется значительное количество зерна на кормление животных.

Качество и безопасность, потери продукции, энергозатраты на ее производство обеспечиваются непосредственно у товаропроизводителя. Поэтому для обеспечения конкурентоспособности проблема совершенствования управления технологическими процессами производства сельскохозяйственной продукции должна получить приоритетное значение. В ряду технических задач совершенствования технологий главной является их оснащение измерительными системами и средствами автоматизации, позволяющими на уровне предприятия принимать оперативные управленческие решения, упреждающие влияние негативных природных и технологических факторов на конечный результат производства. Разрушение индустрии приборостроения, в которой существенную долю занимало создание средств измерений и лабораторного оборудования для агропромышленного комплекса, создало условия для монополизации отечественного рынка приборов разработками зарубежных производителей. Рынок влагометрии растительных материалов в настоящее время занят разработками зарубежных фирм более чем на 90%. Эффективность практического применения импортируемых приборов зависит от достоверности получаемой информации. Поскольку приборы зарубежных фирм проградуированы в условиях, отличных от российских, то имеется высокая вероятность несоответствия заявленных производителем метрологических и эксплуатационных характеристик отечественным материалам и условиям производства.

Влажность зерна, семян, травяных кормов является определяющим параметром в принятии управленческих решений при их сушке и термовлажностной обработке. Сушка на сегодня самый распространенный и энергоемкий способ консервации зерна и семян. На долю сушки приходится по разным источникам от 30 до 50% всех энергозатрат в технологиях послеуборочной обработки зерна. Поскольку искусственной сушке подвергается более 60% свежеубранного зерна, то задача снижения энергозатрат остается одной из важнейших в достижении его конкурентоспособности. Решение этой задачи лежит в совершенствовании режимов сушки, на основе достоверной информации о влажности зерновой массы. Автоматизация режимов сушки позволяет не только снизить затраты топлива в зависимости от типа сушилок от 8 до 20% при повышении производительности оборудования до 15 - 20%, но и повысить качество зерна. Повышение эффективности работы сушилок повышает производительность всей поточной линии обработки зерна [5,6]. Накопленный в управлении этими процессами научный потенциал не всегда качественно

реализуется на практике и не позволяет достичь прогнозируемых на этапе исследований результатов. Главная причина - отсутствие или неудовлетворительные метрологические характеристики применяемых для измерения влажности приборов. Наращивание производства зерна при недостатке очистительной техники и установок для сушки обостряет проблему сохранения влажной, засоренной зерновой массы, скапливаемой на зерноплощадках. Формирование партий зерна равной влажности с целью оперативного определения первоочередной сушки или вентилирования позволяет снизить риск его порчи.

Алгоритм управления в технологиях заготовки кормов сводится к определениям влажности, при которых следует проводить операции ворошения, сгребания, копнения, прессования при заготовке сена или подбору и измельчению подвяленной травы при заготовке силоса и сенажа. В условиях разнообразия технологий заготовки кормов необходимы разные в конструктивном исполнении средства измерений влажности. Рынок предлагает влагомеры с зондовыми датчиками разной длины: Эвлас-6, ИВДМ-2К, Россия; Wile-251, 252, 353, Финляндия; HMM, Польша; Fortester 200, Италия; HMT-2, Bale Check 200, Германия и др. В статье [7] приведены технические характеристики данного типа влагомеров. На результаты измерений этих приборов большое влияние оказывает плотность контролируемых объектов и действия оператора, а применение ограничено разного типа паковками, тюками, рулонами заготавливаемых кормов. Контроль влажности в прокосах и валках зондовыми датчиками создает значительные методические и технические сложности. Поэтому при определении влажности трав в этих случаях в отечественной практике продолжают использовать субъективные оценки. Например, фирма ОАО «Крестьянский дом», производящая технику для заготовки кормов, дает рекомендации по применению таких оценок в руководстве по технологиям. Очевидно, что результаты субъективных оценок зависят от личности эксперта и могут различаться на 10…25% [8]. При такой вариации оценок влажности весьма низкая вероятность получения качественных кормов. Отклонение от рекомендуемых уровней влажности в любую сторону влечет риски: при пересушивании потерям питательных веществ (для сена 30…50% от потери соцветий и листьев); при превышении – порче корма (плесневение, затхлость) при хранении. Продукты жизнедеятельности плесневых грибов (микотоксины) представляют опасность для здоровья животных и человека. Во избежание плесневения травы при заготовке тюков, паковок прессуют при заниженной влажности.

Качество силоса и сенажа определяют сложные физико-химические процессы ферментации, течение которых определяют начальные условия, создаваемые при заготовке и закладке исходного сырья. На практике управление начальными условиями осуществляется изменением уровня провяливания растений, смешиванием трав разной влажности, использованием консервирующих добавок. Достоверная оценка содержания влаги в каждой из компонент исходного сырья является определяющим фактором оптимизации процесса ферментации. Для силоса и сенажа есть оптимальные зоны влажности, выход за которые ведет к потерям питательных веществ. Так, потери питательных веществ с утечкой сока при заготовке кукурузного силоса с влажностью более 70% превышают 10% [9]. Возможность реализации отмеченных технико-технологических и экономических факторов на уровне сельских товаропроизводителей зависит от состояния оснащения технологий средствами измерения влажности.

В настоящей работе приведены результаты проводимых нами в течение ряда лет исследований, широко представленных на российском рынке влагомеров зерна и травяных кормов зарубежных производителей.

Исследования проведены в полном соответствии с инструкциями по эксплуатации приборов с использованием отечественных культур и сортов зерна. В качестве образцовых средств применяли воздушно-тепловую установку СЭШ-3М и инфракрасный термогравиметрический влагомер МА-30 немецкой фирмы «Sartorius», согласно действующим стандартам.

Структура комплекса влагомеров для зерна включает полевые, лабораторные, поточные автоматические и образцовые средства измерения влажности. Погрешность, диапазон и быстродействие измерений являются параметрами, определяющими потребительскую ценность, стоимость и технические решения приборов. Российские требования к параметрам определены в ряде нормативных документов (ГОСТ-ы, ТПр, РД и др.). Самым массовым и наиболее востребованным типом приборов, с помощью которых решают задачи оперативного управления на этапах производства, определяющих качество процессов и, как следствие, качество зерна, являются полевые влагомеры. Возрастающие требования к качеству зерна требуют постоянного внимания разработчиков приборов к повышению их метрологических и эксплуатационных характеристик. Анализ технических и функциональных особенностей современных электрических влагомеров зарубежных производителей показал, что оптимизация влияния объемной плотности зерновой массы, остается главным направлением решения этой задачи. Ее реализация осуществляется следующими способами:

- принудительным уплотнением пробы зерна без разрушения структуры Wile 55, 65, Финляндия; Farm Point, Дания; Twist Grain, Польша; Agti Pro 6095, Швеция и др.;
- разрушением (размолом) с принудительным уплотнением зерна: Wile 78 «The Cruscher», Финляндия; Grain Master, Польша; Super Pro, Farm Pro, Дания; He Lite, Германия и др.;
- произвольной засыпкой нормированной по объему пробы зерна: PM-600, PM-410, Япония;
- самоуплотнением зерна при сбросе с фиксированной высоты: WDN10, Польша; Wile 200, Финляндия; Mini GAC plus, США;
- самоуплотнением нормированной по объему пробы зерна при истечении из дозатора: WZW3P, Польша.

Приборы PM 600, Wile 200, Mini GAC plus, WZW3P оснащены встроенными взвешивающими устройствами, позволяющими получать оценки объемной плотности (натуры) контролируемого зерна и автоматизировать процесс компенсации ее влияния на результаты измерения влажности.

Результаты исследований 11 марок влагомеров, реализующих описанные способы с использованием отечественных культур и сортов зерна, приведены в работах [10, 11, 12]. Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы о соответствии метрологических и эксплуатационных характеристик зарубежных влагомеров зерна российским материалам и условиям производства. Инновационных решений в рассматриваемых способах компенсации влияния объемной плотности по сравнению с разработками последней четверти прошлого столетия практически нет. В этой связи, случайные составляющие погрешности измерений, вызванные действиями операторов, сохраняются во всех способах компенсации влияния объемной плотности. Стремясь минимизировать случайные ошибки от действия операторов финская фирма Farmcomp предприняла попытку реализовать в полевом влагомере Wile 200 алгоритм нормализации измеряемой пробы зерна, применяемый в коммерческом (лабораторном) влагомере GAC-II американской фирмы Dickey-john. Это привело к усложнению и, как следствие, ограничению возможностей использования прибора в полевых условиях, без существенного выигрыша в метрологии.

Внесение влагомеров в реестр средств измерений РФ не является гарантией их метрологического и эксплуатационного соответствия отечественным требованиям. Погрешности всех без исключения приборов превышают заявленные производителями значения, в зависимости от культуры и диапазона измерений в 2-3 раза. Эти оценки получены с использованием чистого зерна. В реальных условиях в зерне даже полной спелости и прошедшем предварительную очистку могут быть недозревшие зерна, зерновые примеси, сорняки, оказывающие существенное влияние на результаты измерений. При достаточно высоком уровне сходимости измерений, воспроизводимость измерений между

приборами даже одной фирмы может достигать нескольких процентов. В качестве примера на рисунке 1 показаны зависимости погрешностей (Δ%) измерений от влажности (W%) зерна пшеницы влагомеров WDM 10 и Grain Master.

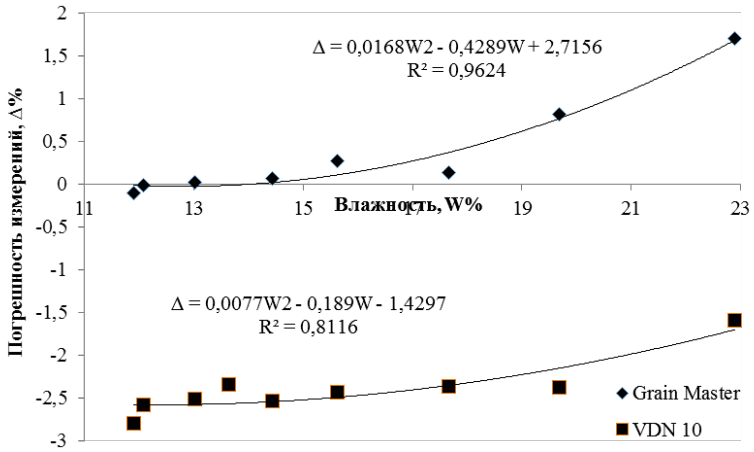


Рис.1 Воспроизводимость результатов измерений приборов с разными способами нормализации объемной плотности материала.

Используемые сельским хозяйством зерносушилки, за редким исключением, оснащены системами регулирования влажности. Главная причина – трудности определения влажности зерна в потоках. Применяемые системы автоматического управления процессом сушки по параметрам сушильного агента и температуры материалов, не обеспечивают устойчивого поддержания требуемого уровня влажности на выходе сушилок. Кроме того, такие системы управления не освобождают пользователя от необходимости контроля влажности поступающего на сушку и высушенного зерна. Производители сушилок предлагают использовать дискретные влагомеры без рекомендаций их характеристик и условий применения. Использование неадаптированных к российским материалам приборов при неудовлетворительном метрологическом сервисе не позволяет достичь высоких технико-экономических показателей зерносушильной техники (производительность, затраты энергоресурсов, качество зерна).

Использование импортных приборов без решения проблем создания отраслевой метрологической инфраструктуры не позволяет выйти на уровень управления производством сельскохозяйственной продукции, обеспечивающей ее конкурентоспособность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.А. Романенко. Сельскохозяйственная наука: вклад в решение задач государственной программы развития сельского хозяйства России //Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2013.- №2.

2. Искусство земледельца – в понимании и реализации потенциала земли //Эффективное животноводство. – 2015.-№12 (121).

3. Правительство просят воссоздать хлебную инспекцию. // Пище Пром Экперт. – 2016.-№31.

4. Н.М. Морозов Инновационная техника и ресурсосберегающие технологии – необходимые условия импортозамещения в животноводстве.- М: Труды ФГБНУ ГОСНИТИ.-2015. – Т.121.

5. Б.Д. Цыдендоржиев. Система управления термовлажностными режимами в шахтных зерносушилках с коробами. Автор. дис. канд. техн. наук. М.: НИИ с.-х. машиностроения им. В.П. Горячкина. – 2003.

6. Н.М. Андрианов. Повышение эффективности процесса сушки путем совершенствования рабочих органов, системы контроля и управления зерновых сушилок. Автор. дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург-Пушкин.-2005.

7. Ю.П. Секанов, Н.В. Андреева, Д.С. Колесников. Особенности применения инфракрасных термогравиметрических установок для определения влажности кормов // Вестник ВНИИМЖ. - 2012. - №2 (6) – с. 134-144.

8. Ю.П. Секанов. Современное состояние науки и практики в области влагометрии кормов // Вестник ГНУ ВНИИМЖ. - 2013. - №3 (11).

9. Ф. Гросс. Пути предотвращения потерь при силосовании кукурузы. – «DIZ – Deutsche landtechnische zeitschrift». т. 34.-1983.-№9 (пер.№70501, ВЦП).

10. Ю.П. Секанов. Метрологические и эксплуатационные характеристики зерновых влагомеров зарубежных производителей.//Сб. науч. докл. «Система технологий и машин для инновационного развития АПК России». Ч. 2.-М.: ГНУ ВИМ, 2013.-С. 250-255.

11. Ю.П. Секанов, М.А. Степанов. Результаты исследований электрических влагомеров с разрушением и сжатием зерна в измерительной ячейке.//Труды Межд. научно-техн. конференции «Проблемы ресурсо и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» - Иваново: ФГБОУ ВПО «ИГХТУ», 2014.-С.84-90.

12. Ю.П. Секанов, Н.В. Андреева, Г.М. Гойхман. Исследование адаптированности зарубежных приборов к отечественным сельскохозяйственным материалам и условиям производства.//Сб. науч. докл. «Инновационные технологии и техника нового поколения – основа модернизации с.х.» Ч. 2.-М.: ВИМ, 2011.-С. 256-264.

УДК 66.03

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ЛИМИТИРУЮЩИХ РАБОТУ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ
ANALYSIS OF FACTORS LIMITING THE OPERATION OF HEAT PIPES

Михаил Павлович Тюрин, Елена Сергеевна Бородина,
Анастасия Игоревна Домбровская
Mikhail P. Tyurin, Elena S. Borodina, Anastasiya I. Dombrovskaya

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

Аннотация: В работе приводится описание основных ограничений работы тепловых труб, таких как ограничение уноса, звуковой предел, капиллярное ограничение, кризис кипения, ограничение по вязкости, и их анализ.

Abstract: The paper describes the main limitations of the operation of heat pipes, such as the entrainment limit, sonic limit, viscous limit, capillary limit, boiling limit, viscous limit, and their analysis.

Ключевые слова: тепловая труба, ограничения работы тепловых труб, теплоперенос

Keywords: heat pipe, operation limits of the heat pipes, heat transfer

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 – 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 A – площадь сечения парового потока; коэффициент f_1 – функция от числа Бонда, Bo; f_2 - от безразмерного параметра K_p, определяемого по формуле:

$$K_p = \frac{P_п}{g(\rho' - \rho'')\sigma_ж^{0.5}},$$
$$f_2 = K_p^{-0.17} \text{ при } K_p \leq 4\times10^4, \quad (3)$$
$$f_2 = 0.165 \text{ при } K_p > 4\times10^4,$$

где $P_п$ – давление пара.

Коэффициент f_3 является функцией от угла наклона термосифона. Если термосифон расположен вертикально, f_3 = 1. Большинство экспериментальных данных по производительности термосифонов показывают, что максимальная теплопередающая способность имеет место, когда термосифон наклонен на 10° - 30° к вертикали.

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].

С.С. Кутателадзе объяснил эти явления как следствие гидродинамической неустойчивости двухфазного пограничного слоя [5, 6].

Согласно С.С. Кутателадзе, критерий устойчивости кипящего пограничного слоя в условиях свободной конвекции, определяется выражением:

$$\text{Ku} = \frac{q_{кр}}{L\sqrt{\rho''}\sqrt[4]{g\sigma(\rho' - \rho'')}}, \quad (4)$$

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 [9 – 11]. 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 [7] 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:

$$V_l > 0.001D(l_и + l_а + l_к), \quad (5)$$

где D – внутренний диаметр корпуса термосифона, $l_и$, $l_а$, $l_к$ – длины испарительного, адиабатного и конденсаторного участков термосифона.

В комплексной работе [8] 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:

$$V = \left[\frac{4(L_c + L_e)}{5} + L_a\right] \times \sqrt[3]{\frac{3Q\mu_L(\pi D)^2}{(\rho_L)^2 g h_{fg}}} + \frac{\pi L_p D^2}{4} \quad (6)$$

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.

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:

$$M = \left(\frac{r_ж \lambda_ж^3 \sigma_ж}{\mu_ж}\right)^{\frac{1}{4}}, \quad (7)$$

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 к полной неработоспособности самой тепловой трубы.

ЛИТЕРАТУРА

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.

4. *Сорокин, Ю. Л.* Критическая скорость пара (газа) для процесса захлебывания в вертикальных трубах / Ю. Л. Сорокин, М. Ю. Сорокин // Энергомашиностроение. – 1985. – № 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. *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.

8. *Groll, M.* Heat recovery units employing reflux heat pipes as components : Final Report, Contract EE-81-133D(B) / M. Groll [et al.] – 1984.

9. *Patil Aniket D., Dr. Yarasu Ravindra B.* Factors Affecting the Thermal Performance of Two Phase Closed Thermosyphon: A Review // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2012. Vol. 2. N 9. P. 202 – 206.

10. *Ong K. S., Tong W. L.* Inclination and Fill Ratio Effects on Water Filled Two-Phase Closed Thermosyphon // Proceedings of 10th international heat pipe symposium, Taipei. 2011. P. 167 – 171.

11. *Yong J. P., Hwan K. K., Chul J. K.* Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon to the fill charge ratio // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2002. N 45. P. 4655 – 4661.

УДК 29.5.14

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФИЛЬТРОВАЛЬНОЙ ПЕРЕГОРОДКИ В ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯТОРЕ ОЧИСТКИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ
THE STUDY OF THE PROPERTIES OF THE FILTRATION PARTITION IN THE ELECTROCOAGULATOR CLEANING GEOTHERMAL HEAT CARRIER

Максим Алексеевич Кипнис*, Антонина Александровна Захарова**
Maxim A. Kipnis, Antonina A. Zaharova****

**Институт электронных управляющих машин имени И.С. Брука, Россия, Москва*
** Institute of electronic control machines after I.S.Bruk, Russia, Moscow.*
(e-mail:kipnis_m@ineum.ru)
***Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина*
***Russian state University after A.N. Kosygina, Russia, Moscow*
(e-mail: htipe-mgudt@yandex.ru)

Аннотация: Проведены исследования свойств фильтровальной перегородки в электрокоагуляторе для извлечения кремнезема из геотермального теплоносителя.

Abstract: The study of the properties of the filtering partition in the electrocoagulator for the extraction of silica from the geothermal coolant was carried out.

Ключевые слова: электрокоагуляция, кремнезем, фильтрование, фильтровальная ткань.
Keywords: Electrocoagulation, silica, filtration, filter cloth.

Стабильное развитие отдаленных регионов России, не соединенных с единой общероссийской энергосистемой, возможно только при надежной работы автономной энергетики с низкой себестоимостью электрической и тепловой энергии.

Для таких регионов как Камчатка, где основная часть энергоресурсов носит привозной характер, перспектива развития местной энергетики заключается в переходе с традиционной углеводородной энергетики на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). В настоящее время стоимость кВт·ч электроэнергии на полуострове остаётся самой высокой в России [1].

Район Камчатки располагает высокоэнтальпийными (выше 850 кДж/кг) подземными ресурсами, которые могут быть использованы для теплоснабжения и выработки электроэнергии на ГеоЭС [2].

Для региона Дальнего Востока России как и для 75 % мировых геотермальных месторождений, подземный теплоноситель представляет собой пароводяную смесь (ПВС). Для остальных месторождений геотермальный теплоноситель характеризуется как сухой или перегретый пар.

При поступлении ПВС на ГеоЭС, она в сепараторе разделяется на пар и воду. Пар поступает на турбину, а вода либо сразу закачивается в скважину реинжекции, либо поступает во второй контур в пароперегреватель органического рабочего тела. Происходит перегрев низкокипящего органического рабочего тела, который циркулирует в контуре со вторичной турбиной, позволяющей получить дополнительное количество электроэнергии.

Водяная фаза имеет высокую минерализацию (до 1500 мг/кг) основную часть которой составляет коллоидный кремнезем. Его концентрация в водяной фазе может достигать 800-900 мг/кг для Верхнее-Мутновского геотермального месторождения [3].

Это приводит к тому, что пересыщенный коллоидный кремнезем при изменении параметров теплоносителя (скорость, давление, температура и т.д.) образует минеральные отложения из жидкой фазы теплоносителя на внутренние поверхности теплоэнергетического оборудования и трубопроводов.

Помимо этого если не производится очистка водяной фазы от кремнезема, происходит образование отложений и в трещинисто-пористой среде пор, что приводит к уменьшению полезного дебета скважины и сокращению её срока эксплуатации.

Для извлечения кремнезема из водяной фазы геотермального теплоносителя предложено устройство (рис.1) [4]. В устройстве реализуются два последовательных процесса: электрокоагуляции и фильтрования.

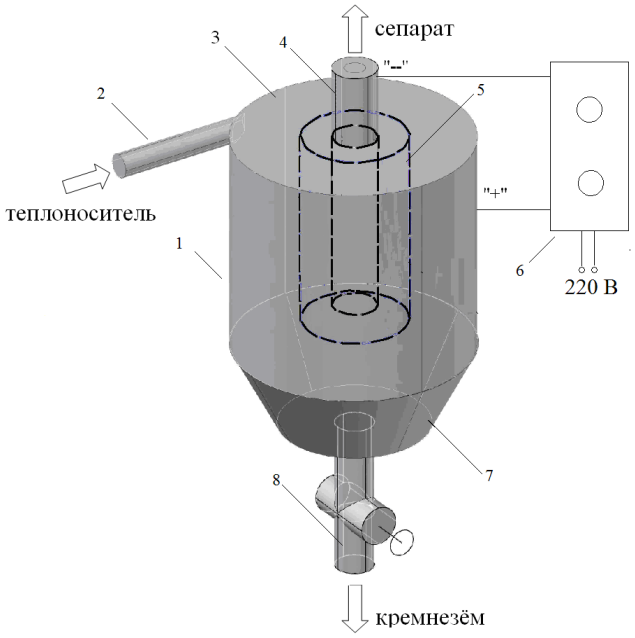


Рис.1. Электрокоагулятор для извлечения кремнезема из геотермального теплоносителя

Водяная фаза геотермального теплоносителя после сепарации поступает через вводной патрубок 2 в электрокоагулятор. С помощью источника питания подается постоянное напряжение на электроды. В роли электродов выступают алюминиевый корпус 1 – анод и выводной патрубок 4 – катод, крепящейся к диэлектрической крышке 3. При наложении электрического поля происходит анодное растворение электрода. Ионы алюминия Al^{3+} образуют с гидроксид ионами нерастворимое соединения гидроксида алюминия, на поверхности которое происходит коагуляция коллоидного кремнезема.

Агрегаты коллоидных частиц, составленных из катионов металла и коллоидных частиц кремнезема при постоянном перепаде давления движутся на фильтровальный патрон 5. Происходит постепенное накопление осадка на поверхности фильтровальной ткани – полульняной парусины толщиной 1 мм, а фильтрат проходит через поры и выводится через выводной патрубок 4. Далее осадок выводится через сливной патрубок 8. Задержание коллоидного кремнезема осуществляется благодаря образованию сводиков из частиц вокруг поры ткани. Происходит задержание частиц имеющих даже меньший размер, чем диаметр пор.

Селективность фильтрования зависит от количества коагулированных коллоидных частиц. Геометрические размеры электрокоагулятора подбирается таким образом, чтобы за время пребывания геотермального теплоносителя в нем происходила наиболее полная электрокоагуляция частиц кремнезема. На скорость фильтрования влияет сопротивление накопленного осадка и гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки.

Сопротивление фильтровальной перегородки определяется размером и удельным количеством пор на фильтровальной поверхности, а также их изменения в процессе фильтрования.

С целью определения перечисленных параметров проведены лабораторные исследования на фильтровальной перегородке.

С помощью тарировочной кривой, по времени прохождения калибровочного объема воды через исследованную площадь фильтровальной поверхности под действием перепада давления, создаваемого вакуумным насосом, получены средние размеры пор. Диаметр пор d сухой мембраны составляет в среднем 1,6 мкм (рис.2). После 2 ч нахождения мембраны в водяной фазе геотермального теплоносителя из-за набухания волокон ткани диаметр пор уменьшается на 2,3 % и составляет 1,57 мкм.

Изменение сечения пор ткани в процессе прохождения через неё суспензии будет влиять на изменение удельной производительности V фильтровальной перегородки (рис.3).

Вследствие набухания материала фильтровальной перегородки её удельная производительность также уменьшается. Как видно из рис.3 удельная производительность перегородки после 2 ч пребывания в суспензии уменьшается на 15 %. Соответственно увеличивается время фильтрования и продолжительность пребывания жидкой фазы геотермального теплоносителя в электрокоагуляторе.

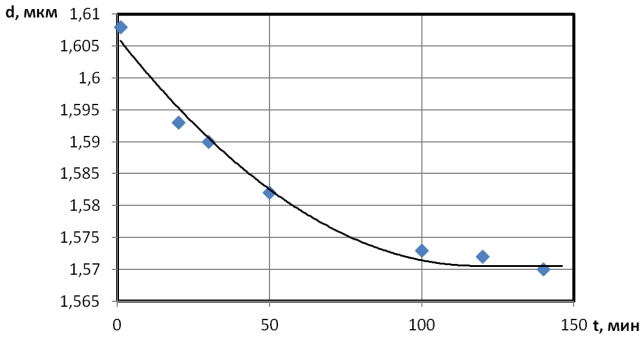


Рис.2 Изменение размеров пор фильтровальной ткани вследствие набухания волокон

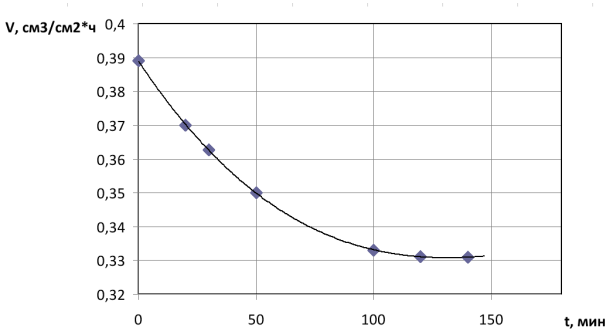


Рис.3 Изменение производительности фильтровальной перегородки вследствие набухания ткани

В заключение статьи следует отметить, что интенсификация развития геотермальной энергетики напрямую связано с повышением надежности и эффективности работы энергооборудования станции. Предложенное устройство позволяет обеспечивать комплексное использование геотермальных ресурсов. Предотвращения образования отложений кремнезема с последующим его использования как вторичного сырья в различных отраслях промышленности. Получены характеристики фильтровальной ткани и их изменение в процессе фильтрования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутяков Н.А., Динмухаметов А.М., Ахметшин Р.С. Чистая электроэнергетика на Камчатке // Молодой ученый. 2015. №4. С.135-139.

2.Томаров Г.В., Никольский А.И., Семенов В.Н., Шипков А.А. Геотермальная энергетики: Справочно-методическое издание. М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетик», 2015. 304 с.

3. Потапов В.В., Зеленков В.Н., Горбач В.А., Кашпура В.Н., Мин Г.М. Извлечение коллоидного кремнезема из гидротермальных растворов мембранными способами. М.: РАЕН, 2006. 228 с.

4. Козляков В.В., Кипнис М.А. Устройство для извлечения кремнезёма из геотермального теплоносителя Патент на полезную модель №152488 Кл. МПК C02A 1/46.

УДК 66.096.5:536.24

ВНЕШНИЙ ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ВИБРОКИПЯЩИМ СЛОЕМ И ПРОДУВАЕМЫМ НАД НИМ ГАЗОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ
THE EXTERNAL HEAT–EXCHANGE BETWEEN VIBROFLUIDIZED BED AND BLOWING ABOVE HIM GAS HEAT–TRANSFER

Борис Георгиевич Сапожников, Анастасия Михайловна Горбунова, Юлия Оттовна Зеленкова, Нина Павловна Ширяева
Boris G. Sapozhnikov, Anastasiya M. Gorbunova, Yuliya O. Zelenkova, Nina P. Shiryaeva

Уральский федеральный университет – УрФУ, Россия, Екатеринбург
Ural Federal University – UrFU, Russia, Ekaterinburg
(e-mail: bgs0910@mail.ru)

Аннотация: приводятся экспериментальные данные по коэффициентам теплоотдачи между виброкипящим слоем и продуваемым над ним газовым теплоносителем в зависимости от его расхода, параметров вибрации и размера частиц.

Abstract: used the experimental data of the heat-exchange coefficients between vibrofluidized bed and blowing above him gas heat-transfer, depending from its expenditure, the vibration parameters and particle size.

Ключевые слова: коэффициенты теплоотдачи, параметры вибрация, расход теплоносителя, сыпучий материал.

Keywords: heat-exchange coefficients, vibration parameters, expenditure of the heat-transfer, loose material.

Для интенсификации тепло- и массообменных процессов, и в частности, сушки сыпучих материалов, широко используются подвижные дисперсные системы с активными гидродинамическими режимами, к которым относится и виброкипящий слой [1]. При этом для проведения сушки используются разные способы подачи теплоносителя [2, 3], среди которых, например, в аппаратах лоткового типа, определенные преимущества наблюдаются при организации подачи над поверхностью виброкипящего слоя [3, с. 287-291]. Физической основой такого способа является то, что в виброкипящем слое возникают неустановившиеся потоки газовой среды, проникающие и в наслоевое пространство, приводящие к значительной интенсификации процессов тепло- и массообмена между виброкипящим слоем и продуваемым над ним газом.

Исследование внешнего теплообмена между виброкипящим слоем и продуваемым над ним газовым теплоносителем проводилось в аппарате диаметром 100 мм и высотой 160 мм. В качестве дисперсного материала применялись частицы корунда узких фракций диаметром d_T = 0,07÷0,63 мм. Высота слоя в опытах H_0 составляла 80 и 120 мм. Параметры вертикально направленной вибрации изменялись: частота f от 30 до 60 Гц, амплитуда A от 0,3 до 2,0 мм. При этом относительное ускорение вибрации K не превышало 15. Кроме того, учитывая замкнутость объема, измерялось давление газа над слоем [4]. Высота надслоевого пространства $H_Н$ во всех опытах составляла 40 мм. В качестве теплоносителя использовался предварительно нагретый воздух с объемным расходом до нагревателя $V_В$ от 0,5 до 1,1 м^3/ч. Дно аппарата охлаждалось проточной водой.

Применялась стационарная методика. Коэффициенты теплоотдачи α между продуваемым теплоносителем и поверхностью виброкипящего слоя рассчитывались по уравнению Ньютона-Рихмана. Ввиду сложности определения поверхности частиц, находящихся в верхней части слоя и непосредственно участвующих в теплообмене, коэффициент теплоотдачи относился к единице поверхности зеркала слоя [4].

О влиянии амплитуды вибрации на межфазный теплообмен можно судить по данным на рис. 1 (кривые 1– 4). На рисунке видно, что с увеличением амплитуды при прочих равных условиях коэффициенты теплоотдачи монотонно возрастают, причем интенсивность роста коэффициентов α убывает с увеличением размеров частиц (кривые, соответствующие слою из частиц большего размера, располагаются ниже).

Для объяснения установленных закономерностей можно использовать литературные сведения о влиянии надслоевого пространства и амплитуды вибрации на гидродинамику виброкипящего слоя. Согласно экспериментальным данным [4, 5] с ростом амплитуды вибрации пульсации скорости газовых потоков, возникающих в виброслое, монотонно увеличиваются как внутри слоя, так и с приближением к его свободной поверхности. Бóльшим пульсациям скорости соответствует более интенсивный массообмен между слоем и надслоевым пространством, приводящий к соответствующему изменению коэффициентов α.

Ограниченность размеров надслоевой камеры вносит свои коррективы, так в данных исследованиях высота надслоев $H_Н = (0.33–0,5)\cdot H_0$, поэтому согласно[6], пульсации давления газа уменьшаются, а это приводит в свою очередь к снижению интенсивности теплоотдачи.

На рис. 1 приведены также данные о влиянии частоты вибрации (кривые 1'–3'). Известно [6], что для такой системы, как виброкипящий слой, возможны резонансные режимы, при которых всех характеристики, в том числе и коэффициенты теплоотдачи, с изменением частоты должны проходить через максимум.

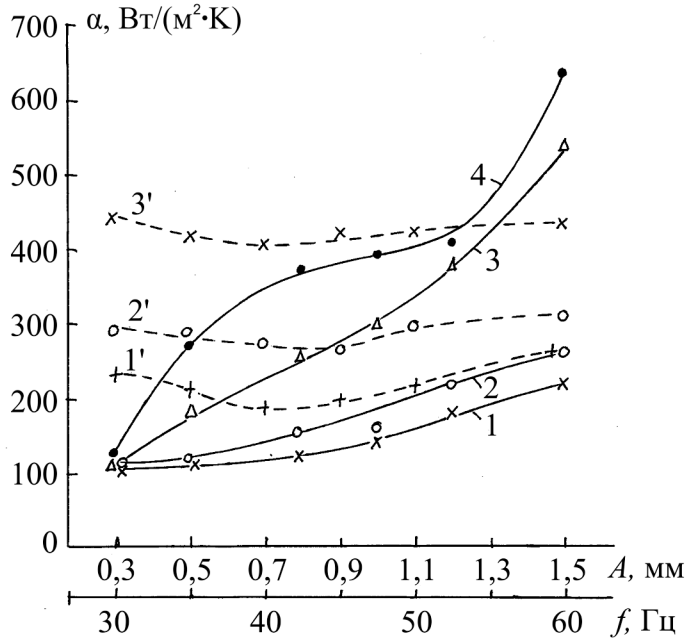


Рис. 1. Зависимость коэф-фициента теплоотдачи α от амплитуды *A* (кривые 1–4) и частоты вибрации *f* (кривые 1'–3'), $V_В$ = 0,9 м³/ч; кривые 1–4, *f* = 40 Гц, H_0 = 80 мм: 1 – $d_Т$ = 0,07 мм; 2 – $d_Т$ = 0,16 мм; 3 – $d_Т$ = 0,32 мм; 4 – $d_Т$ = 0,63 мм; кривые 1'–3', H_0 = 120 мм, $d_Т$ = 0,16 мм: 1' – *A* = 0,5 мм; 2' – *A* = 0,8 мм; 3' – *A* = 1,2 мм

Но в данных исследованиях при высоте засыпки $H_0 \geq 80$ мм резонансные частоты меньше 30 Гц, следовательно режимы были зарезо-нансными, отсюда и слабая зависимость в данных исследованиях коэффициентов теплоотдачи α от частоты вибрации (кривые 1'–3').

При анализе рис. 1 (кривые 1-4) отмечалось существенное влияние на интенсивность межфазного теплообмена размера частиц слоя, о чем более детально можно судить по данным на рис.2 и 3, представленным в полулогарифмических координатах в виде зависимостей $\alpha = \varphi(d_Т)$.

Это связано с тем, что от размера частиц (при $d_Т < 1{,}0$ мм) в большей степени, чем от других факторов, зависит уровень взаимодействия газовой и твердой фаз, определяющий особенности и интенсивность процессов, протекающих в виброкипящем слое. Отсюда и стремление некоторых авторов (например, [7]) ориентироваться на величину $d_Т$, как один из важнейших классификационных признаков виброкипящих слоев: мелкодисперсные ($d_Т$ = 0,05–0,2 мм), среднезернистые (0,2–0,5 мм) и крупнозернистые (0,5–1,5 мм). Этим и объясняется наблюдаемый характер изменения коэффициентов α с увеличением $d_Т$.

В слое частиц $d_Т$ = 0,07 и 0,16 мм более высокий уровень взаимодействия твердой и газообразной фаз приводит к появлению фонтанирующего режима, который при достаточно больших амплитудах сопровождается выбросами материала в надслоевое пространство, что приводит к высоким значениям коэффициентов α, достигающим для частиц 0,07 мм порядка 650–950 Вт/(м^2·К) (рис. 2 и 3, кривые 4 и5 соответственно).

В слоях частиц $d_Т$ = 0,32 и 0,63 мм виброкипящий слой переходит от фонтанирующего к взвешенному и виброподвижному, где начинает преобладать инерционный механизм виброожижения, что приводит к снижению коэффициентов теплоотдачи даже при высоких амплитудах вибрации (рис.2, кривые 1–4 и рис. 3, кривые 1–5 при $d_Т$ = 0,32 и 0,63 мм).

Кроме того, на рис. 2 приведены данные о влиянии расхода теплоносителя на теплообмен (кривые 1'–3'). На рисунке видно, что коэффициенты теплоотдачи к слою мелко-дисперсных частиц ($d_Т \leq 0.16$ мм, кривые 1'–3') с увеличением расхода воздуха несколько уменьшаются, а к слою средне- и крупнозернистых частиц ($d_Т \geq 0.32$ мм) практически оставались неизменными [4].

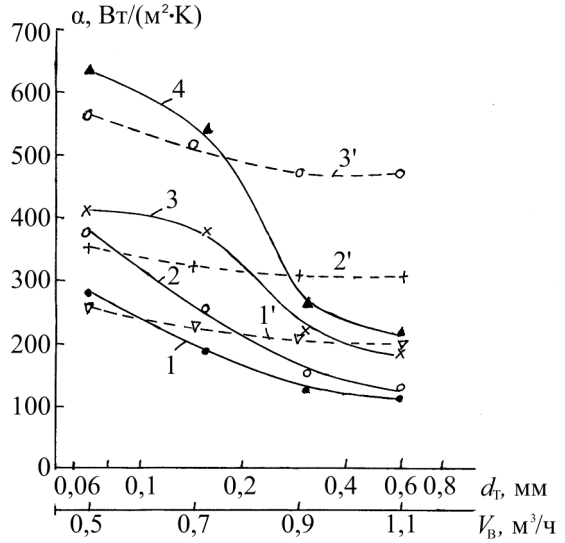


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от диаметра частиц слоя $d_т$ (кривые 1–4) и от расхода воздуха $V_в$ (кривые 1'–3'), f = 40Гц; кривые 1–4, H_0 = 80 мм, $V_в$ = 0.9 м³/ч: 1 – A = 0,5 мм; 2 – 0,8; 3 – 1,2; 4 – 1,5; кривые 1'–3', H_0 = 120 мм, $d_т$ = 0,16 мм, $t_в$ =55– 62⁰С: 1' – A = 0,5 мм; 2' – A = 0,8 мм; 3' – A = 1,2 мм; $t_в$ – температура воздуха в камере над слоем

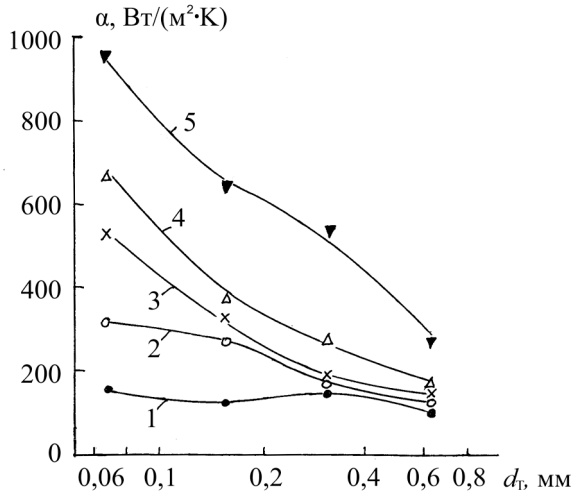


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от диаметра частиц $d_т$ слоя, f = 40Гц, H_0 = 120 мм, $V_в$ = 0.9 м³/ч: 1 – A = 0,3 мм; 2 – 0,5; 3 – 1,0; 4 – 1,5; 5 – 2,0

Проведенный анализ экспериментальных данных позволил установить, что в условиях зарезонансных режимов влияние частоты вибрации несущественно. Незначительно и влияние расхода теплоносителя (его скорость над слоем составляла 0,05–0,1 м/с) Поэтому обработка результатов проводилась в виде эмпирических уравнений $\alpha = \psi(A, d_т)$, приведенных ниже:

при $d_т$ = 0,07 мм $\quad \alpha = 50 + 55,4A \cdot d_т^{-0,75}$;

при $d_т$ = 0,16–0,63 мм $\quad \alpha = 37 + 55,4A \cdot d_т^{-0,89}$,

со среднеквадратичной погрешностью 12%. Формулы справедливы при f = 40–50 Гц, H_0 = 80–120 мм, A = 0,3–2,0 мм, $V_в$ = 0,5–1,1 м³/ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Членов В.А. Виброкипящий слой / В.А. Членов, Н.В. Михайлов. М.: Наука, 1972. 326 с.

2. Членов В.А. Сушка сыпучих материалов в виброкипящем слое / В.А. Членов, Н.В. Михайлов. М.: Изд-во литературы по строительству, 1967. 224 с.

3. Псевдоожижение / Под ред. В.Г. Айнштейна, А.П. Баскакова. М.: Химия, 1991. 400 с.

4. Зеленкова Ю.О., Сапожников Б.Г. Воздействие вибрации на теплотехнологические процессы в сыпучих материалах // Вибрационные машины и технологии. Сб. научн. трудов. Вып. 2. Курский политехн. институт. Курск. 1993. С. 144-150.

5. Сапожников Б.Г. Влияние газовой среды и возникающих естественных газовых струй на процессы теплообмена в виброкипящем слое / Б.Г. Сапожников, Ю.О. Зеленкова, А. Н. Калиберда, Г.Б. Сапожников, А.М. Сивкова, Н.П. Ширяева //Теплофизика и теплоэнергетика: сб. науч. статей. Магнитогорск: МаГУ, 2010. С. 16-23.

6. Колпаков А.С. Резонансные режимы виброожижения мелкодисперсных порошков и их использования в технологических процессах термической и химико-термической обработки. Дис. … докт. техн. наук. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. 416 с.

7. Рыжков А.Ф. Гидродинамика и массотеплоперенос в виброожиженных дисперсных системах. Дис. … докт. техн. наук. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 1990. 407 с.

УДК 665.3

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ РАПСОВОГО МАСЛА НА ОДНОШНЕКОВОМ МАСЛОПРЕССЕ
INVESTIGATION OF KINETIC DEPENDENCIES OF PROCESS OF OBTAINING RAPE OIL ON ONE-WHEAT OIL PRESS

Максим Васильевич Копылов*, Инэсса Николаевна Болгова*,
Артем Александрович Аникин, Анастасия Викторовна Горбатова***
Maksim V. Kopylov*, Inessa N. Bolgova*, Artem A. Anikin, Anastasiya V. Gorbatova***

**Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, Воронеж*
**The Voronezh state university of engineering technologies, Russia, Voronezh*
(e-mail: kopylov-maks@yandex.ru)
***Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж*
*** Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy. prof. N.E. Zhukovsky and Y. Gagarin", Russia, Voronezh*

Аннотация: Представлены оптимальные параметры одношнекового маслопресса для отжима рапсового масла методом холодного прессования, проведены исследования по определению остаточной масличности после первого и второго прессования, а также изучены зависимости влияния физических характеристик на процесс отжима.

Abstract: Optimum parameters of a single-screw oilpress for pressing of rapeseed oil by cold pressing method are presented, researches on determination of residual oiliness after the first and second pressing are carried out, and also dependences of influence of physical characteristics on the pressing process are studied.

Ключевые слова: кинетические зависимости, рапсовое масло, одношнековый маслопресс.

Keywords: Kinetic dependencies, rapeseed oil, single screw oilpress.

Исследование влияния шнекового прессования растительных масличных культур (семян рапса) на процесс извлечения масла и качественные характеристики готовых продуктов, позволяет глубоко оценить и понять физические характеристики рассматриваемого процесса.

С помощью метода холодного прессования были определены основные оптимальные геометрические и физические значения для извлечения рапсового масла в результате проведения серии экспериментальных исследований. Была установлена оптимальная величина зазора между зеерными пластинами в камере отжима масла составившая 0,15…0,2 мм. При увеличении величины зазора между зеерными пластинами, происходит продавливание мезги, которая попадает непосредственно в отжимаемое масло. При этом была выявлена взаимосвязь температуры в камере извлечения масла от частоты вращения шнека и величины щелевого зазора между шнеком и камерой (т.е. величина толщины лепестка жмыха). Подобраны оптимальные параметры маслопресса: величина щелевого зазора камеры извлечения масла – 0,7…0,9 мм; частота вращения шнека маслопресса 5…7$с^{-1}$, при этом температура составляет 320…330 К. Выход масла при указанных параметрах был максимальный. При больших частотах вращения шнека за счет эффекта диссипации происходит разогрев камеры извлечения масла и температура возрастает более 340 К, что не допускается для получения растительных масел холодным прессованием, т. к. в результате при данной температуре происходит разложение витаминов и ненасыщенных жирных кислот, которые являются незаменимыми для человеческого организма.

Экспериментальным способом была определена масличность после форпрессования масличного сырья (первичного), (таблица 1). Эксперимент проводился с частотой вращения

шнека 6 $с^{-1}$, в температурном диапазоне 310…330 К. При анализе полученных данных видно, что с возрастанием температуры остаточная масличность в жмыхе постепенно уменьшается.

Остаточная масличность после первичного прессования на маслопрессах промышленного типа ПХП-100, ПХП-200, ПХП-500 составляет 12…20 %.

Таблица 1. Величины остаточной масличности после первичного прессования растительного сырья с частотой вращения шнека 6 $с^{-1}$

№ опыта	Влажность, ω, %	Вид сырья	Температура, Т, К	Масличность после отжима, М, %
1	7,35	Семена рапса	313	18,24
2	7,35	Семена рапса	318	18,04
3	7,35	Семена рапса	323	17,89
4	7,35	Семена рапса	328	17,81
5	7,35	Семена рапса	333	17,67

Проведение процесса отжима растительного масла с учетом подпрессовывания дает синергетический эффект, что в результате приводит к увеличению извлечения растительного масла, и положительно сказывается на качественных характеристиках хранимоспособности жмыха.

Для выявления этих закономерностей были экспериментально определены следующие показатели: плотность прессуемого материала и его масличность. Прессованию подвергалась мезга из семян рапса. Перед прессованием масличное сырье проходило влаготермическую обработку для достижения необходимых рекомендуемых параметров прессования. Подготовленная таким образом мезга прессовалась на лабораторном маслопрессе с отводом выделяющегося масла.

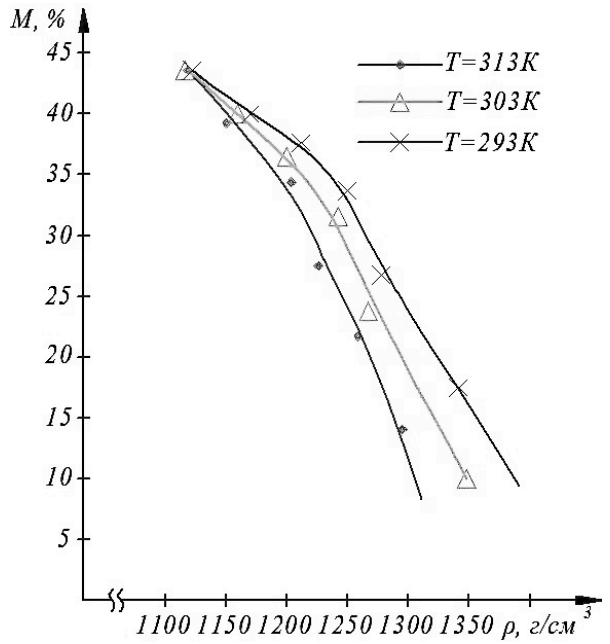


Рис. 1. Влияние плотности прессуемой мезги на ее масличность в зависимости от температуры.

В каждом последующем опыте давление в маслопрессе увеличивали за счет уменьшения величины щелевого зазора выхода жмыха, с целью увеличения плотности в мезге. Затем камера извлечения масла снималась, а уплотненный материал снимался со шнековых витков [1, 4].

Для каждого образца определялась плотность материала и его масличность. Все полученные экспериментальные данные в виде графических зависимостей представлены на рис. 1 [1, 2].

Таким образом, было установлено что, параметры маслопресса влияют на отток жидкой фазы из масличного сырья, варьируя ими, можно получить такое соотношение, при котором отток масла будет наибольшим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко, В.Н. Математическая модель движения сырья в шнековом канале маслопресса [Текст] / В.Н. Василенко, М.В. Копылов, Л.И. Фролова, И.В. Драган // Вестник ВГУИТ, 2013. – № 3. – С. 18-22.

2. Василенко, В.Н. Создание САПР «Маслопресс» [Текст] / В.Н. Василенко, М.В. Копылов, А.В. Накрайникова // Вестник Машиностроения, 2012. – № 2. – С. 35-36.

3. Остриков, А.Н. Новое в технологии купажирования растительных масел [Текст]: монография / А.Н. Остриков, В.Н. Василенко, Л.Н. Фролова, М.В. Копылов; Воронеж. гос. ун-т инж. тех. – Воронеж: ВГУИТ, 2013. – С. 225.

4. Копылов, М.В. Совершенствование процесса холодного прессования растительных масличных культур с последующим купажированием: дис. … канд. техн. наук / Копылов М. В. -Воронеж, 2013. -210 с.

УДК 664:542.69:621.867.4

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДСТАРТЕРНЫХ КОМБИКОРМОВ ЗА СЧЕТ ВЛАГОТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНОВЫХ
INCREASE OF EFFICIENCY OF PREDATURE-MEETING FODDER BY THE ACCOUNT WATER-HEAT TREATMENT OF CEREALS

Валерий Андреевич Афанасьев, Владимир Владимирович Мануйлов
Valery A. Afanasyev, Vladimir V. Manuilov

Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, Воронеж
Voronezh state university of engineering technologies, Russia, Voronezh
(e-mail: oan@vsuet.ru)

Аннотация. Для эффективного расходования комбикормов разработана технология плющенных зерен, заключающаяся в увлажнении, пропаривании, плющении и сушке зерна с целью повышения их усвояемости.

Annotation. For effective consumption of mixed fodders, the technology of flattened grains has been developed, consisting of moistening, steaming, flattening and drying the grain in order to increase their digestibility.

Ключевые слова: технология, зерновые хлопья, гидротермическая обработка, плющение, сушка, комбикорм.

Keywords: technology, cereal flakes, hydrothermal processing, flattening, drying, compound feed.

Влаготепловая обработка зерна с последующим плющением способствует улучшению вкусовых качеств и поедаемости корма, повышает питательную ценность углеводного и протеинового комплексов, снижает затраты организма на переваривание питательных веществ корма, позволяет инактивировать антипитательные вещества и очистить зерно от патогенной и иной микрофлоры [1].

В качестве объекта исследований были использованы шелушенные и нешелушенные ячмень и овес, пшеница, кукуруза и горох. Увлажнение зерна осуществляли водой при изменении ее начальной температуры от 20 до 100 ^{o}C и длительности обработки – от 1 до 10 мин. Зерна исследуемых культур увлажняли до следующих значений влажности: шелушенный ячмень –15-17 %; шелушенный овес – 13-15 %; пшеница – 16-17 %; кукуруза – 18-20 %; ячмень – 16-17 %; овес – 14-15 %; горох – 17-19 %. Затем осуществляли отволаживание, продолжительность которого составляла 2-3 часа для пшеницы, шелушеных ячменя и овса; – 3-4 часа для ячменя и овса и 4-6 часов – для кукурузы и гороха.

Установлено, что длительность пропаривания и расход пара увеличивают степень клейстеризации крахмала (табл. 1). Так, после плющения ячменя, пропаренного в течение 1 минуты, степень клейстеризации крахмала в хлопьях увеличилась до 33-40 %, в процессе пропаривания ячменя в течение 30 минут – составила 36-40 %, а после плющения – 54-60 %. Только после пропаривания в течение 60 минут и последующего плющения степень клейстеризации крахмала достигла сначала 83-89 %, затем после плющения – 100 %.

Кроме того, пропаривание и плющение оказывают влияние на процесс переваримость крахмала. Как показали результаты исследований, процесс переваримости крахмала in vitro

длится не менее 5 часов. Как для необработанного, так и для пропаренного ячменя наибольшее количество глюкозы при гидролизе в присутствии глюкоамилазы образуется в первые 1-2 часа реакции, то есть процесс протекает с затуханием во времени. Если в первый час выделилось от 100 до 200 мг/г глюкозы, то на пятом часу ее количество составило 10-20 мг/г, то есть процесс гидролиза практически прекратился.

Показатели качества хлопьев в сравнении с исходным зерном – в таблице 2. Анализ данных таблицы 2 показывает, что в хлопьях содержание растворимых углеводов увеличивается на 25,7-43,5 % по сравнению с исходным зерном. Отмечается также увеличение атакуемости крахмала глюкоамилазой на 33,4-63,4 % после плющения зерна пшеницы, ячменя, овса и гороха. Следует отметить, что атакуемость крахмала кукурузы после обработки возросла более, чем в 3 раза.

Кроме того, тепловая обработка улучшает санитарное состояние зерна. Так, общая бактериальная обсемененность зерна после обработки его путем увлажнения, пропаривания и плющения снизилась с 89360-434220 м.к./г до 1787-24505 м.к./г, или на 94,2-98,0 %, а общая обсемененность спорами микроскопических грибов – с 188-1680 сп./г до 3,5-99,1 сп./г, или на 94,1-98,9 %.

Отмечается общее повышение переваримости крахмала с увеличением длительности пропаривания ячменя перед его плющением. В целом переваримость in vitro крахмала ячменя, плющенного после обработки паром при атмосферном давлении, повышается по сравнению с исходным зерном в два раза.

Проведены исследования по выявлению влияния степени клейстеризации крахмала на его переваримость. Полученные результаты показали, что количество образующейся глюкозы при ферментативном гидролизе крахмала за одинаковый промежуток времени в более клейстеризованном зерне больше по сравнению с менее клейстеризованным [2].

При этом следует отметить, что для хлопьев с большей степенью клестеризации длительность гидролиза сокращается до 4 часов. В количественном выражении через 5 часов гидролиза исходного зерна образовалось 140 мг/г глюкозы; хлопьев из ячменя, имеющего степень клейстеризации крахмала 50 % – 270 мг/г; хлопьев из ячменя со степенью клейстеризации 100 % – 500 мг/г. Таким образом, по сравнению с исходным ячменем скорость переваримости крахмала хлопьев из пропаренного ячменя с высокой степенью клейстеризации повышается в 2,0-3,5 раза.

Таблица 1 – Изменение степени клейстеризации крахмала ячменя от длительности обработки паром и его расхода

Показатели	Длительность пропаривания, мин							
	1	3	5	7	10	20	30	60
Расход пара 20 кг/ч								
Степень клейстеризации крахмала, %:								
после пропаривания	-	3	5	8	13	25	38	83
после плющения	36	43	47	49	50	58	60	100
Расход пара 30 кг/ч								
Степень клейстеризации крахмала, %:								
после пропаривания	-	3	7	6	12	25	26	85
после плющения	38	45	48	49	53	55	60	100
Расход пара 40 кг/ч								
Степень клейстеризации крахмала, %:								
после пропаривания	-	3	6	8	12	23	40	86
после плющения	40	45	48	49	54	56	60	100

Таблица 2 – Показатели качества хлопьев, полученных увлажнением, пропариванием и плющением зерна

Наименование продукта	Влажность, %	Содержание растворимых углеводов		Атакуемость крахмала глюкоамилазой		Общая бактериальная обсемененность		Общая грибная обсемененность	
		%	% к исход.	мг/г	% к исход.	м.к./г	% к исход.	сп./г	% к исход.
Пшеница	11,6	4,2	100,0	69,1	100,0	119400	100,0	320,0	100,0
Хлопья пшеничные	14,0	5,6	133,3	101,6	147,0	5015	4,2	3,5	1,1
Ячмень	12,2	4,3	100,0	53,0	100,0	371140	100,0	1680	100,0
Хлопья ячменные	13,8	5,8	134,9	86,6	163,4	19928	5,1	99,1	5,9
Кукуруза	13,4	3,9	100,0	40,0	100,0	125700	100,0	1114	100,0
Хлопья кукурузные	10,8	5,6	143,5	131,4	328,5	4777	3,8	44,6	4,0
Овес	11,0	3,5	100,0	56,3	100,0	422500	100,0	1380	100,0
Хлопья овсяные	12,8	4,4	125,7	77,1	136,9	24505	5,8	71,8	5,2

Причем, крахмал хлопьев из пропаренного ячменя со 100 % степенью клейстеризацией расщепляется с образованием глюкозы в течение 4 часов. То есть хлопья, полученные из пропаренного ячменя с высокой степенью клейстеризации, имеют лучшую переваримость крахмала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев, В. А. Энерго- и ресурсосберегающие технологии комбикормов / В. А. Афанасьев; Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж : ВГУИТ, 2017. – 473 с.

2. Афанасьев, В.А. Приоритетные методы тепловой обработки зерновых компонентов в технологии комбикормов / В. А. Афанасьев, А. Н. Остриков. – Воронеж : 2015. – 336 с.

УДК 66.03

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЗАКРЫТЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕРМОСИФОНОВ
ENGINEERING METHOD OF ANALYSIS CLOSED TWO-PHASE THERMOSYPHONS

Михаил Павлович Тюрин, Елена Сергеевна Бородина, Анастасия Игоревна Домбровская
Mikhail P. Tyurin, Elena S. Borodina, Anastasiya I. Dombrovskaya

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

Аннотация: В статье приводится алгоритм и инженерный метод расчета закрытого двухфазного термосифона и результат расчета типового аппарата.

Abstract: The paper presents the algorithm and engineering method of analysis closed two-phase thermosyphon and results of calculating typical apparatus

Ключевые слова: закрытый двухфазный термосифон, химическая технология, энергосберегающие технологии, инженерный метод расчета

Keywords: two-phase closed thermosyphon, chemical technology, energy-saving technologies, engineering calculation method

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. В связи с этим большое значение имеет разработка инженерных методов их расчёта.

Процесс проектирования термосифона для конкретных условий эксплуатации должен включать в себя четыре общих этапа:

1. Подбор подходящих типа и геометрии испарителя и конденсатора;
2. Выбор возможных теплоносителей и конструкционных материалов;
3. Определение ограничений работоспособности;
4. Определение фактической производительности и геометрических характеристик термосифона.

Первые два этапа связаны с конкретными условиями эксплуатации термосифона и определяются параметрами исходных теплоносителей и их свойствами. При этом при выборе промежуточного теплоносителя необходимо учитывать, что кипение промежуточного теплоносителя в термосифоне должно проходить в пузырьковом режиме. Определение ограничений работоспособности включают в себя: ограничение уноса, кризис кипения и ограничение скорости звука, и на методику теплового и гидродинамического расчёта не влияют. Здесь же рассмотрим последний пункт: определение фактической производительности и геометрических характеристик термосифона на примере ЗДТ при его использовании для нагрева пищевых фосфатов теплотой топочных газов для реальных условий завода «РЕАТЭКС» [1, 2].

Целью инженерного расчета в нашем случае является определение фактической производительности и геометрических характеристик термосифона, обеспечивающих требуемый нагрев нагреваемого теплоносителя (растворов пищевых фосфатов) греющим теплоносителем (топочными газами) при их определенном расходе.

Инженерные методы расчета базируются на уравнениях теплового баланса, отражающих равенство потоков теплоты, воспринимаемых испарителем и передаваемых конденсатору в данной конструкции закрытого двухфазного термосифона. Равенство тепловых потоков основывается на конструктивных особенностях термосифона, в котором практически отсутствует переходная зона между испарителем и конденсатором, которая условно принята адиабатной (ее длина составляет всего 1 % по отношению к длине рабочей части термосифона).

Таким образом, можно записать $Q_{\text{исп}} \approx Q_{\text{кон}}$,

Учитывая, что $\alpha_4 \gg \lambda_{\text{ст}}/\delta_{\text{ст}} \gg \alpha_3$, в первом приближении можно записать

$$Q = \alpha_3 \cdot F_2 \cdot \Delta t_1 = k_1 \cdot F_1 \cdot \Delta t_2,$$
$$\Delta t_1 + \Delta t_2 \approx t_{\text{г}} - t_{\text{ж}} \quad (1)$$
$$\Delta t_1 = t_{\text{г}} - t_{s1}; \Delta t_2 = t_{s2} - t_{\text{ж}};\ \ t_{s1} \approx t_{s2}$$

где $t_{\text{г}}$ – средняя температура топочных газов; t_{s1} - температура насыщенного пара в испарителе; t_{s2} - температура насыщенного пара в конденсаторе; $t_{\text{ж}}$ – средняя температура раствора в нагревательном баке; k_1 – коэффициент теплопередачи от пара к нагреваемому раствору фосфатов; F_1 –площадь поверхности конденсатора; F_2 –площадь наружной поверхности испарителя.

С другой стороны, количество теплоты, требуемое для нагрева раствора, определяется из соотношения

$$Q = m_{\text{р}} \cdot c_{\text{р}} \cdot \Delta t_{\text{р}} + Q_{\text{пот}} \quad (2)$$

Отсюда находим требуемое количество теплоты Q и затем определяем в первом приближении значения F_1, находим длину и диаметр термосифона и округляем их до значений, соответствующих конструктивным особенностям установки.

Далее из известных критериальных уравнений определяем значение величины коэффициента теплоотдачи от потока топочных газов к стенке испарителя термосифона α_3 и определяем площадь F_2 испарителя, его длину и диаметр.

Алгоритм расчета двухфазного закрытого термосифона представлен на рисунке 1.

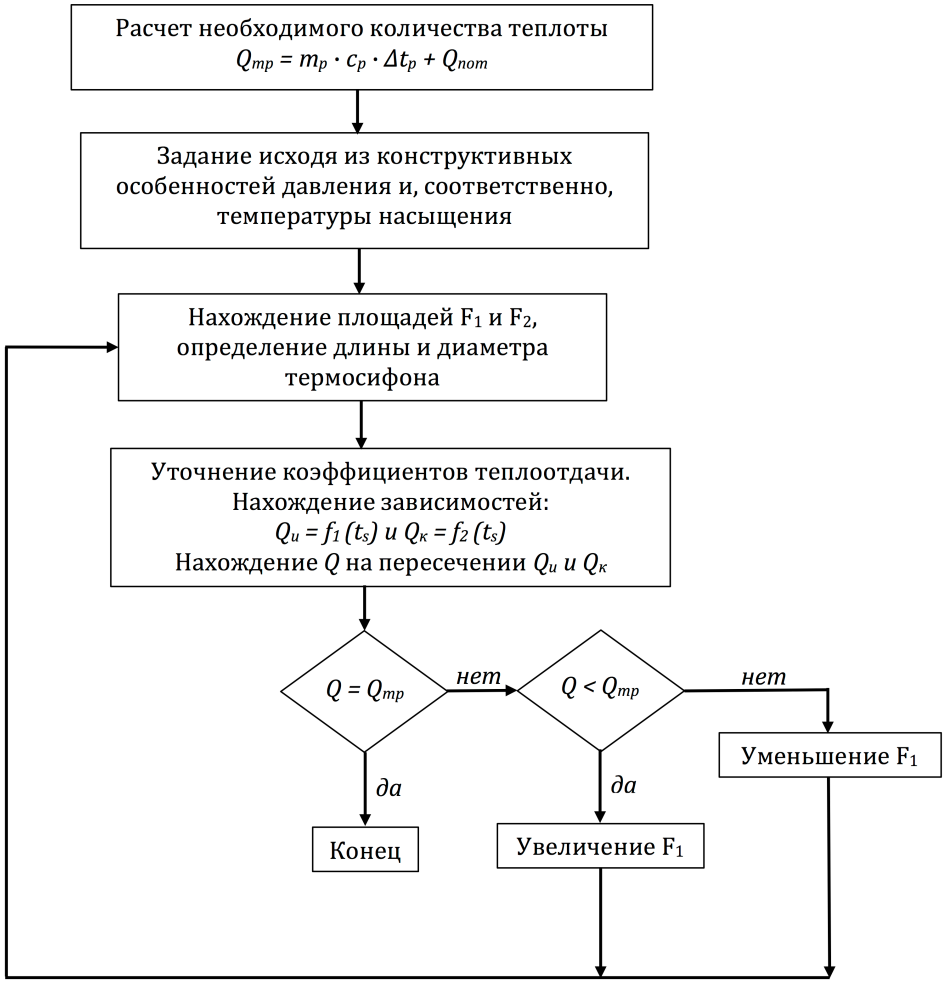


Рисунок 1. Алгоритм расчета термосифона.

По данному алгоритму был проведён расчёт двухфазного закрытого термосифона для условий завода РЕАТЭКС, результаты которого хорошо согласуются с результатами испытаний изготовленного по результатам расчёта термосифона.

На рисунке 2 приведен сводный график полученной по результатам расчёта зависимости тепловых потоков испарителя (маркирован ромбами) и конденсатора (маркирован треугольниками) от температуры насыщения внутри трубы термосифона при различных температурах газа и начальных температурах нагреваемого раствора.

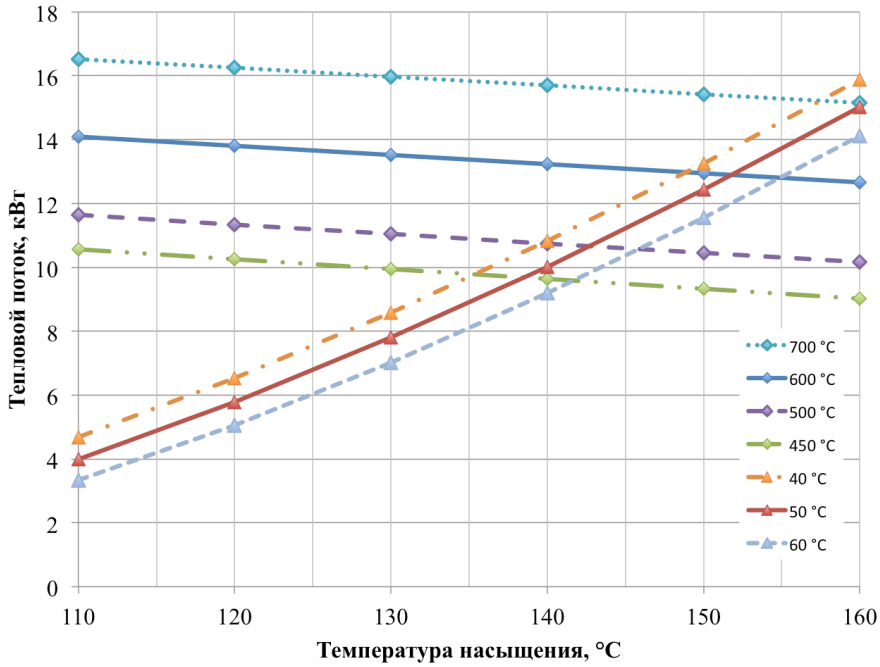


Рисунок 2. Зависимость тепловых потоков испарителя и конденсатора при различных температурах насыщения внутри трубы, температурах греющего газа и начальных температурах нагреваемого раствора.

Из рисунка 2 видно, что при начальной температуре нагреваемого раствора 50 °С и температуре газа 600 °С, что соответствует технологическим параметрам, температура насыщения внутри трубы термосифона составит около 152 °С, а тепловой поток около 13 кВт, что хорошо согласуется с результатами испытаний.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Сажин, Б. С. Теоретический анализ и разработка алгоритма расчета энергосберегающей конструкции, на примере тепловой трубы / Б. С. Сажин, Е. С. Бородина, Е. В. Отрубянников, Г. А. Кесоян / Химическая технология (Сб. тез. док.): IV Всеросс. конф. по хим. Технологии. Всеросс. молодежная конф. по хим. технологии, Всеросс. школа по хим. технологии для мол. ученых и специалистов, Всеросс. симпозиум по химии и технологии экстракции и сорбции; под ред. Ю. А. Заходяевой, В. В. Беловой: в 5 т. – М.: ИОНХ РАН, 2012. – Т. 2. – С. 328 – 331.

2. *Теплообменный аппарат* / Е. С. Бородина, В. В. Зиновьев, И. Ю. Розанов, Б. С. Сажин, Г. А. Кесоян. Патент РФ №2473856 МПК F28 D7 00, F 28 D 15 02. Заявитель и патентообладатель Бородина Е. С., дата подачи заявки 20.10.11, опубликован 27.01.13. Бюл. №3. 7 с. : ил.

3. *Термосифонный теплообменный аппарат* / Е. С. Бородина, М. П. Тюрин, И. Ю. Розанов, Л. М. Кочетов, О. Г. Бельданова. Патент РФ №2532061 МПК F28D 7/00. Заявитель и патентообладатель Бородина Е. С. дата подачи заявки 20.11.13, опубликован 27.10.14. Бюл. №30. 7 с.: ил.

4. *Тюрин М. П., Бородина Е. С., Кочетов Л. М., Бельданова О. Г.* Теоретическое моделирование процессов тепломассопереноса в двухфазном закрытом термосифоне // Дизайн и технологии. 2014. № 41. С. 55-59.

УДК 677.027.13

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРОМЫВКИ ПРЕССОВЫХ СУКОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОСТАВА «НОВОСТЬ» - СОДА
CHOICE OF RATIONAL PRESS FELTS WASHING CONDITIONS USINGWHOLE «NOVOST» - SODA

Григорий Игоревич Хазанов
Gregory I. Hazanov

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)

Аннотация: Рассмотрены вопросы усовершенствования технологии промывки прессовых сукон с использованием состава «Новость» - сода. Для выбора рациональных условий промывки использовалось ротатабельное центральное композиционное планирование эксперимента, получены уравнения для расчета водопоглощения и остаточного содержания загрязнений в сукне.

Abstract: The paper presents the issues of improving technology, flushing press felts by using whole «NOVOST» - soda. To select sound modalities used washing rotatable central composite planning experiment, the equations for the calculation of water and dirt in felt.

Ключевые слова: промывка, прессовые сукна, ротатабельное центральное композиционное планирование эксперимента, водопоглощение.

Keywords: washing machines, cloth, rotatable central composite planning experiment, water absorption.

Условия проведения процесса промывки в процессе производства технических сукон не оптимальны.

Поэтому нами проводились исследования направленные на усовершенствование технологии промывки технических сукон для прессовой части бумагоделательных машин.

Исходной точкой проведенных исследований являлась производственная технология, осуществлявшаяся при скорости движения сукна 30 м/мин, без отжима, по режиму:

-замачивание на воде при температуре 38^{o}С и модуле ванны 8 – 15 мин;

-обработка проточной водой – 5 мин;

-промывка раствором моющих веществ: моющее средство «Новость» 0,5 г/л, сода кальцинированная 0,25 г/л при 38^{o}С и модуле ванны 8 - 15 мин;

-промывка проточной водой при температуре 30^{o}С – 15 мин;

-промывка проточной водой при 15^{o}С 0-10 мин.

Приведенный режим промывки связан с характером присутствующих в сукне загрязнений – шерстяного жира, замасливателя, содержащего антистатик ОС-20 и состав Б-73[1]. Значительная часть применяемого замасливателя хорошо вымывается водой. После промывки в течение двух часов при 35^{o}С остаточное содержание загрязнений в изделии составляло 0,9%, при исходном - 3,43%.

При работе на бумагоделательной машине прессовые сукна должны быстро отводить воду из бумажной массы, эффективность обезвоживания которой во многом зависит от количества жидкости, поглощаемой текстильным материалом[2, 3].

Поэтому при планировании эксперимента в качестве выходной переменной максимизировалось водопоглощение сукна $У_1$ (%). Как известно, в процессе промывки происходит вымывание загрязнений, количество которых на текстильном материале $У_2$ (%) в соответствии с Отраслевым регламентированным режимом промывки для сукон ИКП-13 не должно превышать 0,3%, что является ограничительным условием при проведении

технологической операции. При выполнении указанных требований желательным являлось сокращение общей продолжительности процесса.

Эксперимент проводился на лабораторной установке, представляющей собой промывной машины фирмы Кретен, которыми оснащены отечественные предприятия, выпускающие технические сукна.

Для выбора рациональных режимов промывки использовался метод ротатабельного центрального композиционного планирования эксперимента, на основе которого проводилось определение полиномиальной регрессионной многофакторной модели второго порядка с последующей оптимизацией процесса с помощью методов канонического преобразования уравнения регрессии и сканирования переменных. Значимость коэффициентов регрессии и адекватность полученных уравнений проверялись по принятой при планировании эксперимента методике для доверительной вероятности 0,95 [4, 5].

На процесс промывки оказывают влияние: температура, модуль ванны, состав и концентрация моющих веществ, длительность отдельных стадий и общая продолжительность технологической операции, которые являлись факторами при планировании эксперимента.

Первоначально в качестве факторов на стадиях замачивания на воде и промывки раствором моющих веществ для состава «Новость» 0,5 г/л, сода кальцинированная 0,25 г/л при сохранении остальных условий проведения процесса использовались температура и модуль ванны, для которых выбирались интервалы варьирования. При выборе интервалов варьирования руководствовались тем, что для большинства ПАВ оптимальная температура промывки находится в пределах 40-45^{o}С, а модуль ванны 6-8 при водопоглощении сукна около 200% [6].

Для приведенного состава моющих веществ факторы, уровни и интервалы их варьирования представлены в табл.1.

Таблица 1. Интервалы и уровни варьирования температуры и модуля ванны при промывки технических сукон

Факторы	Уровни варьирования					Интервал
X_1, X_2	-1,414	-1	0	1	1,414	варьирования
K_1	26,0	28,5	38,0	46,5	50,0	8,5
K_2	3,27	4,4	6,0	8,0	8,83	2,0

K_1(^{0}С), X_1 – температура в натуральном и безразмерном масштабе;
K_2, X_2 – модуль ванны в натуральном и безразмерном масштабе.

После обработки экспериментальных данных по известной методике [4, 5] были получены уравнения регрессии (1), (2) для определения водопоглощения ($У_1$) и остаточного содержания загрязнений ($У_2$).

$$У_1 = 199,5 + 4,6X_1 – 9X_2 + 8,9X_1X_2 +17,6(X_1)^2 + 4,9(X_2)^2 \quad (1)$$

$$У_2 = 0,28 – 0,12X_1 – 0,16X_2 + 0,24(X_1)^2 + 0,08(X_2)^2 \quad (2)$$

Как следует из уравнения (1), для получения максимального водопоглощения необходимо поддерживать значения факторов X_1 и X_2 на верхнем уровне При этих значениях входных переменных величина остаточного содержания загрязнений выходит за пределы ограничительного условия 0,3%. Поэтому уравнения (1) и (2) необходимо рассматривать одновременно. Решение поставленной задачи осуществлялось путем сканирования переменных X_1 и X_2 с расчетом на каждом шаге $У_1$ и $У_2$. По результатам сканирования выбирались рациональные условия проведения технологической операции: $X_1 = 0,59$; $X_2 = 1,0$, что соответствует температуре 43^{o}С и модулю ванны 8.

На основании найденных рациональных условий проведения процесса была проведена дополнительная оптимизация в зависимости от длительности промывки раствором моющих

веществ и замачивания на воде. Интервалы и уровни варьирования этих стадий выбирались с учетом их продолжительности на производстве, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2. Интервалы и уровни варьирования длительности стадий замачивания на воде и промывки раствором моющих веществ

Факторы	Уровни варьирования					Интервал
X_3, X_4	-1,414	-1	0	1	1,414	варьирования
$К_3$	8	10	15	20	22	5
$К_4$	8	10	15	20	22	5

$К_3$(мин), X_3 –длительности стадии замачивания на воде в натуральном и безразмерном масштабе;

$К_4$(мин), X_4 – длительность стадии промывки раствором моющих веществ в натуральном и безразмерном масштабе.

Обработкой экспериментальных данных были получены уравнения регрессии для определения водопоглощения (%) и остаточного содержания загрязнения (%) .

$$У_1 = 217{,}2 – 0{,}8X_3 – 3{,}2X_4 – 0{,}9X_3X_4 - 4{,}9(X_3)^2 + 0{,}2(X_4)^2 \quad (3)$$

$$У_2=0{,}21–0{,}13X_3–0{,}09X_4–0{,}04X_3X_4+0{,}07(X_3)^2+0{,}06(X_4)^2 \quad (4)$$

Уравнения регрессии (3), (4) использовались при оптимизации промывки технических сукон, из анализа которых выбирались рациональные условия проведения процесса: X_3= 0,2; X_4= -0,6, что соответствовало длительности стадий: замачивания на воде – 10 мин и промывки раствором моющих веществ – 12 мин при водопоглощении 218,9% и остаточного содержания загрязнений 0,28% . Полученные значения рациональных условий промывки проверялись экспериментально: в лабораторных условиях – $У_1$ = 218%. $У_2$ = 0,28% и на производстве – $У_1$ = 219,2%, $У_2$ = 0,24%. Близкие величины расчетных и экспериментальных значений водопоглощения и остаточного содержания загрязнений указывают на возможность использования полученных математических моделей для описания процесса промывки технических сукон.

Разработанная технология была использована при проведении промывки технических сукон в производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 588274 (СССР) Замасливатель для шерстяного волокна/Месник О.М., Подерягин Г.М., Гутман Г.М. и др.- Опубл. в Б.И., 1978 №2.

2. Хохряков А.А., Путилин В.В. Технические сукна для бумаго- и картоноделательных машин. – М.: ВНИИПИЭлеспром, 1971. – 184 с.

3. Новиков Н.Е., Бусыгин Ф.М., Цирельсон Г.И. Обезвоживание бумаги на прессах бумагоделательных машин. – М.: ВНИИПИЭлеспром, 1977. – с. 18-20.

4. Севостьянов А.Г. Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности. М.: Легкая индустрия, 1980. – 392 с.

5. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В.Методы оптимизации эксперимента в текстильной промышленности. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.

6. Сергеев В.Я., Хохряков А.А., Лебедева Е.А. Технология производства технических сукон. – М.: Легкая индустрия, 1977. – 184 с.

УДК 664.8/.9.034

УСТАНОВКА ДЛЯ КОПЧЕНИЯ МЯСНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ
THE SETTING FOR SMOKED MEAT PRODUCTS UNDER THE ACTION OF EXCESS PRESSURE

Сергей Васильевич Шахов, Игорь Николаевич Сухарев, Сергей Юрьевич Шубкин
Sergey V. Shakhov, Igor N. Sukharev, Sergey Yu. Shubkin

Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Россия, Воронеж
Voronezh State University of Engineering Technology, Russia, Voronezh
(e-mail: post@vsuet.ru)

Аннотация: Представленная установка для получения копченой мускусной утки копченой под действием избыточного давления полностью отвечает современным течениям развития пищевой промышленности. Разработанная конструкция установки позволяет не только производить процесс копчения в широких диапазонах температур, но и под действием давления насыщать ароматом дыма более углублено поры продукта, что приводит к получению более качественной, сочной и однородной продукции.

Abstract: The presented installation for receiving a smoked musky duck smoked under the influence of excessive pressure completely answers the modern trends of development of the food industry. The developed design of installation allows not only to make process of smoking in the wide ranges of temperatures, but also under the influence of pressure to sate with aroma of a smoke is more deepened a product time that leads to receiving better, juicy and uniform production.

Ключевые слова: копчение, давление, испарительный бачок, пряно-коптильные ароматизаторы, мускусная утка.

Keywords: smoking, pressure, vaporizing tank, spicy fragrances, musky duck.

В настоящее время на Российском рынке представлен очень большой ассортимент копченой продукции от разных ведущих производителей. Для копчения используют мясо свинины, говядины, птиц, конины и других животных. Однако производство мяса в мире растет быстрыми темпами. Среднегодовой прирост за последние 20 лет составил 5,2%, что свидетельствует о потребительском интересе к данному виду продукции [1].

Копченые мясные изделия всегда привлекают потребителей своим неповторимым вкусом и ароматом они всегда пользуются устойчивым спросом. В результате осаждения дыма на поверхности и проникновения его компонентов внутрь происходит окрашивание поверхности в коричнево-золотистые тона, продукт приобретает специфический аромат и вкус копчения, а также достигаются бактериальный и антиокислительный эффекты [1,3,6]. Эти продукты хорошо сохраняются при повышенных температурах.

Однако при этом предпочтительным способом создания копченых мясных изделий с ароматом дыма является копчение под действием избыточного давления, обладающее неоспоримыми преимуществами перед копчением традиционными способами: минимум расходов электроэнергии и древесины; низкий риск осаждения на поверхности продукта опасных для здоровья человека продуктов неполного сгорания древесины и получения продукта стандартного качества; увеличение выхода продукта за счет снижения потери влаги во время копчения; отсутствие дополнительной тепловой обработки, которая может вызвать изменения структуры, консистенции продукта, его органолептических показателей и микробиологического состояния, а также денатурацию и распад основных органических соединений [4,5,6].

Установка для копчения мясных изделий под действием избыточного давления (рис.1) работает следующим образом.

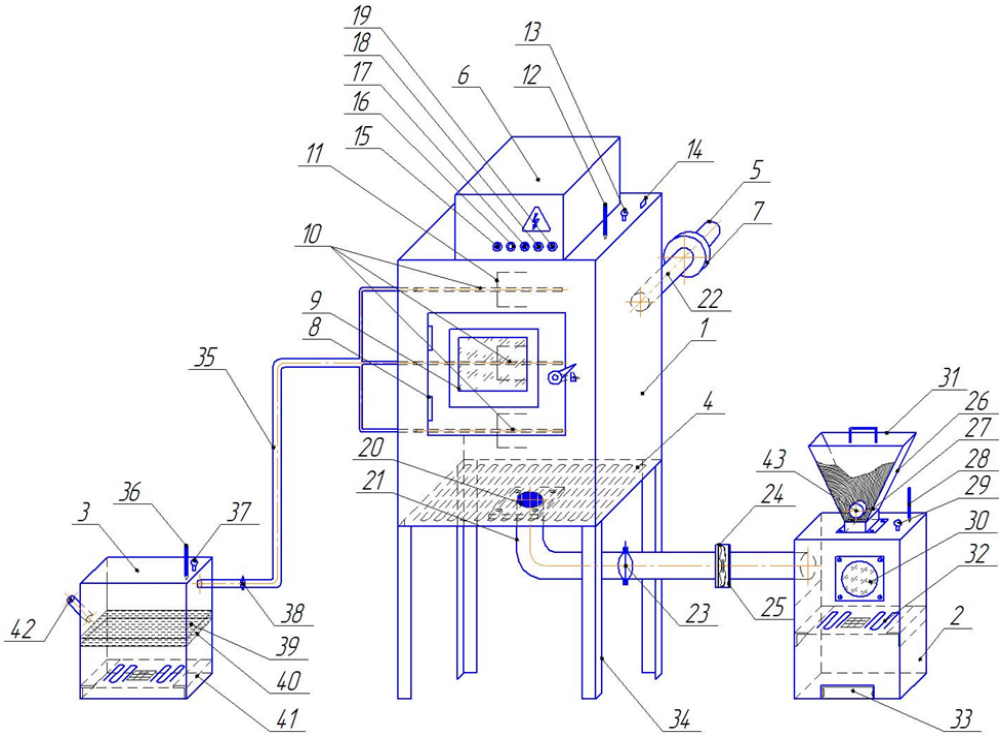


Рис. 1. Установка для копчения мясных изделий под действием избыточного давления

1 - коптильная камера; 2 - дымогенератор; 3 - испарительный бачок; 4, 32, 41, - нагревательный элемент; 5 - выходной патрубок; 6 - пульт управления; 7, 24 - вентилятор; 8 - дверца; 9 - смотровое окно; 10 - полые перфорированные трубки; 11 - держатель; 12, 28, 36 - терморегулятор; 13, 29, 37 - манометр; 14 - клапаном сброса давления; 15, 16, 17, 18, 19 - кнопки управления; 20 - жалюзи; 21, 35 - трубопровод; 22, 23, 38 - заслонка; 25 - сетка; 26 - бункер; 27 - опилки; 30 - смотровое окно; 31 - крышка; 33 - поддувало; 34 - ножки съемные; 39 - пряно-коптильные ароматизаторы; 40 - лист; 42 - специальное отверстие; 43 - вал

Основой эффективности любой технологии является знание всех закономерностей изменения свойств применяемого сырья в ходе технологического процесса. В технологии мясных продуктов наиболее значимыми параметрами являются так называемые функционально-технологические показатели: влагосвязывающая, влагоудерживающая, жироудерживающая способности мясного сырья, а также эмульгирующая способность и стабильность эмульсии (особенно в технологии копчения мясных изделий). При выборе оптимальных режимов технологической обработки следует учитывать изменение каждого из этих параметров, а, кроме того, структурно-механических показателей, основным из которых является усилие среза. Все эти показатели в определенной степени выступают гарантом успеха технологических процессов и прямо или косвенно определяют качественные характеристики готовых продуктов [2].

Для разработки технологии нового продукта необходимо определить функционально-технологические свойства (степень связанности влаги, эмульгирующую способность и стабильность эмульсии), которые влияют на конечные потребительские свойства и качество продукции. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 1.

Как показывают результаты исследований, самые низкие влагоудерживающая и влагосвязывающая способности проявляют пищевые продукты копченые традиционным способом. Влагосвязывающая способность мышечной ткани мускусной утки находится на достаточно высоком уровне 19-22 %, что объясняется известным фактом – влагосвязывающая способность продукта имеет более высокое значение при большей массовой доле белка и меньшей жира.

Таблица 1. Функционально-технологические свойства мяса мускусной утки в сыром и копченом виде

Образец	ВСС, %	ВУС, %	ЖУС, %	ЭС, %	СЭ, %
В сыром виде					
Бедренные мышцы	19,3	67,2	37,3	70,1	52,4
Грудные мышцы	22,5	69,2	48,1	72,4	59,7
В копченом мясе (копченым традиционным способом)					
Бедренные мышцы	16,6	63,1	31,1	56,7	47,2
Грудные мышцы	17,3	63,7	41,4	58,6	48,4
В копченном мясе (копченым с применением избыточного давления и пряно-коптильных ароматизаторов)					
Бедренные мышцы	17,8	65,2	36,2	69,6	48,3
Грудные мышцы	20,8	66,2	46,5	70,3	55,6

Однако ВСС характеризует лишь потенциальные возможности белковой системы связывать и удерживать воду. Наиболее важными с точки зрения технологии являются специальные показатели (ВУС, ЖУС), которые характеризуют способности белков сырья к удержанию определенного количества влаги и жира после термообработки, а также ЭС и СЭ, которые характеризуют белковую систему к сродству с липидами.

Исследования показали, что мышечная ткань мяса мускусной утки копченая под действием избыточного давления имеет более высокие значения ВУС и ЖУС по сравнению с традиционным копчением, это видимо, связано с тем, что миофибриллы мышечной ткани мускусной утки образуют более устойчивую белково-жировую матрицу под действием избыточного давления.

Преимущества предлагаемой установки для получения копченых мясо-растительных изделий с применением традиционной дымовоздушной смеси и с внутренней подачей пряно-коптильных ароматизаторов заключаются в том, что в коптильной камере расположена полая перфорированная трубка на которую нанизывается продукт и в которую подаются пары пряно-коптильных ароматизаторов под давлением очищенных от канцерогенных компонентов которые пронизывают поры продукта непосредственно изнутри, а стандартная дымовоздушная смесь подаваемая также под давлением подается снаружи продукта что все вместе обеспечивает более быстрое приготовлении продукта с обеспечением более глубокого проникновения коптильных веществ в глубь продукта по всему объему приводящее не только к сохранению органолептических и качественных показателей но и к улучшению.

Предлагаемая установка для получения копченой мускусной утки копченой под действием избыточного давления позволяет:

- повысить качество приготовления пищевых продуктов;
- увеличить длительность хранения готовой продукции;
- обеспечить равномерное распределение коптильных веществ по всей толще продукта;
- повысить скорость осаждения коптильных ароматизаторов;
- насытить ароматом дыма продукт по всему объему;
- повысить органолептические показатели готовой продукции;
- интенсифицировать процесс копчения пищевых продуктов;
- снизить содержание канцерогенных веществ в копченой продукции;
- уменьшить количество дымовоздушных выбросов и, следовательно, обеспечить защиту окружающей среды;
- расширить ассортимент копченых изделий;
- сократить затраты на электроэнергию и, следовательно, снизить себестоимость продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комплексный подход к применению коптильных сред, получаемых с использованием ИК-дымогенератор [Текст] / Ю.В. Шокина, А.Ю. Обухов, О.А. Кирилюк. – Рыбпром. – 2010. - № 3. – С. 98-102.
2. Салаватулина, Р.М. Рациональное использование сырья в колбасном производстве. – 2-е изд. [Текст] / Р.М. Салаватулина. – СПб.: ГИОРД, 2005. – 248 с.
3. Установка дымогенерации в среде инертного газа для копчения продуктов питания [Текст] / С.Т. Антипов, С.В. Шахов, О.В. Мальцева, А.Г. Картавый // Техника и оборудование для села 2011. № 4. С. 31-32.
4. Шахов, С.В.. Анализ процесса дымообразования [Текст] / С.В. Шахов, О.В. Мальцева, И.Н. Сухарев, С.Ю. Шубкин // Материалы международной научно-практической конференции «Системный анализ и моделирование процессов управления качеством в инновационном развитии АПК» – // Воронеж, гос. ун-т инжен. технолог. – Воронеж, 2015. – С. 404-406.
5. Шубкин С.Ю., Шахов С.В., Ткачев О.А. Разработка установки для электростатического копчения пищевых сред с индуктивным подводом энергии при дымогенерации в среде инертного газа [Текст] / Сборник докладов конференции «Инновационные технологии на базе фундаментальных научных разработок – прорыв в будущее» - Воронеж, 2013. – С.83-85.
6. Шахов, С. В.. Установка с внутренней подачей дыма для получения копченых экструдированных продуктов [Текст] / С.В. Шахов, И.Н. Сухарев, С.Ю. Шубкин, О.В. Мальцева, А. А. Ракитянский // М: Мясная индустрия. – 2015. – №5. – С. 44-46.

УДК 530.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ВИХРЕВЫХ ТРУБАХ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
THE FEATURES OF THE DRYING PROCESS OF NONWOVEN T MATERIALS

Олег Александрович Пономарев
Oleg A. Ponomarev

Российский государственный университет им. А.Н Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: olegpon36@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности исследования динамики потоков в вихревых трубах теоретическими и экспериментальными методами. Показана возможность создания холодильных устройств путем процессов самосборки на основе эффекта Бенара и эффекта Ранка. Составлены и отлажены программы для расчета сложных динамических процессов в жидкостях.

Abstract: Same features of dynamics of flows in vortex tubes were researched by theoretical and experimental methods. Self-assembly cooled machine in effect Benar and effect Ranque were possible. Mathematical program for calculation complicated dynamical process in fluid were received.

Ключевые слова: фазовые переходы , вихревые трубы, холодильные устройства.

Keywords: phase transition, vortex tubes, cooler

Введение. Необходимость измерения турбулентности возникает из-за недостаточного исследования процесса влияния на потоки в жидкостях и газах гравитационного поля при наличии градиента температуры. Особенности течения заключаются в том, что масштаб турбулентных пульсаций может изменяться в десятки или сотни раз по времени, амплитуде

и пространству. Особенно существенны для техники высокочастотные пульсации, так как именно они определяют перенос теплоты. В этих условиях возникают различные непонятные эффекты.

В 1901 г. Бенар обнаружил странный эффект в конвективном движении газа и жидкости [1,2]. Если подогреть слой жидкости снизу, то тепло переносится вверх в результате процесса теплопроводности, то есть благодаря молекулярной передачи энергии хаотически движущихся молекул. Если разность температур между верхней и нижней поверхностями $\Delta T > \Delta T_{кр}$, то возникает конвекция. Управляющими параметрами ее являются ΔT и сила тяжести. Сначала при $\Delta T < \Delta T_{кр}$ возникает обычная диффузия, но при $\Delta T > \Delta T_{кр}$ возникают валы, вращающиеся на встречу друг другу как сцепленные шестеренки. При росте ΔT каждый вал распадается на два вала, потом снова на два вала и т.д., пока не возникает сотовая структура из шестиугольников. При дальнейшем росте ΔT начинается хаос.

В 1933 г. открыт эффект Ранка. Он сводится к тому, что в турбулентных газах и жидкостях тепло самопроизвольно перемещается из верхних холодных слоев в более низкие теплые слои и ориентируется по градиенту давления. То же происходит и в циклонах, где холодный газ собирается в центре, а теплый – на стенках [3,4].

Теоретическая часть. Эти нелинейные задачи могут быть точно решены численно, а приближенно также и аналитически. Рассмотрим процесс самоорганизации. В окрестности $\Delta T \approx \Delta T_{кр}$ появляются неустойчивости, но они затухают, вследствие второго начала термодинамики. Наступает равновесие. Но ΔT растет и равновесие нарушается. Некоторые флуктуации экспоненциально растут, начинается столкновение трех, четырех и более тяжелых фрагментов. В этот момент при $\Delta T > \Delta T_{кр1}$ флуктуации перестают быть просто шумом и направляют эволюцию всей системы (таков закон для нелинейных систем). В таких системах долго не устанавливается равновесие. При $\Delta T > \Delta T_{кр2} > \Delta T_{кр1}$ ячейки упорядочения исчезают, и возникает турбулентный режим.

Целью работы является выяснение механизма самоорганизации, то есть выяснение, как из беспорядка возникает порядок или как отдельные частицы превращаются в систему, в которой возникают новые кооперативные свойства, не сводящиеся к свойствам составляющих ее элементов. Наша задача создать модель этого явления и по возможности провести расчеты его характеристик.

Если рассмотреть зависимость изменения теплоты в системе $\frac{dQ}{dt}$ как функцию от ΔT, то можно заметить, что при $\Delta T \approx \Delta T_{кр1}$ происходит резкий излом графика. При этом увеличивается упорядоченность системы вследствие уменьшения ее энтропии. Жидкость при этом «кристаллизуется», удаляясь от равновесия, и поэтому она самоорганизуется. Таких систем, которые медленно идут к равновесию через неравновесные состояния, много.. В качестве примера можно привести одномерные системы, в которых присутствуют солитоны.

Можно показать, что состояние с максимальной энтропией не может быть описано по законам классической механики. Обязательно приходится вводить зародыши беспорядочности (квазисредние Боголюбова). Это значит что микро- и макро - явления связаны между собой. Необходимо эту связь выявить.

После рассмотрения эффекта Бенара и роли флуктуаций в процессах самоорганизации между двумя горизонтальными поверхностями возникла идея использовать эти результаты при создании холодильного устройства. Для этого путем конформационного отображения плоскость с ячейками Бенара была свернута в трубу. Разницу температур взяли от центра трубы до ее стенки. Силу тяжести заменили центробежной силой, вращая воду в трубе. Нагрев воды происходит за счет трения о стенку трубы. Кроме того с внешней стороны трубы тепло отводилось. В результате появилась «холодильная установка» состоящая из

множества ячеек Бенара с циркулирующей в них жидкостью переносящей тепло от центра к стенке трубы и выводящей его наружу.

И движение жидкости между двумя плоскостями и вихревые потоки в трубе описываются нелинейными уравнениями Навье-Стокса (по повторяющимся индексам подразумевается суммирование):

$$\frac{\partial}{\partial t}U_i + U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \nu\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \beta g_i T - 2\varepsilon_{ijk}\Omega_j U_k \ , \tag{1}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_j\frac{\partial T}{\partial x_j} = \chi\frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} \ , \tag{2}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0. \tag{3}$$

Здесь U_i - i-компонента скорости, ν - коэффициент кинематической вязкости, $\rho -$ плотность жидкости, $\chi -$ коэффициент температуропроводности, $\beta -$ температурный коэффициент расширения жидкости, $g_i -$ ускорение свободного падения, $P, T -$ давление и температура, $\varepsilon_{ijk} -$ полностью антисимметричный единичный тензор, $\Omega_j -$ угловая скорость вращения вокруг j-координаты.

Рассмотрим сначала конвективную неустойчивость жидкости, находящейся между двумя горизонтальными плоскостями при вертикальном градиенте температуры и в поле силы тяжести. Введем новые функции $v_i = U_i - U_{0i}$, $\theta = T - T_0$ и $p = P - P_0 = -\rho_0\beta\theta$ где U_{0i}, P_0, T_0 - усредненные величины скоростей, давления и температуры. Из системы (1)-(3) получим систему уравнений для новых величин

$$\frac{\partial}{\partial t}v_i + v_j\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \nu\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial w}{\partial x_i} - \beta g_i\theta - 2\varepsilon_{ijk}\Omega_j v_k \ , \tag{4}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + v_j\frac{\partial \theta}{\partial x_j} - Av_3 = \chi\frac{\partial^2 \theta}{\partial x_j \partial x_j} \ , \tag{5}$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0. \tag{6}$$

Ищем решение системы в виде функций умеренного роста, полагая $v_i \propto \exp(Et), \theta \propto \exp(Et)$. Решим эту систему при $\Omega_j = 0$ и опуская малые величины второго порядка. Сделав преобразования Фурье по координатам, и решив систему получаем медленное (E_1) и быстрое (E_2) затухание флуктуаций

$$E_{1,2} = -\frac{(\nu+\chi)(k_3^2+k^2)}{2} \pm \sqrt{\frac{(\nu+\chi)^2(k_3^2+k^2)^2}{4} - \nu\chi(k_3^2+k^2) - \beta g_3 A},$$

где $k^2 = k_1^2 + k_2^2$.

Аппроксимируем медленное затухание стационарным состоянием, приняв $E_1 \approx 0$. Теперь систему (4)-(6) можно свести к одному уравнению

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j}\right)^3\theta = R\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}\right)\theta, \ R = \frac{g_3\beta\Delta T_0 h^3}{\nu\chi}$$ - число Рэлея (Rayleigh),

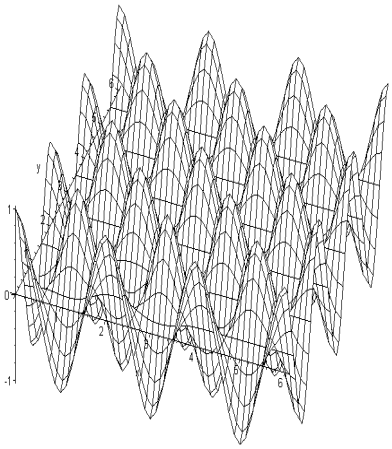
$h -$ толщина слоя жидкости.

Упростим это выражение, чтобы провести оценку

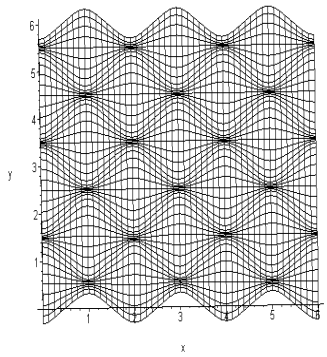
$$(\frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j})^2 \theta = R\theta$$

Будем искать решение этого уравнения в виде $\theta = f(x_3)\exp(ik_1x_1 + ik_2x_2)$. Тогда уравнение для функции $f(x_3)$ имеет вид

$$(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} - k^2 + \sqrt{R})(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} - k^2 - \sqrt{R})f(x_3) = 0, \qquad k^2 = k_1^2 + k_2^2$$



(а) – вид сбоку



(б) – вид сверху

Рис. 1. Конвективные потоки V_3 в ячейках Бенара (а) и ячейки Бенара (б).

Общее решение этого уравнения представляет комбинацию $ch(\sqrt{k^2 - \sqrt{R}}x_3)$, $ch(\sqrt{k^2 + \sqrt{R}}x_3)$, $sh(\sqrt{k^2 - \sqrt{R}}x_3)$, $sh(\sqrt{k^2 + \sqrt{R}}x_3)$.

Чтобы удовлетворить граничным условиям, необходимо оставить одну экспоненту $k = R^{1/4}$ и $k = iR^{1/4}$. С учетом симметрии задачи это приводит к тому, что $\theta \propto f(0)\exp((iR^{1/4} - R^{1/4})(x_1 + x_2)/2)$ и $v_3 \propto v(0)\exp((iR^{1/4} - R^{1/4})(x_1 + x_2)/2)$. Это согласуется с результатом, приведенным на рис.1, где четко проявляется один период..

Экспериментальная часть. Скорость измеряется лазерным измерителем скорости. Это очень прогрессивный прибор и прогрессивный метод измерения. Лазерным анемометром измеряют скорости микроскопических частиц, взвешенных в потоке. Принцип действия прибора основан на измерении доплеровского сдвига частоты света, рассеиваемого движущимися частицами. Это более подробно изложено в [5-7]. На рис.2 показана принципиальная оптическая система для определения мгновенных скоростей малых частичек примеси.

Падающий лазерный луч лежит в плоскости x,z перпендикулярно оси симметрии трубы, компоненты скорости V_1, V_2, V_3 направлены вдоль осей x, y и z соответственно, приемник 3 расположен в плоскости x, z.

Луч лазера с помощью полупрозрачной пластины разделяется на два луча -на основной и опорный. Основной луч с помощью линзы фокусируется на поток. Часть падающего света рассеивается в направлении фотоумножителя, при этом из-за эффекта Доплера происходит сдвиг частоты.

Опорный луч отражается от зеркала и фокусируется другой линзой приблизительно в то же место, что и основной луч. Опорный луч попадает в фотоумножитель через две апертурные диафрагмы, которые ограничивают объем и угловое направление поля наблюдения фотоумножителя. Основной и опорный лучи, попадая на фотокатод, дают

биения с частотой, равной доплеровскому сдвигу. Для удобства основной и опорный лучи направлены под одинаковым углом к плоскости, перпендикулярной оси потока.

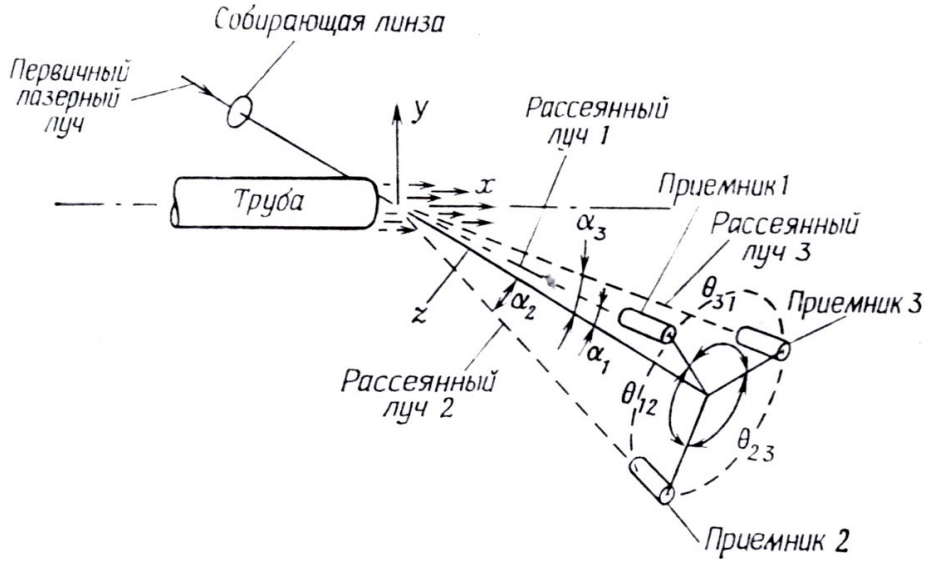


Рис.2. Схематическое изображение трехкомпонентной лазерной доплеровской системы и ее расположение относительно течения в трубе.

Рассеянное излучение является мощным способом для измерения пространственных распределений температуры. Основное преимущество этого метода связано с возможностью получения данных из локальных областей пространства, а не суммированных вдоль направления наблюдения. Для определения температуры методом лазерного рассеяния нет нужды в абсолютных измерениях. Более того, если ставится задача определения температуры, то достаточно иметь простой полихроматор или даже набор фильтров, пропускающих излучение в разных спектральных интервалах.

Выводы. В работе показано, что кооперативные взаимодействия не выводятся из уравнений для отдельных частиц. В любой реальной системе имеется примесь «кооперативов» из-за наличия многочастичных взаимодействий. Это дает качественно новые свойства жидкости по сравнению с газами и позволяет лучше понять свойства жидкостей. Всегда есть эффекты динамической связи [8] и всегда связаны макро - и микро-эффекты.

Необходимо экспериментально изучать потоки в жидкостях для получения новых подходов по самосборкам микро конструкций. Это особенно важно для нанотехнологий.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 350 . .

2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

3. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М.:УНПЦ Энергомаш., 2000.412 с.

4. Piralishvili Sh.A., Azarov A.I. Vortex effects: theory, experiment, industrial application, prospects // Heat Transfer Research. 2006. V.37.P.707-730.

5. Кравец Л.В. Лазерно-оптические методы зондирования атмосферы и водных сред. Труды ЦАО. Вып. 155. М.:1985. С.80.

6. Смольянов А.В., Ткаченко В.М. Измерение турбулентных пульсаций. Л.:Энергия.1980. 360

7. Кляцкин В.И. Статистическое описание динамических систем с флуктуирующими параметрами. М.: Наука, 1975. 240 с.

8. Кубарев С.И., Пономарев О.А. Эффекты динамической связи в статистической физике. М.: Наука, 1992. 141 с.

УДК 62-95; 62-97; 62-9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА ПРИМЕРЕ ОДИНОЧНОГО ПЛОСКОГО РЕБРА
THE STUDY OF PROCESSES OF COMPLEX HEAT TRANSFER ON THE EXAMPLE OF A SINGLE FLAT FIN

Варвара Сергеевна Вакурова, Наталья Владимировна Хомченко
Varvara S. Vakurova, Nataya V. Khomchenko

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», Россия, Москва
National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russia, Moscow
(e-mail: anokhinavs@gmail.com, Khomchenko@mpei.ru)

Аннотация: Составлено и решено для конкретного примера уравнение для определения распределения температур по длине нагретого одиночного плоского ребра с отводом тепла от него в окружающую среду конвекцией и излучением. Результат решения представлен в виде графика распределения температур по длине ребра. Так же записан параметр, оценивающий соотношение конвективной и лучистой составляющих теплового потока, и представлен график зависимости этого параметра от температур.

Abstract: Formulated and solved for a specific example, the equation to determine the temperature distribution along the length of the heated single flat fins with heat from it into the environment by convection and radiation. The result is presented in the form of a graph of the temperature distribution along the length of the ribs. Also recorded parameter that estimates the ratio of convective and radiative components of heat flux, and presents a graph of the dependence of this parameter from temperature.

Ключевые слова: сложный теплообмен, конвекция, излучение, оребрение, радиационно-конвективный теплообмен
Keywords: complex heat transfer, convection, radiation, fins, radiative-convective heat transfer

Исследование сложного радиационно-конвективного теплообмена охватывает довольно широкий круг задач современной науки и техники в области энергетики. Данный вопрос рассматривается и в задачах теплообмена в топках, и в двигателях летательных аппаратов, и в области радиоэлектроники, и при проектировании мощных технологических реакторов и аппаратов, и других устройств новой техники с высокоинтенсивным сложным теплообменом. Но также процессы сложного теплообмена несомненно присутствуют и в более простых устройствах теплообмена, а именно в приборах отопления.

Актуальность разрабатываемых методов расчета радиационного и сложного теплообмена обусловливается и тем, что круг задач, в которых необходимо учитывать взаимодействие излучения с другими видами переноса энергии расширяется.

Объектом исследования являются оребрённые поверхности теплообмена (одиночное ребро), отвод тепла от которых осуществляется путём конвекции и излучения.

Сложный процесс теплообмена представляет собой совокупность одновременно протекающих процессов теплопроводности, конвективного переноса тепла и теплового излучения. [1]

Разделение общего процесса переноса теплоты на элементарные явления производится в основном из методологических соображений. В практических расчетах разделение таких сложных процессов не всегда возможно и целесообразно. [2]

Обычно результат совокупного действия отдельных элементарных явлений приписывается одному из них, которое и считается главным. Влияние же остальных (второстепенных) явлений сказывается лишь на количественной характеристике основного. [2]

Различные виды переноса тепла зависят от температуры, возведённой в разные степени. Учёт влияния температуры на физические свойства тел приводит к дополнительной зависимости тепловых потоков от температуры. [2]

Наличие столь различных степеней при температуре означает, что уравнения будут существенно нелинейные. Это является одной из сложностей при решении задач сложного теплообмена. Для каждой такой задачи требуются свои, наиболее эффективные методы решения. [2]

Примеры сложного теплообмена:

- В высокотемпературных теплообменных устройствах наряду с конвекцией приобретает большое влияние лучистый теплообмен [1];
- Теплообмен в ребристых экономайзерах паровых котлов (чугунная ребристая экономайзерная труба);
- Нагрев воздуха в помещении водяным конвектором (или конкретнее, охлаждение пластин, оребряющих трубу отопительного прибора, за счёт конвективного и лучистого отводимого теплового потока).

Чтобы найти распределение температуры в ребре, а затем тепловой поток от его поверхности, необходимо сначала составить тепловой баланс для элементарного объема ребра [3]:

$$q_x = q_{x+\Delta x} + q_к + q_и \quad (1)$$

С использованием законов Фурье, Ньютона - Рихмана, Стефана-Больцмана [1]:

$$Q_{конд} = -\lambda \cdot F \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

$$Q_{конв} = \alpha \cdot П \cdot \Delta x \cdot (T(x) - T_\infty) \quad (3)$$

$$Q_и = \varepsilon \cdot \sigma \cdot П \cdot \Delta x \cdot (T(x)^4 - {T_\infty}^4) \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot град}$; F – площадь поперечного сечения ребра, м^2; α – конвективный коэффициент теплоотдачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot град}$; П – периметр ребра, м; T_∞ - температура окружающей среды, К; ε – степень черноты; $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ $\frac{Вт}{м^2 \cdot град^4}$ – постоянная Стефана Больцмана; $T(x)$ – температура ребра, К

уравнение распределения температур по длине ребра запишется в следующем виде:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{\alpha \cdot П}{\lambda \cdot F} \cdot (T(x) - T_\infty) + \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot П}{\lambda \cdot F} \cdot (T(x)^4 - {T_\infty}^4) \quad (5)$$

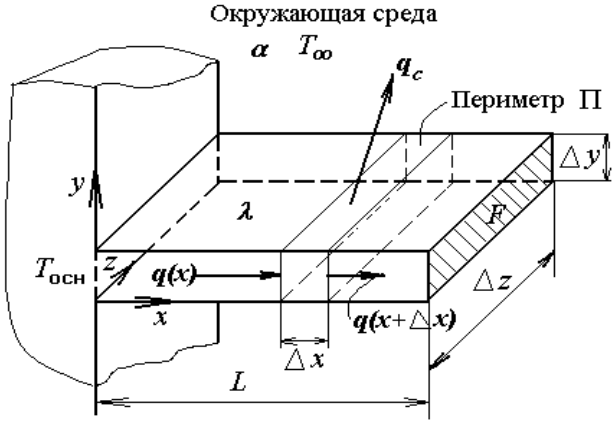


Рис. 1 Ребро постоянного поперечного сечения

После преобразований, с учётом новых констант полученное уравнение (5) примет следующий вид:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = m^2 \cdot T(x) + E \cdot T(x)^4 - C \quad (6)$$

$$m^2 = \frac{\alpha \cdot \Pi}{\lambda \cdot F} \quad (7)$$

$$C = A + B \quad (8)$$

$$A = m^2 \cdot T_\infty \quad (9)$$

$$B = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot \Pi}{\lambda \cdot F} \cdot {T_\infty}^4 \quad (10)$$

$$E = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot \Pi}{\lambda \cdot F} \quad (11)$$

Заменив производную на конечно-разностное выражение, подробно представленное в [3], и произведя преобразования, согласно [3], получим следующую форму уравнения:

$$\left(\frac{2 + m^2 \cdot \Delta x^2 + T_i^3 \cdot E \cdot \Delta x^2}{\Delta x^2}\right) \cdot T_i = \frac{1}{\Delta x^2} \cdot T_{i+1} + \frac{1}{\Delta x^2} \cdot T_{i-1} + C \quad (12)$$

Полученное уравнение необходимо использовать для нахождения распределения температур по длине ребра с учётом отвода тепла конвекцией и излучением, записав соответствующую систему уравнений в зависимости от числа контрольных объёмов N (N – это некоторое число непересекающихся контрольных объемов, на которые разбивают расчётную область).

Для решения поставленной задачи использовались следующие условия:

1. Ребро одиночное, плоское, прямоугольного профиля
2. Процесс распространения тепла стационарный
3. Свободная конвекция
4. Теплофизические свойства материала ребра заданы и являются постоянными величинами (коэффициент теплопроводности λ, степень черноты материала ребра ε)
5. Коэффициент конвективной теплоотдачи α задан и является постоянной величиной
6. При решении использовалось граничное условие 2-го рода (торец ребра теплоизолирован $\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=L} = 0$)
7. Температура окружающей среды (воздух) задана и является постоянной величиной
8. Угловой коэффициент излучения равен 1, т.е. всё тепло от ребра передаётся в окружающую среду

В работе было проведено подробное решение уравнения в программной среде Mathcad для конкретного примера со следующими исходными данными: материал ребра - сталь, количество контрольных объёмов $N = 9$, температура окружающей среды $T_\infty = 20℃$, степень черноты $\varepsilon = 0{,}85$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0{,}52\ \frac{\text{Вт}}{\text{м·град}}$, коэффициент теплоотдачи $\alpha = 10\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{·град}}$, постоянная Стефана Больцмана $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{·град}^4}$, длина ребра $L = 0{,}1$ м, ширина ребра $\Delta z = 0{,}1$ м, толщина ребра $\Delta y = 0{,}002$ м, температура основания ребра $T_0 = 100℃$. Результат решения представлен на Рис.2 для трёх случаев: когда тепло от ребра отводится конвекцией, излучением, конвекцией и излучением.

Можно сделать вывод о том, что уравнение (12) составлено и решено верно, т.к. не нарушается логика процесса передачи тепла от ребра в окружающую среду.

Так же в работе был получен параметр К, который показывает соотношение лучистой и конвективной составляющих теплового потока, отводимого от ребра.

$$K = \frac{\frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot \Pi}{\lambda \cdot F} \cdot (T(x)^4 - {T_\infty}^4)}{m^2 \cdot (T(x) - T_\infty)} \quad (13)$$

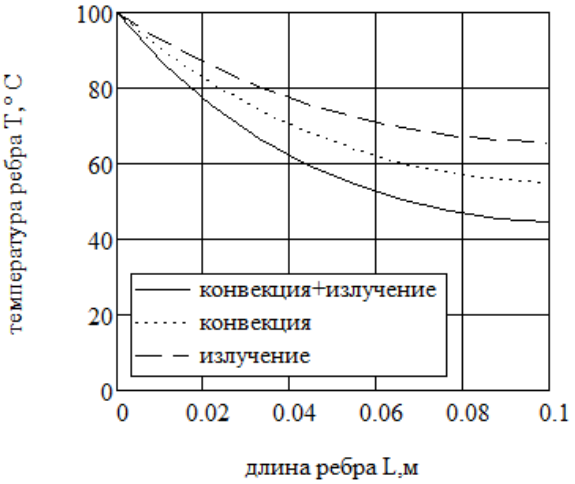


Рис. 2 График распределения температур

K=1 – пороговое значение, т.е. когда конвективная и лучистая составляющие теплового потока от ребра равны;
K>1 – лучистая составляющая теплового потока больше конвективной составляющей;
K<1 – конвективная составляющая теплового потока больше лучистой;

Используя представленные выше исходные данные для решения (12) и результаты решения (12) (распределение температур по длине ребра), был рассчитан параметр К. Для крайнего контрольного объёма (на конце ребра) К=0,55. Это означает, что конвективная составляющая теплового потока для данного случая больше лучистой в 1,8 раз.

На Рис.3 представлен график зависимости параметра К от температур для разных коэффициентов конвективной теплоотдачи α.

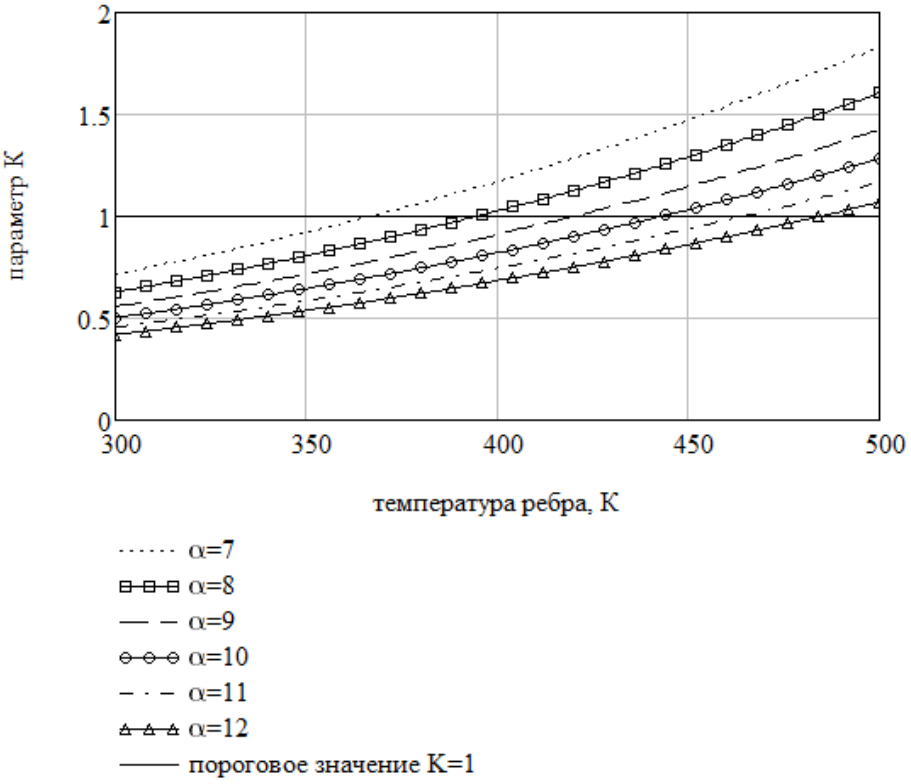


Рис. 3 Зависимость К от температуры ребра

Полученный график так же не нарушает логики процесса передачи тепла от ребра в окружающую среду: чем выше температура, тем лучистая составляющая теплового потока больше конвективной.

Таким образом, полученное уравнение можно использовать в задачах сложного теплообмена в оребрённых поверхностях для нахождения распределения температур. Так же для таких задач можно использовать полученный параметр К, для оценки соотношения конвективной и лучистой составляющих теплового потока.

Решение уравнения (5) для одиночного ребра можно считать основой для его дальнейшего решения в системах рёбер различной конфигурации и с различными параметрами ребра и окружающей его среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. Учебник для втузов, изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.

2. *Юшко С.В., Лысикова И.В.* Теплообмен излучением диффузных поверхностей: Учебно-методическое пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004

3. *Сергиевский Э.Д., Хомченко Н.В., Яковлев И.В.* Расчет нестационарных параметров одиночного ребра численными методами. Методическое пособие по курсу «Математическое моделирование процессов тепломассообмена» для студентов, обучающихся по направлению «Промышленная теплоэнергетика», М., Изд. «МЭИ», 2002

УДК 674.047

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛАГОПРОВОДНОСТИ ПРИ СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ
METHOD OF DETERMINING DIFFUSION COEFFICIENTS AT WOOD DRYING

Игорь Витальевич Сапожников, Николай Владимирович Скуратов, Дмитрий Александрович Самойленко
Igor V. Sapozhnikov, Nikolay V. Skuratov, Dmitry A. Samoylenko

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Мытищинский филиал, Россия, Мытищи
Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi branch, Russia, Mytishchi
(e-mail: gosha@mgul.ac.ru)

Аннотация: Определены зависимости коэффициентов влагопроводности образцов из древесины сосны и березы от влажности путем решения обратной задачи для уравнения влагопроводности.

Abstract: Dependences of diffusion coefficients on moisture content for pine and birch samples have been determined by solving the inverse problem for the moisture conductivity equation.

Ключевые слова: сушка древесины, влажность, послойный метод, коэффициент влагопроводности.

Keywords: wood drying, moisture content, slicing technique, diffusion coefficient.

В растущем дереве содержится достаточно большое количество воды, которое требуется для обеспечения его жизнедеятельности. Для того, чтобы свежесрубленную древесину можно было использовать для производства подавляющего большинства изделий ее влажность должна быть снижена до уровня, установленного соответствующими техническими условиями.

Процесс сушки является одной из основных технологических операций в деревообработке, которая существенно влияет на себестоимость и качество продукции, изготавливаемой из древесины. В настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом,

наиболее распространенной является классическая конвективная сушка древесины. Ее особенности во-многом определяются характером внутреннего переноса влаги.

При низкотемпературной сушке, когда нет фазовых превращений, перемещение воды в древесине осуществляется, в основном, в жидкой фазе и носит выраженный градиентный характер [1, 2]. Влагоперенос в древесине имеет сложный многоуровневый характер, что и обуславливает зависимость коэффициента влагопроводности от многих факторов. К ним относятся в первую очередь направление потока влаги, температура, базисная плотность и влажность древесины.

Для расчетов и оптимизации процессов сушки и увлажнения древесины необходимо располагать данными о величине коэффициента влагопроводности, от которых существенно зависит интенсивность влагопереноса. В отечественной и зарубежной научной литературе имеется достаточно большое количество аналитических зависимостей коэффициента влагопроводности различных пород древесины, обобщающих данные прямых и косвенных экспериментов как для стационарных [3, 4, 5, 6, 7], так и для нестационарных процессов переноса влаги [8, 9, 10, 11].

Сравнительно недавно было разработано несколько методов определения коэффициентов влагопроводности, в которых используются решения обратной коэффициентной задачи для уравнения влагопроводности [12, 13, 14, 15, 16]. Значения коэффициентов влагопроводности древесины для одних и тех же пород, полученные разными исследователями, заметно отличаются друг от друга. Очевидно, это связано с различием используемых методик и свойств экспериментальных образцов древесины.

При современном уровне развития компьютерной техники и прикладной математики достоверность расчетов по математической модели определяется, в основном, точностью определения входящих в модель коэффициентов. Поэтому экспериментальные методы определения коэффициентов влагопроводности древесины по-прежнему остаются актуальными. В частности, надежные данные о коэффициентах влагопроводности нужны для расчетов сушильных напряжений [17, 18] и определения рациональных параметров режимов сушки древесины различных пород [19, 20].

Цель данной работы состояла в определении коэффициентов влагопроводности древесины сосны и березы по распределениям влажности в экспериментальных образцах, полученным на различных этапах сушки с помощью классического весового способа.

Для проведения экспериментов были подготовлены образцы из древесины сосны с базисной плотностью 420 кг/м^3 и березы с базисной плотностью 510 кг/м^3 размерами 30 х 130 х 800 мм и 8 х 70 х 800 мм соответственно. Для предотвращения во время сушки испарения воды с торцов и кромок образцов их покрывали водостойким силиконовым герметиком. Экспериментальные сушки сосновых образцов проводились при температуре 80°С и относительной влажности 60%, а березовых образцов – при температуре 65°С и той же относительной влажности. Скорость движения воздуха вдоль образцов в лабораторной сушильной камере составляла около 2 м/с. Начальное распределение влажности по толщине образцов определялось непосредственно перед началом эксперимента. С этой целью на расстоянии 50 мм от торца отпиливалась узкая секция шириной 7-10 мм, которая немедленно раскраивалась на 8-10 пластинок толщиной 1-3 мм. Пластинки взвешивались на электронных весах с точностью 0,001 г. Перед помещением образца обратно в сушильную камеру его торец вновь покрывался силиконовым герметиком. Локальная влажность в ходе эксперимента определялась аналогично.

На рис. 1 представлены распределения влажности по толщине березовых образцов, полученные в различные моменты времени. Как видно из рисунка, в начальный момент времени вода по толщине образцов была распределена неравномерно и несимметрично. Однако со временем, благодаря одинаковым условиям влагообмена на пластях образцов, кривые распределения влажности становятся более симметричными и похожими на параболы. Распределения влажности по толщине соснового образца показаны на рис. 2.

Некоторая несимметричность распределений влажности в данном образце обусловлена характером расположения в нем годичных слоев.

Численная оценка функциональной зависимости коэффициента влагопроводности осуществлялась на базе решения обратной коэффициентной задачи для уравнения влагопроводности, математическая модель которой включает само уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(a(u) \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right), \tag{1}$$

где u - влагосодержание древесины, кг/кг;

$a(u)$ - коэффициент влагопроводности, м^2/с,

начальные условия

$$u(x,0) = u_n(x) \tag{2}$$

и условия на границе

$$\frac{\partial u(0,t)}{\partial x} = 0; \quad a(u) \cdot \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} = \beta \cdot \left(u_s(T,\varphi) - u(l,t) \right) \tag{3}$$

Коэффициент влагообмена , м/с, на границе определялся по формуле [10]

$$\beta(T,\varphi) = 10^{-7} \cdot \left(1 - \left| \frac{\varphi - 0,45}{0,55} \right|^{1,5} \right) \cdot \left(18 - 0,6 \cdot T + 0,01 \cdot T^2 \right) \tag{4}$$

где T – температура, ^{0}C;

φ – относительная влажность, 1.

Равновесная влажность также определялась по формуле [10]

$$u_s(T,\varphi) = \left(327 - 1,5 \cdot T \right) \cdot e^{2.36085 \cdot \varphi - 9,21}. \tag{5}$$

В качестве функции цели выбиралась невязка отклонения решения задачи (1) – (5) от пространственного распределения влажности $u_i^e(x), \quad i = 1,n$, полученного их эксперимента

$$\Phi(a) = \sum_i \int_0^l \left(u(a,x,t_i) - u_i^e(x) \right)^2 dx \to \min.$$

Решение поставленной задачи осуществлялось с помощью интегрированного математического пакета Mathcad.

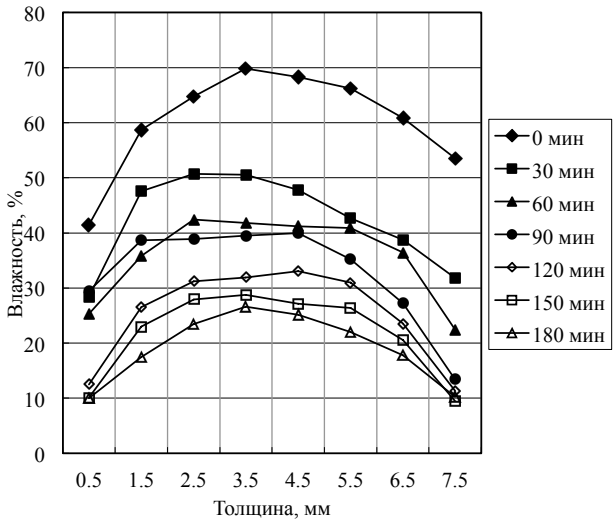


Рис. 1. Распределение влажности по толщине березового образца

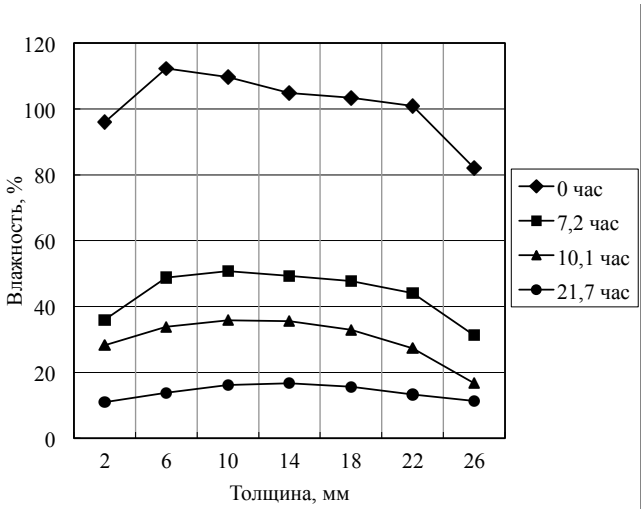


Рис.2. Распределение влажности по толщине соснового образца

Рассчитанные по полученным экспериментальным данным зависимости коэффициентов влагопроводности древесины сосны и березы, представлены на рис. 3.

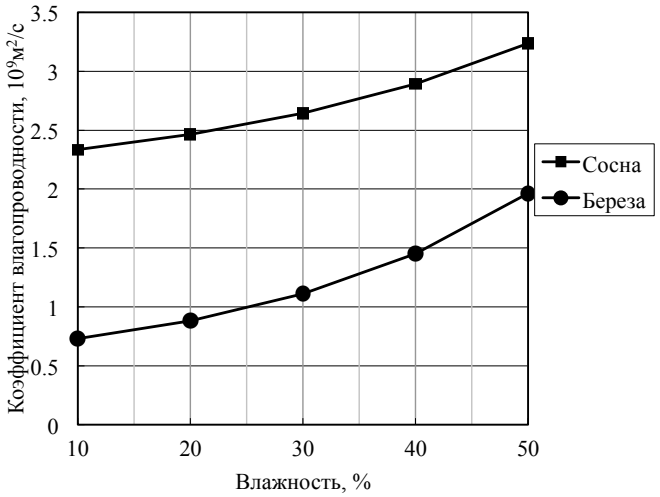


Рис. 3. Зависимость коэффициента влагопроводности древесины сосны (температура 80°С) и березы (температура 65°С) от влажности

Как видно из полученных зависимостей, коэффициент влагопроводности древесины сосны и березы существенно возрастает при повышении влажности. Небольшое снижение коэффициента для березы в начале диапазона связано, по-видимому, с неточностью определения локальной влажности. Полученные значения коэффициентов влагопроводности удовлетворительно согласуются с данными других исследователей для древесины тех же пород. В качестве достоинства классического весового способа определения локальной влажности следует отметить его простоту. Для его реализации не требуется дорогостоящее оборудование и приборы, но при этом, метод является достаточно трудоемким.

ЛИТЕРАТУРА

1.*Лыков А.В.* Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.

2.*Серговский П.С.* О механизме движения влаги в древесине при конвективной сушке //Деревообрабатывающая и лесохимическая промышленность. 1954. № 4. С. 3.

3.*Серговский П.С.* Влагопроводность древесины. 1955. №2. С.3.

4.*Skaar C.* Analysis of methods for determining the coefficient of moisture diffusion in wood // Forest Product Journal. 1954. V.4 (12). P. 403.

5.*Choong E.T.* Diffusion coefficients of softwoods by steady-state and theoretical methods // Forest Products Journal. 1965. V. 15(1). p 21.

6.*Siau J.F.* Transport processes in wood. Berlin.: Springer, 1984. 220 p.

7.*Lee H.W., Okano T., Ohta M.* Moisture transmission in wood. Moisture transfer and velocity of moisture transmission in a steady state // Mokuzai Gakkaishi 1991. V. 37 (2). P. 101.

8.*Comstock G. L.* Moisture Diffusion Coefficients in Wood as Calculated from Adsorption, Desorption and Steady-State Data // Forest Products Journal. 1963. V. 3(13). P. 97.

9.*Choong E.T. and Fogg P.J.* Moisture movement in six wood species // Forest Product Journal. 1968.V. 13(5). P. 66.

10.*Шубин Г.С.* Физические основы и расчет процессов сушки древесины. М.: Лесная промышленность, 1973. 248 с.

11.*Wadso L.* Studies of water vapor transport and sorption in wood. Doctoral Dissertation, Report TVBM-1013, Building Materials. Lund University. 1993. 155 p.

12.*Hukka A.* The Effective Diffusion Coefficient and Mass Transfer Coefficient of Nordic Softwoods as Calculated from Direct Drying Experiments // Holzforschung. 1999. V. 53(5). P. 534.

13.*Liu J.Y., Simpson W.T, and Verrill S.P.* An Inverse Moisture Diffusion Algorithm for the Determination of Diffusion Coefficient // Drying Technology. 2001. V.19(8). P. 1555.

14.*Weres J., Olek, W.* Inverse finite element analysis of technological processes of heat and mass transport in agricultural and forest products// Drying Technology 2005. V. 23(4). P.1737.

15.*Zhou Q., Cai Y., Xu Y., Zhang X.* Determination of moisture diffusion coefficient of larch board with finite difference method // Bioresources. 2011. V. 6(2). P. 1196.

16. *Сапожников И.В., Скуратов Н.В., Алексеева И.И., Самойленко Д.А., Мамонтов М.П., Матвеева К.А.* Определение коэффициентов влагопроводности при низкотемпературной сушке древесины // Лесной вестник. 2016. № 3. с. 34.

17.*Ugolev B.N., Skuratov N.V.* Stress-strain state of wood at kiln drying. // Wood Science and Technology. 1992. V. 26(3). P. 209.

18.*Ugolev B.N., Skuratov N.V., Gorbacheva G.A*. On differential wood shrinkage coefficient. // Drevarsky Vyskum. 1998. V. 43(3-4). P. 1.

19.*Скуратов Н.В.* Интенсификационные режимы сушки мягких хвойных пиломатериалов в камерах периодического действия // Деревообрабатывающая промышленность. 1982. № 7. с. 11.

20.*Skuratov N.V.* Intelligent wood drying control: problems and decisions. // Drying Technology. 2008. V. 26(5). P. 585.

УДК 66.096.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В АППАРАТЕ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ
EXPERIMENTAL STUDY OF THE DRYING PROCESS OF SILICA GEL IN A FLUID BED DRYER

Александр Александрович Надеев, Александр Валентинович Бараков, Юрий Николаевич Агапов
Alexander A. Nadeyev, Alexander V. Barakov, Yuriy N. Agapov

Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж
Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh
(e-mail: alekn85@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрена конструкция установки периодического действия для сушки дисперсных материалов в центробежном псевдоожиженном слое. Приведены результаты предварительной серии экспериментов по исследованию кинетики сушки.

Abstract: The design of the batch dryer of loose materials in a centrifugal fluidized bed is considered. The results of preliminary series of experiments to study of the drying kinetics are resulted.

Ключевые слова: сушильная установка, псевдоожиженный слой, влагосодержание, сушильный агент, дисперсный материал.

Keywords: dryer, fluidized bed, moisture content, drying agent, loose material.

Одним из наиболее эффективных способов сушки дисперсных материалов является сушка в псевдоожиженном слое. Данный способ позволяет интенсифицировать процессы межфазного тепло- и массообмена и организовать перемещение дисперсного материала без использования механических транспортёров.

Для исследования процесса сушки дисперсных материалов с использованием данного технологического принципа была создана экспериментальная сушильная установка периодического действия с центробежным псевдоожиженным слоем. Эта установка в отличие от прошлой разработки (многосекционный аппарат [1 - 3]) имеет более простую конструкцию и позволяет высушивать материалы с повышенным влагосодержанием без использования дополнительных секций.

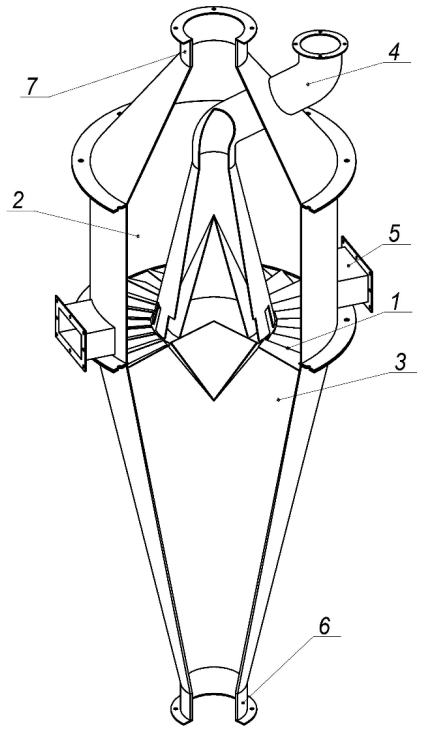


Рис. 1. Экспериментальная сушильная установка периодического действия с центробежным псевдоожиженным слоем: 1 – газораспределительная решётка; 2 – рабочая камера; 3 – газовая камера; 4 – загрузочный патрубок; 5 – разгрузочный патрубок; 6 – газоподводящий патрубок; 7 – газоотводящий патрубок

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Её основным элементом является кольцевая рабочая камера 2, в которой осуществляется процесс сушки. Она отделена распределительной решёткой 1 от газовой камеры 3, которая служит для подачи сушильного агента (воздуха) под решётку. Принцип работы сушильной установки следующий. Влажный материал из бункера через загрузочный патрубок 4 подаётся на газораспределительную решётку и под действием потока сушильного агента ожижается и циркулирует в рабочей камере. После высушивания материал выгружается из установки через разгрузочные патрубки 5. Подача сушильного агента в аппарат осуществляется через патрубок 6, выброс в окружающую среду – через патрубок 7.

Схема испытательного стенда и методика исследования приведены в [4].

Первая (предварительная) серия экспериментов была посвящена исследованию кинетики сушки силикагеля. Этот материал является удобным объектом исследований тепломассообмена и гидродинамики [5, 6]. Температура воздуха в лаборатории составляла $t_{н.в.} = 24$ °С, влажность $\varphi_{н.в.} = 42$ %. Массовый расход сушильного агента $G_г = 0,2$ кг/с. Температура сушильного агента на входе в установку $t'_г$ изменялась в диапазоне от 50 до 70 °С. Материал высушивался до равновесного влагосодержания.

По результатам экспериментального исследования были построены графики зависимости влагосодержания силикагеля, а также температуры и влажности сушильного агента на выходе из установки от продолжительности сушки, т.е. $u_m = f_1(\tau)$, $t''_г = f_2(\tau)$, $\varphi''_г = f_3(\tau)$. На рис. 2 представлены графики для начальной температуры сушильного агента 50, 60 и 70 °С.

Из графиков $t''_г = f_2(\tau)$ и $\varphi''_г = f_3(\tau)$ видно, что максимальная влажность и минимальная температура сушильного агента совпадают по времени, которое примерно соответствует времени начала второго периода сушки (критическому влагосодержанию).

Как уже отмечалось в работе [2], при регенерации силикагеля в сушильном шкафу требуется поддерживать температуру более 150 °С. В данной экспериментальной установке максимальная температура сушильного агента составляла 70 °С. Таким образом, результаты проведённых опытов подтвердили работоспособность сушилки и показали высокую эффективность процесса сушки в ней.

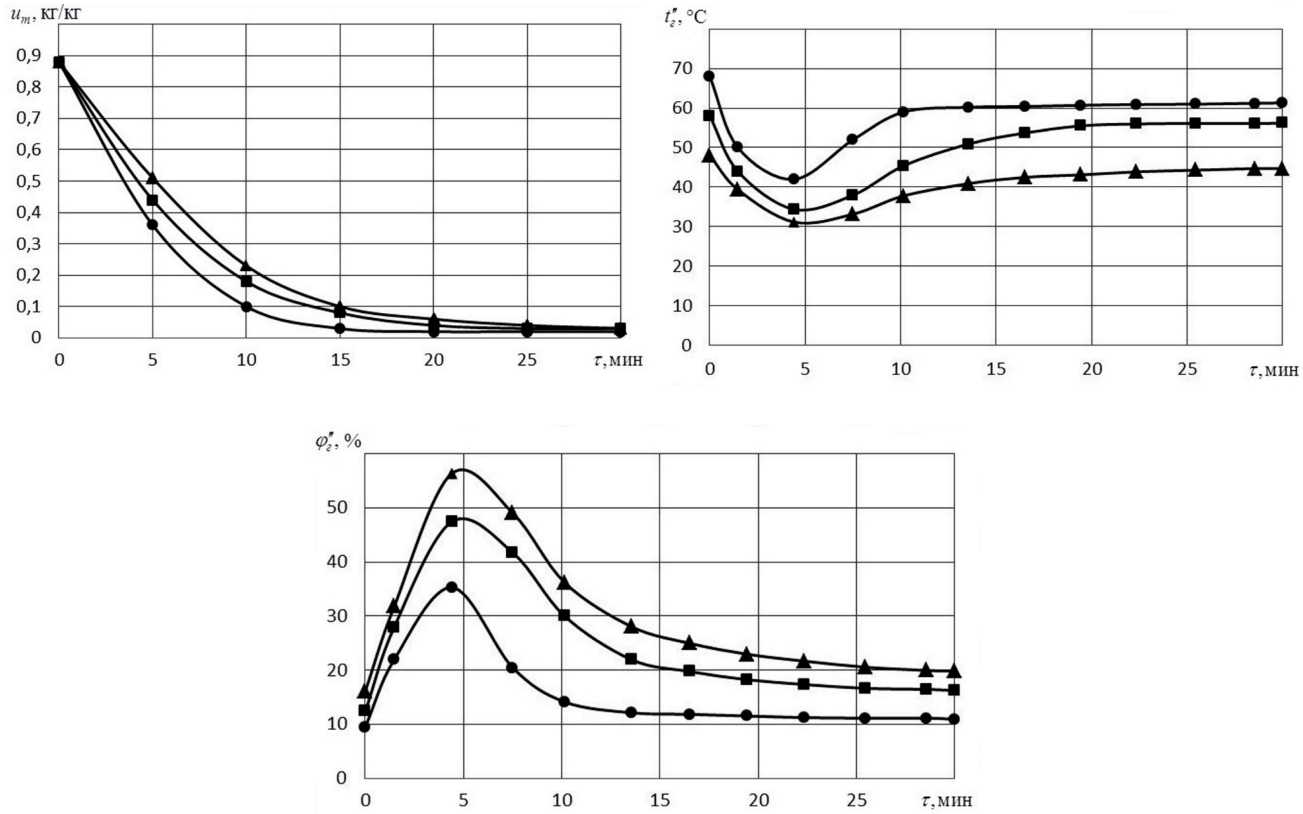


Рис. 2. Графики зависимости влагосодержания силикагеля, конечной температуры и влажности сушильного агента от времени сушки: ▲ – 50 °С, ■ – 60 °С, ● – 70 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Надеев А.А., Агапов Ю.Н., Стогней В.Г.* Сушилка термочувствительных сыпучих материалов с центробежным псевдоожиженным слоем. Патент на полезную модель № 84519. Кл. МПК - F26B 17/10.10.07.2009.

2. *Надеев А.А., Бараков А.В., Дубанин В.Ю.* Экспериментальное исследование сушки дисперсных материалов в центробежном псевдоожиженном слое // 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. М.: ФГБОУ ВО МГУДТ, 2016. Т.2. С. 97 - 99.

3. *Надеев А.А., Агапов Ю.Н., Стогней В.Г.* Экспериментальные исследования аэродинамики установки для сушки сыпучих материалов в центробежном псевдоожиженном слое // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 5. С. 76-78.

4. *Надеев А.А.* Гидродинамика и тепломассообмен в сушильной установке с центробежным псевдоожиженным слоем. Автореф. дис. … канд. техн. наук. Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2013. 16 с.

5. *Бараков А.В., Бырдин А.П., Надеев А.А.* Температуры фаз динамического слоя во втором периоде сушки в заданном диапазоне регулируемых параметров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 6. С. 97-100.

6. *Агапов Д.Ю., Надеев А.А., Родионов К.Н., Стогней В.Г., Клейников И.Ю.* Экспериментальное сравнение газораспределительных устройств для формирования центробежного слоя // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 7.1. С. 118-121.

УДК 664.723

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА
WAYS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE DRYING PROCESS OF GRAIN

Вениамин Алексеевич Резчиков, Светлана Вениаминовна Савченко
Veniamin A. Rezchikov, Svetlana V. Savchenko

Московский государственный университет пищевых производств, Россия, Москва
Moscow state University of food production, Russia, Moscow
(e-mail: uusvetlana@mail.ru)

Аннотация: Представлены результаты собственных экспериментальных исследований авторов в области применения сушки зерна с предварительным нагревом и повторным использованием отработавшего сушильного агента.

Abstract: The results of our own research experimental studies in the field of the application of grain drying with pre-heating and reuse of spent drying agent were submitted.

Ключевые слова: зерно, сушка зерна, экономичность процесса сушки, предварительный нагрев зерна, отработавший агент сушки.

Keywords: grain, the grain drying, the efficiency of the drying process, pre-heating of the grain, the spent drying agent.

Растительное происхождение зерна, его биологическая природа и производств в районах с неблагоприятными климатическими условиями предопределяют необходимость сушки свежеубранного зерна с приведением его в стойкое для хранения состояние.

Отечественная и мировая практика зерносушения базируется в основном на тепловом способе сушки с конвективным энергоподводом.

Вместе с тем, при всей простоте и доступности применяемые средства конвективной сушки не удовлетворяют современным требованиям экономичности процесса сушки.

Анализ среднестатистических данных тепловых балансов зерносушильных установок показывает, что из всего подводимого в них тепла только 40-45% расходуется на испарение влаги, около 20% тратится на нагрев зерна, примерно 25-30% выбрасывается с отработавшим воздухом и около 5% теряется в окружающую среду через стенки сушильной камеры и воздухопроводов и с утечками нагретого воздуха через неплотности соединений.

Политика энергосбережения при сушке зерна базируется, прежде всего, на дальнейшем совершенствовании технологии и техники зерносушения, техническом перевооружении, модернизации и реконструкции действующих зерносушилок и топочных устройств, повторном использовании отработавшего сушильного агента, повышении эффективности эксплуатации зерносушилок, внедрении систем автоматического контроля и управления процессом сушки, переводе топок на сжигание менее дорогостоящих видов топлива, поиска альтернативных источников энергии.

Задачу повышения экономичности процесса сушки зерна необходимо решать в неразрывной связи с совершенствованием технологии сушки, в частности, с интенсификацией удаления влаги. Ускорение процесса предопределяет сокращение продолжительности сушки, снижение расхода сушильного агента, уменьшение размеров сушильной установки. Кроме того, чем меньше зерно находится в нагретом состоянии, тем меньше глубина происходящих биохимических изменений и превращений в зерне, тем больше гарантия сохранения его качества.

Однако, решая задачу интенсификации сушки необходимо строго учитывать технологические ограничения к режимным параметрам процесса, обусловленные специфическими свойствами зерна разных культур. Так, например, при жестком режиме сушки вследствие интенсивного нагрева и обезвоживания зерно быстро нагревается до предельно допустимой температуры, не успевая отдать требуемое количество влаги,

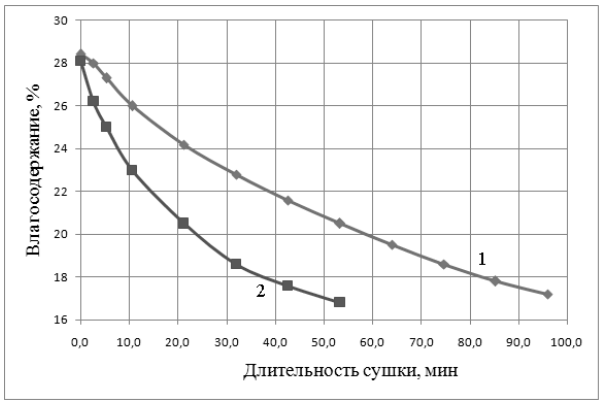
вследствие чего возможна деформация его тканей и микрорастрескивание. Особенно губительна сушка при жестких режимах для крупяных и бобовых культур, кукурузы и зерна семенного назначения.

При жестком режиме сушки вследствие быстрого испарения влаги из поверхностных слоев зерна и изменения их структуры возможно увеличение в них концентрации влаги благодаря интенсивному перемещению ее из внутренних слоев эндосперма.

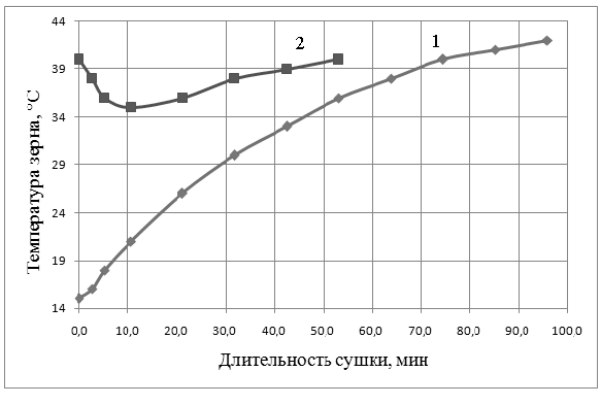
В технологических схемах сушки зерна с непрерывным теплоподводом по ходу процесса период прогрева зерна занимает большую его часть. В этом случае испарение влаги протекает при температуре зерна ниже предельно допустимой с постепенным углублением поверхности испарения внутрь зерновки.

Влага в зерне достаточно прочно связана с его тканями и клетками, причем энергия связи различна для разных диапазонов влагосодержания. При удалении все более прочно связанной влаги резко замедляется скорость сушки, в результате чего все большая доля теплоты, подводимой сушильным агентом, расходуется на нагрев зерна, а не на испарение влаги, возрастает температура отработавшего агента сушки, уменьшается степень его насыщения.

Одним из наиболее эффективных методов интенсификации процесса сушки является предварительный нагрев зерна до предельно допустимой температуры, в результате чего коэффициент диффузии влаги в зерне возрастает в большей мере, чем интенсивность внутреннего потока влаги. Это обусловливает уменьшение градиента влагосодержания, в связи с чем зона испарения влаги располагается вблизи поверхности зерна, что непосредственно влияет на энергетику процесса. Подводимая к зерну теплота расходуется только на превращение влаги в пар, поскольку снижается или вовсе исключается расход теплоты на перегрев образующегося пара в случае углубления поверхности испарения.



Кривые сушки



Термограммы зерна

Рис. 1. Кривые кинетики сушки проса: 1 – прямоточная сушка; 2 – сушка с предварительным нагревом зерна

При поступлении предварительно нагретого зерна в сушильную камеру испарение влаги с его поверхности протекает настолько интенсивно, что в начале процесса температура зерна снижается, несмотря на подвод теплоты извне (рис.1). На испарение влаги расходуется не только теплота сушильного агента, но и часть теплоты, аккумулированной зерном в процессе предварительного нагрева.

Снижение температуры нагрева зерна в начальный период сушки, сопровождающееся интенсивным испарением влаги, служит надежной защитой от перегрева зерна, что создает лучшие условия для сохранения его качества.

Предварительный нагрев зерна, интенсифицируя процесс, позволяет применить на стадии сушки более мягкие режимы с пониженной температурой сушильного агента, что также способствует более полному сохранению качества зерна и повышению экономичности процесса сушки.

По мере развития процесса сушки подвод влаги к поверхности зерна ослабляется, происходит углубление зоны испарения внутрь зерна, температура его начинает повышаться. Чем жестче режим сушки и выше температура сушильного агента, тем быстрее углубляется зона испарения и тем интенсивнее повышается температура зерна. Режим сушки, при котором температура зерна в конце процесса достигает начального значения, назван нами «квазиизотермическим».

Предварительный нагрев зерна не только интенсифицирует испарение влаги, но и обеспечивает возможность сокращения потерь теплоты с отработавшим сушильным агентом, поскольку его температура практически равна температуре влаги, испаряющейся с поверхности зерна. Это находит отражение в снижении удельного расхода теплоты на сушку.

Учитывая специфические свойства зерна, его предварительный нагрев целесообразно осуществлять при интенсивном теплоподводе за наиболее короткий промежуток времени. В определенной мере этим условиям отвечает конвективный нагрев зерна в псевдоожиженном и падающем слое. В настоящее время созданы и применяются на практике соответствующие эффективные промышленные аппараты. Так, нагреватели зерна в псевдоожиженном слое производительностью от 10 до 50 т/ч позволяют нагревать зерно пшеницы до предельно допустимой температуры 45-50ºС агентом температурой 150-200ºС всего за 25-40 с.

Известен положительный опыт внедрения в промышленном масштабе разработанного эффективного метода повторного использования отработавшего сушильного агента, обеспечивающего повышение тепловой экономичности процесса сушки.

За счет повторного использования отработавшего агента сушки достигается смягчение режима на стадии сушки зерна благодаря снижению температуры сушильного агента и повышению его влагосодержания.

Кратковременный интенсивный предварительный нагрев зерна и дальнейшая сушка в условиях высокого насыщения водяным паром межзернового пространства обусловливают значительное повышение коэффициента диффузии влаги в зерне, что предовращает перегрев и пересушивание его поверхности.

Проведенные нами исследования позволили развить модельные представления о механизме сушки зерна агентом повышенного влагосодержания, выявить кинетические закономерности процесса.

Установлено, что для процесса сушки зерна влажным агентом характерно наличие двух периодов. В первом периоде происходит интенсивный нагрев зерна до температуры мокрого термометра, сопровождающийся сравнительно небольшим увлажнением поверхности зерна. Во втором периоде отмечается убывающая скорость сушки зерна и повышение его температуры. Границей периодов является экстремальная точка на кривой сушки.

Отмеченный характер протекания процесса не зависит от режимных параметров и начальной влажности зерна, изменяются лишь взаимосвязанные величины скорости нагрева и сушки зерна.

Вследствие смягчающего теплового воздействия агента повышенного влагосодержания и предотвращения пересушивания поверхности зерна допустимая температура нгагрева зерна на 5-7ºС выше, чем при сушке сухим агентом.

Проведенные исследования позволили обосновать технологическую и технико-экономическую эффективность сушки зерна агентом температурой 70-80ºС и начальным влагосодержанием 30-40 г/кг с.в. Сушка при указанных режимных параметрах обеспечивает более полное сохранение качества зерна в сравнении с сушкой при применяемых в настоящее время режимах. Эти параметры согласуются с техническими возможностями зерносушилок, переведенных на работу с повторным использованием отработавшего сушильного агента.

Схемы повторного использования отработавшего агента сушки разнообразны. По одной из них в реконструированной зерносушилке отработавший агент сушки непосредственно возвращается в сушильную зону, по другим схемам он смешивается со

свежим сушильным агентом и направляется в зону сушки или в аппарат для предварительного нагрева зерна. Известны варианты повторного использования отработавшего сушильного агента в качестве теплоносителя в различного рода утилизационных установках.

Таким образом, актуальность задач всемерного повышения тепловой экономичности процесса сушки зерна несомненна, теоретические основы дальнейшего совершенствования технологии разработаны, практическая реализация предлагаемых методов и способов в промышленных зерносушилках реальна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Резчиков В.А. Теория и практика энергосбережения при сушке зерна// Обзорная информация. Серия: Элеваторная промышленность. – М.:ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. – 56с.

2. Резчиков В.А. Теплофизические и технологические методы повышения эффективности сушки зерна: дисс…. докт.техн.наук. М.: МТИПП,1988. – 513 с.

3. Савченко С.В. Научно-практические основы модернизации технологии зерносушения: монография. - М.: Издательский комплекс МГУПП, 2012. – 248 с.

УДК 677.074

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССЕ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ
MATHEMATIC MODEL NON-STATIONARY HEAT TRANSFER IN PROCESS CONVECTIVE DRYING OF VEGETATIVE RAW MATERIALS

Александр Николаевич Остриков, Иван Николаевич Столяров
Alexander N. Ostrikov, Ivan N. Stolyarov

Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, Воронеж
Voronezh state university of engineering technologies, Russia, Voronezh
(e-mail: ostrikov27@yandex.ru)

Аннотация: Приведено математическое моделирование процесса сушки и разработан алгоритм численного решения нестационарной краевой задачи теплопроводности с переменными тепломассообменными коэффициентами высушиваемого продукта, граничными и начальными условиями, а также фазовым переходом с подвижной границей раздела фаз. Для решения математической модели использован зональный метод решения задачи нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности для параллелепипеда с учетом внутренних источников теплоты. Показано соответствие расчетных данных экспериментальным значениям при относительной ошибке моделирования 8…10 %.

Abstract: Mathematical modelling of process of drying is resulted and the algorithm of the numerical decision of a non-stationary regional problem of heat conductivity with variable heat and mass transfer coefficients of a dried product, boundary and entry conditions, and also phase transition with mobile phase boundary is developed. For the solution of mathematical model the zone method of the solution of a problem of the non-stationary three-dimensional equation of heat conductivity for a parallelepiped taking into account internal sources of warmth. The correspondence of calculated data with the experimental values of the relative error modeling was shown 8 ... 10 %.

Ключевые слова: математическая модель, сушка, растительное сырье, теплопроводность, зональный метод.

Keywords: mathematical model, drying, vegetative raw materials, heat conductivity, a zone method.

Предлагается математическое моделирование процесса конвективной сушки путем

численного решения нестационарной краевой задачи теплопроводности с переменными тепломассообменными коэффициентами высушиваемого продукта, граничными и начальными условиями, а также фазовым переходом с подвижной границей раздела фаз.

В процессе сушки сыпучих дисперсных материалов перенос влаги в твердой фазе осуществляется массопроводностью и термодиффузией, а перенос теплоты обусловлен фазовыми превращениями, поэтому массо- и теплопроводность описываются дифференциальными уравнениями [3]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \operatorname{div}\left[k\left(C, T\right)\cdot\left(\operatorname{grad} C + \delta_{т}\left(C, T\right)\operatorname{grad} T\right)\right], \tag{1}$$

$$c\,\rho_o \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}\left(\lambda\left(C, T\right)\cdot \operatorname{grad} T\right) + q\,\rho_o \frac{\partial C}{\partial \tau}, \tag{2}$$

где C – концентрация распределяемой влаги, кг/кг; T – температура, К; τ – время, с; $q\,\rho_O \dfrac{\partial C}{\partial \tau}$ – действующий в данной точке сток теплоты, Вт/м^3; q – удельная теплота фазового превращения $q = \varepsilon \cdot r_{\text{с}}$, (ε – критерий фазового превращения, $\varepsilon = D_1/(D_1 + D_2)$ – соотношение потоков парообразной фазы (индекс 1) и жидкой фазы (индекс 2); $r_{\text{с}}$ – удельная теплота парообразования, кДж/кг; c – удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг·К); ρ_o – плотность высушиваемого продукта, кг/м^3; λ – коэффициент теплопроводности сухого продукта, Вт/(м·К); k – коэффициент массопроводности, м^2/с; $\delta_{т} = \left(\Delta u/\Delta t\right)_{q_m=0}$ – относительный коэффициент термодиффузии влажного материала, кг вл./(кг. сух. вещ.·К).

В процессе сушки продукт изменяется в объеме. Поэтому задача (1-2) рассматривается, как задача с подвижными границами [1].

Предполагалось, что в начальный момент времени $\tau = 0$ в каждой точке частицы высушиваемого продукты, имеющей форму параллелепипеда: $-l_1 \le x \le l_1$, $-l_2 \le y \le l_2$, $-l_3 \le z \le l_3$ задана постоянная температура $t_{\text{н}}$, а на его границах происходит теплообмен со средой, имеющую температуру $t_{\text{с}}$ по закону Ньютона [3].

Считалось, что для любого τ на интервале времени $\left[0, \tau_{\text{к}}\right]$, где $\tau_{\text{к}}$ – время сушки, известны скорость сушки продукта $\partial u(\tau)/\partial \tau$ и изменение линейных размеров частицы высушиваемого продукта от времени сушки: $l_1 = l_1(\tau)$, $l_2 = l_2(\tau)$, $l_3 = l_2(\tau)$.

Тогда уравнение теплопроводности с подвижными границами, при условии, что тепломассообменные коэффициенты постоянные на интервале времени $\left[0, \tau_k\right]$, $\tau_k \le \tau_{\text{к}}$ представлялось в виде уравнения теплопроводности с неподвижными границами

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) + \frac{\varepsilon\, r_c}{c}\frac{\partial u}{\partial \tau}\,. \tag{3}$$

с начальным условием

$$t = t_{\text{н}} \qquad \text{при} \quad \tau = 0; \tag{4}$$

и граничными условиями:

$$\frac{\partial t}{\partial x} - \alpha\left(t - t_{\text{с}}\right) = 0 \quad \text{при } x = -l; \quad \frac{\partial t}{\partial x} + k\left(t - t_{\text{с}}\right) = 0 \quad \text{при } x = l;$$

$$\frac{\partial t}{\partial y} - \alpha\left(t - t_{\text{с}}\right) = 0 \quad \text{при } y = -l; \quad \frac{\partial t}{\partial y} + k\left(t - t_{\text{с}}\right) = 0 \quad \text{при } y = l;$$

$$\frac{\partial t}{\partial z}-\alpha\left(t-t_{\text{с}}\right)=0 \quad \text{при } z=-l\,; \quad \frac{\partial t}{\partial z}-k\left(t-t_{\text{с}}\right)=0 \quad \text{при } z=l\,, \tag{5}$$

где $a=\lambda/c\rho_o$ – коэффициент температуропроводности, м^2/с;

Коэффициент теплообмена с окружающей средой (α, Вт/(м^2·К)) являлся постоянной величиной на всех гранях параллелепипеда $\alpha=\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3$.

Система уравнений (3) - (5) приведена к безразмерному виду:

$$\frac{\partial T}{\partial \text{Fo}}=\Delta T-\varepsilon\ \text{Ko}\frac{\partial U}{\partial \text{Fo}}; \tag{6}$$

$$T\big|_{\text{Fo}=0}=0; \tag{7}$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial X}\right|_{X=-1}+\text{Bi}\left(1-T\big|_{X=-1}\right)=0;\ \left.\frac{\partial T}{\partial X}\right|_{X=1}-\text{Bi}\left(1-T\big|_{X=1}\right)=0;$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial Y}\right|_{Y=-1}+\text{Bi}\left(1-T\big|_{Y=-1}\right)=0;\ \left.\frac{\partial T}{\partial Y}\right|_{Y=1}-\text{Bi}\left(1-T\big|_{Y=1}\right)=0; \tag{8}$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial Z}\right|_{Z=-1}+\text{Bi}\left(1-T\big|_{Z=-1}\right)=0;\ \left.\frac{\partial T}{\partial Z}\right|_{Z=1}-\text{Bi}\left(1-T\big|_{Z=1}\right)=0;$$

где $X=x/\text{R}$, $Y=y/R$, $Z=z/\text{R}$ – безразмерные координаты, R – половина стороны частицы; $T=\dfrac{t-t_{\text{н}}}{t_{\text{с}}-t_{\text{н}}}$ – безразмерная температура; $U=\dfrac{u_{\text{н}}-u}{u_{\text{н}}-u_{\text{р}}}$ – безразмерное влагосодержание; $t_{\text{с}}$, $u_{\text{р}}$ – значения температуры среды и конечного влагосодержания; $\Delta T=\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\dfrac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа; $\text{Fo}=a\tau/R^2$ – критерий Фурье; $\text{Bi}=\alpha R/\lambda$ – теплообменный критерий Био; $U=U\left(\tau\right)$ – заданная функция.

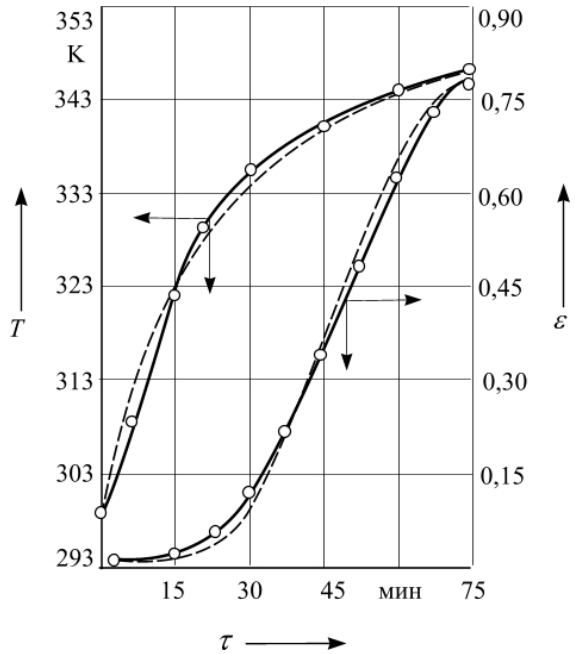


Рисунок 1. Зависимости изменения температуры *d* кубика картофеля и коэффициента фазового превращения в процессе сушки, (*v* = 1,3 м/с; *T* = 333 К; сплошная линия – экспериментальная; штриховая – расчетная)

Зональный метод решения задачи нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности для параллелепипеда с учетом внутренних источников теплоты [3] был проверен по экспериментальным данным сушки картофеля с использованием данных (табл. 1).

Решена обратная задача нелинейной теплопроводности с переменными параметрами. При постоянных значениях влагосодержания и размеров стороны высушиваемой частицы на каждом шаге методом машинного эксперимента найдены текущие значения коэффициента фазового превращения при условии максимального сближения расчетных и экспериментальных данных.

Результаты моделирования процесса сушки зональным методом приведены на рис. 1.

Таблица 1. Данные для зонального решения трехмерного уравнения нестационарной теплопроводности

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение, интервал
Время сушки	$\tau_к$	мин	75
Начальное влагосодержание продукта	$U_н$	кг/кг	3,36
Начальная температура продукта	$T_н$	^{0}C	21,5
Удельная теплоемкость продукта	c	Дж/(кг·К)	3620
Плотность продукта	$\rho_о$	кг/м^3	1034,1
Коэффициент теплопроводности сухого продукта	λ	Вт/(м·К)	0,64
Температура теплоносителя	T_c	^{0}C	60
Коэффициент теплообмена с теплоносителем	α	Вт/(м^2·К))	10
Удельная теплота парообразования	r_c	кДж/кг	2400
Коэффициент фазового превращения	ε	–	0…1

Таким образом, предлагаемое численно-аналитическое решение задачи нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности с учетом внутренних источников теплоты на испарение влаги показало соответствие расчетных данных экспериментальным значениям при относительной ошибке моделирования 8…10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексанян, И. Ю.* Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения: дисс. докт. техн. наук: 05.18.12: / Алексанян Игорь Юрьевич. – Астрахань, 2001. 266 с.

2. *Лыков, А. В.* Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1978. 479 с.

3. *Остриков А.Н.*, Численно-аналитическое решение трехмерной модели нестационарного теплопереноса в процессе конвективной сушке пищевого растительного сырья /А. Н. Остриков, И. Н. Столяров / Известия вузов. Пищевая технология. 2014. – № 2-3. – С. 116-120.

УДК 664.723

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУШКИ ЗЕРНА
THE ENERGY AND TECHNOLOGICAL IMPROVEMENT OF GRAIN DRYING

Вениамин Алексеевич Резчиков, Светлана Вениаминовна Савченко
Veniamin A. Rezchikov, Svetlana V. Savchenko

Московский государственный университет пищевых производств, Россия, Москва
Moscow state University of food production, Russia, Moscow
(e-mail: uusvetlana@mail.ru)

Аннотация: Представлены результаты собственных экспериментальных исследований авторов в области энерготехнологического совершенствования сушки зерна.

Abstract: Results of our own experimental studies in the field of energy and technological improvement of grain drying were shown.

Ключевые слова: зерно, тепловая конвективная сушка, влагосодержание, температура агента сушки.

Keywords: grain, the heat convection drying, the drain moisture, the temperature of the agent of drying.

Огромная значимость зерна +как сырья для производства массовых продуктов питания, сезонность его производства, необходимость создания зерновых запасов и устойчивого хранения их в течение года и более предопределяют приоритетность энерготехнологического совершенствования сушки зерна.

Наибольшее практическое применение в зерносушении имеет тепловая конвективная сушка.

Проведенные научные исследования в этой области базируются, прежде всего, на изучении кинетики сушки как сложного тепломассообменного процесса, сопровождающегося изменениями многообразных физических, физико-химических и биохимических свойств зерна.

Специфические свойства зерна как объекта сушки в значительной мере обусловлены особым состоянием воды, содержащейся в зерне, и механизмом взаимодействия ее с веществами зерна, причем зерно отличается высокой энергией связи влаги. В зависимости от величины энергии связи принято различать химически связанную, физико-химически связанную и физико-механически связанную влагу в зерне.

Удаляемая при тепловой конвективной сушке физико-химически связанная влага перемещается внутри зерна в основном в виде пара, т.е. сушка протекает за счет молекулярного переноса пара, что и предопределяет соответствующий характер снижения влагосодержания зерна.

Адсорбционно связанная влага, имеющая значительную энергию связи, может быть удалена только с дополнительными затратами энергии, направленной на разрушение связи влаги с зерном, превращение ее в пар, перемещение к поверхности зерновок и удаление за счет постепенного испарения во всей толщине зоны испарения.

Выявленный характер протекания процесса сушки обусловливается сложным механизмом перемещения влаги в зерна, который, в свою очередь, определяется формой и энергией связи влаги в зерна и соответствующим режимом сушки (рис.1).

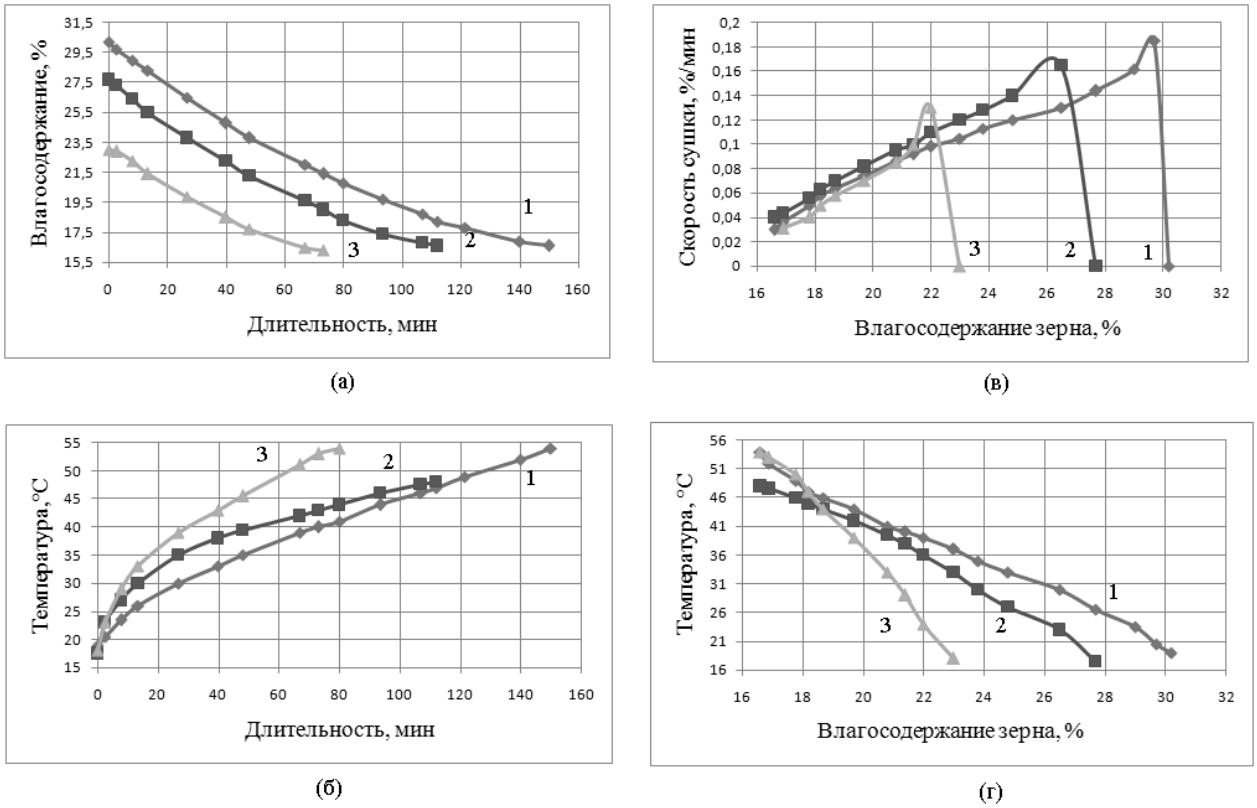


Рис. 1. Кривые кинетики сушки зерна пшеницы разного начального влагосодержания:
а – кривые сушки; б – термограммы зерна; в – кривые скорости сушки; г – температурные кривые
1 – w_1^c= 30,2%; 2 – w_1^c= 27,7%; 3 – w_1^c= 23,0%

Отчетливо проявляется характерная для сушки зерна взаимосвязь между процессами тепло- и влагообмена – опережающий темп нагрева зерна в сравнении со скоростью его обезвоживания. Вследствие этого возможное снижение влажности зерна за один пропуск его через сушилку ограничено достижением предельно допустимой температуры зерна.

Экспериментально установлено, что при смягчении режима сушки (с понижением температуры сушильного агента) процесс нагрева зерна замедляется, в то же время увеличивается величина возможного снижения влагосодержания без риска перегрева зерна выше предельно допустимой температуры (рис.2). π

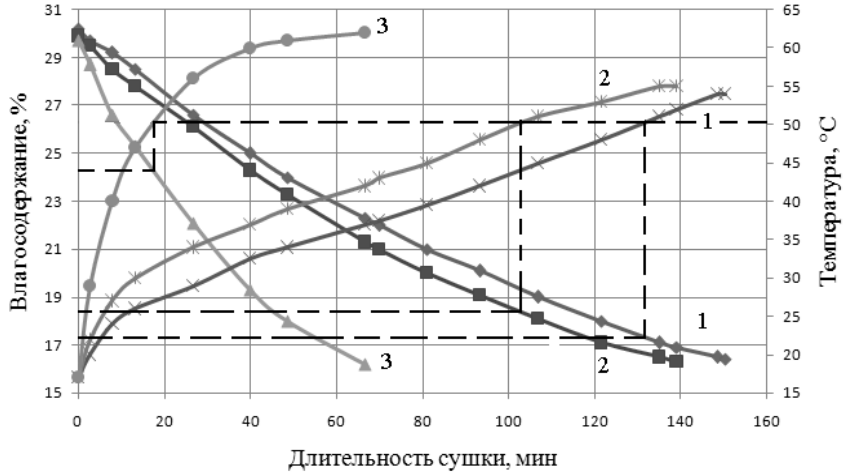


Рис.2. Возможное снижение влагосодержания зерна без риска перегрева его выше допустимой температуры при различных температурных режимах:
1– t_1= 70ºС; 2 – t_2= 75ºС; 3 – t_3= 85ºС

Выявлена количественная связь между тепло- и влагообменом в процессе сушки зерна.

По уравнению баланса тепла, подведенного к зерну и потраченного на испарение влаги и на нагрев зерна, расчетным путем на основе анализа кривых кинетики сушки определены значения температурного коэффициента $\frac{d\bar{\theta}}{d\bar{u}}$ и его изменение по мере протекания процесса сушки (рис.3).

Установлено, что по мере протекания процесса сушки температурный коэффициент уменьшается, причем темп снижения величины температурного коэффициента зависит от температуры сушильного агента. Чем выше температура сушильного агента, тем интенсивнее углубление поверхности испарения внутрь зерна.

Определено изменение численных значений критерия Ребиндера в диапазонах влагосодержания от 32 до 16% и температуры сушильного агента от 70 до 100°С, наиболее характерных для практики зерносушения.

Установлено, что понижение температуры сушильного агента со 100°С до 70°С обусловливает снижение скорости нагрева зерна при сушке при изменении его влагосодержания на единицу более чем в 2 раза; соответственно этому изменяется критерий Ребиндера.

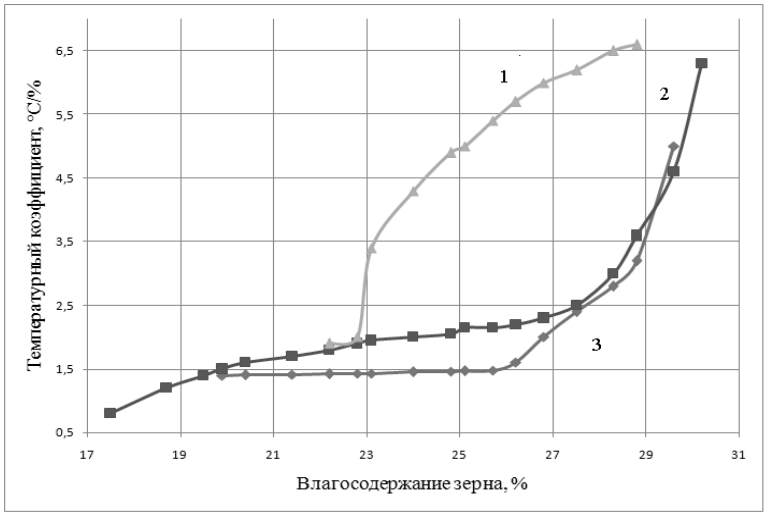


Рис. 3. Изменение температурного коэффициента в процессе сушки зерна при разных температурах сушильного агента:
1 – 100°С; 2 – 85°С; 3 – 70°С

Максимальное значение число Ребиндера имеет в начале процесса сушки. По мере протекания процесса сушки число Ребиндера уменьшается. С повышением температуры сушильного агента доля тепла, расходуемого на нагрев зерна увеличивается, критерий Ребиндера возрастает.

Таким образом, полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о целесообразности смягчения температурного режима при сушке зерна с целью повышения энерготехнологической эффективности процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Резчиков В.А. Теплофизические и технологические методы повышения эффективности сушки зерна: дисс…. докт. техн. наук. М.: МТИПП,1988. – 513 с.

2. Савченко С.В. Научно-практические основы модернизации технологии зерносушения: монография. - М.: Издательский комплекс МГУПП, 2012. – 248 с.

УДК 663.854.78

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УТИЛИЗАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОСКОВ
RESEARCHES BY PROCESSES OF RECYCLING PLANT WAXES

Лариса Леонидовна Руднева, Светлана Ивановна Бухкало
Larisa L. Rudneva, Svetlana I. Buhkhalo

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина
National Technical University «KhPI», Kharkiv, Ukraine
(e-mail: bis.khr@gmail.com)

Аннотация: Исследованы технологические стадии процесса получения восков растительного происхождения. Определены основные закономерности протекания технологических стадий процесса экстракции воскоподобных веществ. Представлены результаты исследования основных свойств полученных восков из отходов – лузги подсолнечника. Показана эффективность их использования в различных отраслях промышленности и стоматологии.

Abstract: In this article, we investigated the processes of production and the use of plant waxes. Properties of the plant waxes were analyzed. We have described basic regularities of wax-like substances extraction process from waste – sunflower husks. We have shown the effectiveness of their use in various industries, and dentistry.

Ключевые слова: лузга подсолнечника, растительные воски, процессы экстракции, повышение эффективности использования.

Keywords: sunflower husks, plant waxes, extraction process, increase of the effectiveness using.

Увеличение объемов производства подсолнечника на Украине в качестве одной из главных масличных культур обусловливает проблемы рационального использования отходов переработки его семян. Одним из главных направлений решения проблемы можно определить комплексное экологически безопасное использование всех компонентов подсолнечника с целью перехода на малоотходную и безотходную технологию производства.

С целью расширения рынка сырья для отраслей промышленности и медицины, использующих воски, можно обозначить следующие задачи исследований: анализ рынка сырья восков разного происхождения с учетом спроса, превышающего 1 млн. т/год; интенсификация процессов утилизации отходов масложировой отрасли АПК; постоянный рост цен на аналогичное сырье импортного производства и т.д. Составляющие исследования производства подсолнечника связаны с разработкой научно-обоснованной технологии выделения воскоподобных компонентов из отходов, их использование в производстве продуктов пищевого и технического назначения, как перспективного варианта переработки крупнотоннажных отходов масложировой промышленности, а именно подсолнечной лузги.

Состав полученных из лузги подсолнечника воскоподобных веществ исследовали химическими методами анализа, определяя при этом такие наиболее важные показатели как кислотное число, число омыления, эфирное число [1-3]. Воскоподобные вещества, экстрагированные из подсолнечной лузги, по основным физико-химическим характеристикам подобны промышленным воскам. Химический состав семян подсолнечника, в основном зависит от сорта, климатических условий, почвы и культивации. В последнее время культивируется раннеспелые сортовые и гибридные семена подсолнечника с высокой масличностью, в среднем лузга семян составляет 23-26%. В новых сортах подсолнечника значительно изменился химический состав ядра, изменилось соотношение гидрофобной (жировой) и гидрофильной (не жировой) частей ядра.

Исследовали образец средней пробы подсолнечной лузги: в состав воскоподобных веществ, полученных из подсолнечной лузги, входит большое количество высокомолекулярных веществ – хроматограф (рис. 1) зарегистрировал соединения с количеством атомов углерода C_{44}-C_{58}.

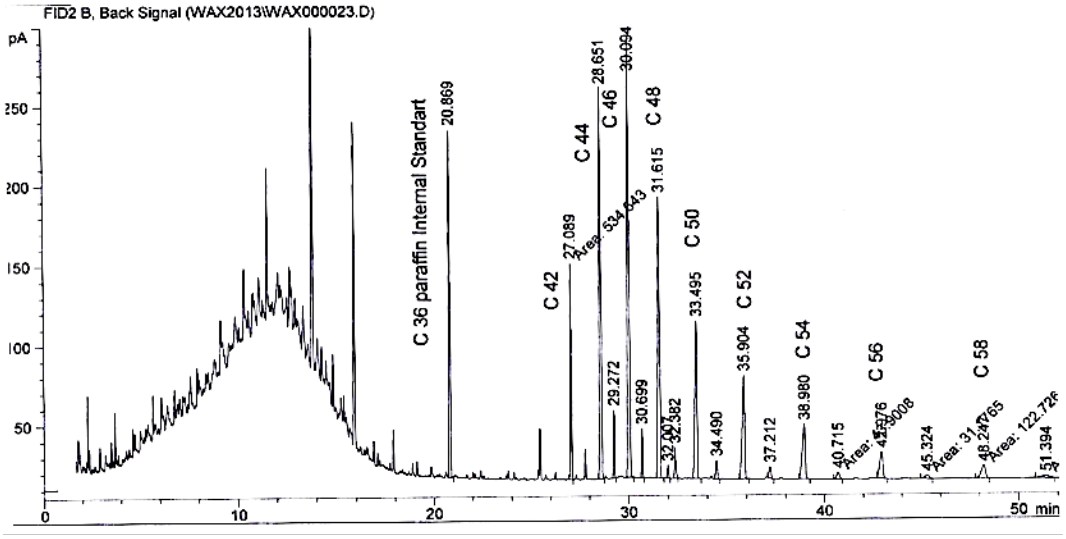


Рис. 1. Хроматограмма воскоподобных веществ.

Исследование кристаллической структуры воскоподобных веществ и их температуру плавления определяли с помощью метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Как при нагреве, так при охлаждении образца воскоподобных веществ, наблюдается четкое определение одного пика, что может свидетельствовать о однородность структуры данного образца, а именно, отсутствие примесей, отличающихся структурным состоянием. По данным ДСК анализа видно, что воскообразные вещества, полученные в результате предложенного метода (метода перколяции) из подсолнечной лузги, плавятся и кристаллизуются в узком диапазоне температур, а именно, температура плавления фиксируется при первом цикле нагрева в пределах 75 °С, при повторном цикле – 73 °С, температура кристаллизации – 76 °С и 74 °С соответственно к циклам охлаждения. ДСК анализ не выявил существенных различий между первым и повторным нагревом.

Исследования отечественной селекции подсолнечника, ориентированные на высокую масличность, показали рост доли липидов в лузге (плодовой оболочке) в 10–15 раз по сравнению с семенами старых сортов, изменились также и структурно-механические свойства оболочек подсолнечника, что вызывает определенные технологические осложнения при переработке подсолнечника и получения прозрачного подсолнечного масла в соответствии с требованиями стандарта. Липидные отходы в виде подсолнечной лузги в условиях химической лаборатории выделяли по разработанному методу перколяции на специальной установке (рис. 2).

Процесс экстракции из лузги подсолнечника – сложный процесс, который можно представить в виде ряда простых массообменных процессов: диффузия, диализ, растворение, десорбция, осмос и механическое вымывание [4-7]. Эти процессы протекают одновременно, взаимно влияя друг на друга, и являются составляющими процесса экстракции. Но основным процессом, который обеспечивает извлечения целевых веществ из сырья, можно назвать процесс диффузии, которая, как известно, основан на изменении концентрации целевых веществ в сырье и растворителе, а движущей силой является разность концентраций. Для проведения исследований по извлечению воскоподобных веществ из лузги подсолнечника использовали перколяционный метод, который основывается на свойствах воска растворятся в органических растворителях и образовывать кристаллы при низких плюсовых температурах.

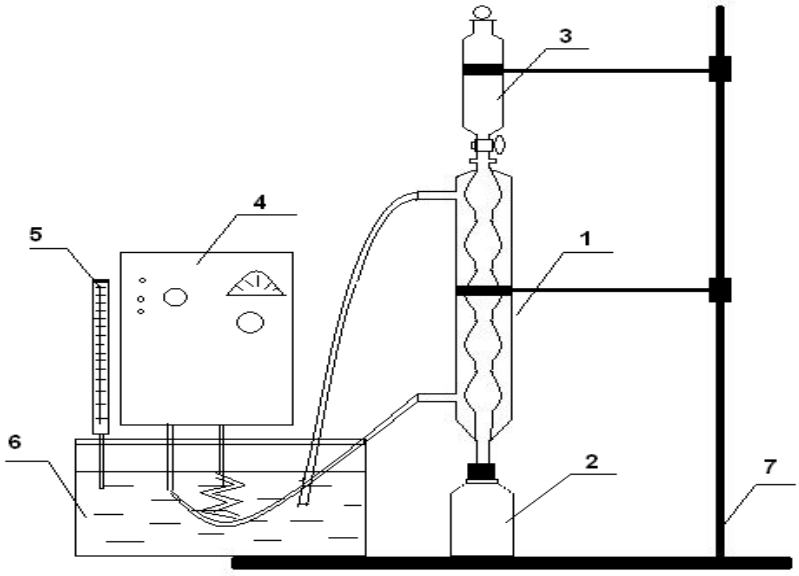


Рис. 2. Лабораторная установка выделения воскоподобных веществ перколяционным методом

1 – холодильник; 2 – емкость для сбора мицеллы;
3 – капельная воронка с растворителем; 4 – термостат; 5 – термометр;
6 – резервуар для циркуляции воды; 7 – штатив.

Состав полученных воскоподобных веществ анализировали химическими методами контроля, определяя при этом такие наиболее важные показатели как кислотное число, число омыления, эфирное число. Результаты химического анализа полученных воскоподобных веществ представлены в таблице 1, где они приведены в сравнении с показателями с промышленными восками и с литературными данными.

Общие стадии промышленного процесса экстракции подразделяют на: 1) подготовительные; 2) основные – приведение в контакт действующих фаз, организация относительного движения фаз в объеме аппарата; организация перемещения контактирующих фаз вдоль аппарата; выгрузка действующих фаз; первичная обработка экстракта; первичная обработка отработанного сырья; 3) заключительные.

Таблиця 1. Физико-химические характеристики разновидностей восков

Показатель	Карнаубский воск	Парафин	Пчелиный воск	Воскоподобные вещества из лузги подсолнечника	По литературным данным
Кислотное число, мг КОН/г	1-12	0,0	18-22	8,6	2-17
Йодное число, % I_2	5-14,5	0,0	7-11	112	110-124
Эфирное число, мг КОН	75-86	0,0	87-107	107	98-108
Температура плавления, °С	80-90	45-65	60-70	69,7	65-73
Температура кристаллизации, °С	86-90	50-56	60-70	73	70-74
Плотность, г/см^3	0,960-0,970	0,915	0,950-0,970	0,930	0,920-0,960
Преломление, n_D^{80}	1,4752	1,4420	1,4467	1,4415	1,4410-1,4500

Технологические стадии процесса экстракции имеют следующие составляющие: 1. Экстрагент проникает в измельченное сырье и по межклеточных каналах достигает поверхности клетки, а далее через простую клеточную оболочку поступает внутрь клетки. 2. Растворение экстрактивных веществ в экстрагенте внутри клетки после процесса десорбции. 3. За счет разницы концентраций начинается диализ – переход веществ из клетки через клеточную перегородку. 4. В результате диализа на поверхности растительного сырья образуется неподвижный диффузный слой, в котором имеет место молекулярная диффузия. Толщина слоя различна и зависит от скорости движения экстрагента относительно сырья, при этом диффузный слой сопротивляется процесса экстракции веществ вследствие замедления выхода веществ из сырья. 5. экстрактивные вещества, преодолев диффузный слой, распределяются по всему объему экстрагента по законам свободной конвективной диффузии.

Таким образом можно сделать следующие выводы: исследован общий технологический режим и возможности процесса экстракции воска из лузги подсолнечника; исследованы свойства и структура полученных целевых продуктов и показана возможность применения воскоподобных веществ из лузги подсолнечника взамен используемых в настоящее время в различных отраслях промышленности разновидностей восков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Товажнянский Л.Л., Бухкало С.И., Капустенко П.А. и др*. Основные технологии пищевых производств и энергосбережение (уч. пособие). – Х.: НТУ «ХПІ». 2005, 460 с.

2. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи). Підручник з грифом МОН / *Товажнянський Л.Л., Бухкало С.І., Ольховська О.І. та ін*. – К.: «Центр учбової літератури», 2016. – 468 с.

3. *Товажнянський Л.Л., Бухкало С.І., Ольховська О.І. та ін*. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах. – К.: «Центр учбової літератури», 2011. – 832 с.

4. *Руднева Л.Л., Бухкало С.И.* Расширение возможностей комплексной переработки растительного сырья. Оралдын гылым жаршысы. Уральск: «Фирма Сервер+», 2015. – № 5 (136). С. 33–39.

5. *Руднева Л.Л., Бухкало С.І.* Деякі можливості комплексної переробки рослинної сировини / Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – Вип. 16. – С. 105 – 112.

6. *Руднева Л.Л., Бухкало С.И.* Химико-технологические процессы утилизации растительных восков / Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности [Текст]: сб. н. трудов Межд. н-технической конф., посвящённой 105-летию со дня рождения А Н. Плановского (8-9 сентября 2016 г.). Т. 2. М.: ФГБОУ ВО МГУДТ, 2016. – с.185–188.

7. *Руднева Л.Л., Бухкало С.І., Лакіза О.В., Черваков О.В*. Рослинні воски як модифікатори властивостей полімерних композицій / Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – №. 1. – С. 37 – 44.

УДК 66.03

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРЕБРЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ТЕРМОСИФОНА
RESEARCH OF THE INFLUENCE OF FINNING ON THE EFFECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF THERMOSYPHON

Елена Сергеевна Бородина, Михаил Павлович Тюрин, Алёна Леонидовна Шутова
Mikhail P. Tyurin, Elena S. Borodina, Alena L. Shutova

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

Аннотация: В статье приводятся основные соотношения для расчета влияния оребрения на эффективность теплопередачи двухфазного закрытого термосифона и сравнительный анализ результатов общепринятого расчета с результатами численного решения.

Abstract: The article presents the main correlations for calculating the finning effect on the heat transfer efficiency of a two-phase closed thermosyphon and a comparative analysis of the results of a standard engineering calculation with the results of a numerical solution.

Ключевые слова: термосифон, оребрение, коэффициент теплопередачи, численное моделирование

Keywords: thermosyphon, finning, heat transfer coefficient, numerical simulation

Расчет влияния оребрения наружных стенок испарителя и конденсатора термосифона проводился двумя методами: по общепринятому соотношению с использованием коэффициента эффективности ребра и численным методом.

Ниже приводятся основные соотношения для инженерного метода расчета с учетом оребрения и сравнение результатов расчета по соотношениям для инженерного расчета с результатами компьютерного моделирования.

Согласно [1], количество теплоты, передаваемое через оребрённую поверхность плоской стенки:

$$Q_{\text{р}} = \frac{t_{\text{ж1}} - t_{\text{ж2}}}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{\delta}{\lambda F_1} + \frac{1}{\alpha_{\text{пр}} F_{\text{р.с}}}}, \quad (1)$$

где: α_1 – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности стенки; F_1 – площадь поверхности стенки; λ – коэффициент теплопроводности ребра; δ – толщина стенки; $F_{p.c.} = F_p + F_c$ – полная площадь оребренной поверхности, $F_p = 2 \cdot n_p \cdot h_p \cdot l_p$ – площадь рёбер; h_p – высота ребра; l_p – длина ребра; n_p – количество рёбер; F_c – площадь гладкой части оребрённой поверхности; $\alpha_{\text{пр}}$ – приведённый коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_{\text{р}} E \frac{F_{\text{р}}}{F_{\text{р.с.}}} + \alpha_c \frac{F_{\text{р}}}{F_{\text{р.с.}}}, \quad (2)$$

где: $\alpha_{\text{р}}$ – коэффициент теплоотдачи на поверхности рёбер; $\alpha_{\text{с}}$ – коэффициент теплоотдачи на гладкой части оребрённой поверхности; E – коэффициент эффективности ребра:

$$E = \frac{\text{th}\left(\frac{l}{\delta_{\text{р}}}\sqrt{2 \cdot Bi}\right)}{\frac{l}{\delta_{\text{р}}}\sqrt{2 \cdot Bi}}, \quad (3)$$

где $\delta_{\text{р}}$ – толщина ребра, $\text{th}\, x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$ – гиперболический тангенс; Bi – безразмерный комплекс, называемый числом Био:

$$Bi = \frac{\delta'/\lambda}{1/\alpha_{\text{р}}}. \quad (4)$$

Испаритель.

Для расчета теплового потока через оребрённую стенку трубы испарителя термосифона формула 4.37 примет вид:

$$Q_{\text{р}} = \frac{t_{\text{г}} - t_s}{\frac{1}{\alpha_4(t_s)\cdot 2\pi R_{\text{вн}} l_{\text{р}}} + \frac{\ln\frac{R_{\text{нар}}}{R_{\text{вн}}}}{\lambda_{\text{т}}\cdot 2\pi l_{\text{р}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{пр}} F_{\text{р.с}}}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{вн}}$ и $R_{\text{нар}}$ – внутренний и наружный радиусы трубы испарителя.

$$F_{\text{р.с.}} = F_{\text{р}} + F_c = 2l_{\text{р}}h_{\text{р}}n_{\text{р}} + \left(2\pi R_{\text{нар}} l_{\text{р}} - l_{\text{р}}\delta_{\text{ри}}n_{\text{р}}\right), \quad (6)$$

где l_p, h_p и n_p – длина, высота и количество рёбер испарителя, $\delta_{\text{ри}}$ - толщина ребра испарителя.

При расчете было принято допущение, что коэффициент теплоотдачи на поверхности рёбер совпадает с коэффициентом теплоотдачи на гладкой части оребрённой поверхности, т.е. $\alpha_p = \alpha_c = \alpha_3$. С учетом этого выражение 2 примет вид:

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_3 \cdot \left(\frac{E\cdot F_{\text{р}} + F_c}{F_{\text{р.с.}}}\right). \quad (7)$$

С целью уточнения результатов расчёта тепловых потоков через оребрённую поверхность испарителя было проведено сравнение результатов расчёта путем численного решения системы уравнений теплопереноса для указанной поверхности с результатами расчётов по общепринятой методике – уравнение 5.

На рисунке 1 представлено сравнение результатов, полученных при расчёте методом компьютерного моделирования и по формуле (5), в зависимости от высоты ребра при температуре насыщения внутри трубы 153 °С (температура газа 600 °С, количество ребер – 20, диаметр трубы 0,089 м, длина ребра 2,2 м, толщина ребра 5 мм)

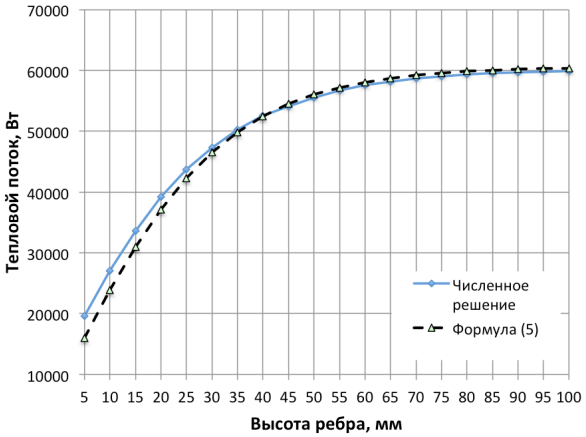


Рисунок 1. Сравнение результатов, полученных компьютерным моделированием и по формуле (5)

Сравнение результатов, полученных компьютерным моделированием и по формуле (5) показывает, что в области малых высот ребра расхождения могут достигать значительной величины, но по мере увеличения высоты ребер расхождения сглаживаются и при высоте ребер более 35 мм оба метода дают численно близкие результаты, расхождения не превышают долей процента. Принимая во внимание, что принятая высота ребер испарителя составляет 50 мм., расхождения в результатах расчета для данного случая можно не учитывать.

Конденсатор.

Для расчета теплового потока через оребрённую стенку трубы конденсатора термосифона формула 4.37 примет вид:

$$Q_{\text{р}} = \frac{t_s - t_{\text{ж}}}{\frac{1}{\alpha_2(t_{\text{с2}})\cdot 2\pi R_{\text{внк}} l_{\text{рк}}} + \frac{\ln\frac{R_{\text{нарк}}}{R_{\text{внк}}}}{\lambda_{\text{т}}\cdot 2\pi l_{\text{рк}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{прк}} F_{\text{р.с.к}}}}, \quad (8)$$

где $R_{внк}$ и $R_{нарк}$ – внутренний и наружный радиусы трубы конденсатора;

$$F_{\text{р.с.к}} = F_{\text{р.к}} + F_{c.\text{к}} = 2l_{\text{рк}}h_{\text{рк}}n_{\text{рк}} + \left(2\pi R_{\text{нарк}}l_{\text{рк}} - l_{\text{рк}}\delta_{\text{рк}}n_{\text{рк}}\right), \quad (9)$$

где $l_{рк}$, $h_{рк}$ и $n_{рк}$ – длина, высота и количество рёбер трубки конденсатора, $\delta_{\text{рк}}$ - толщина ребра трубки конденсатора.

Т.к. коэффициент теплоотдачи от стенки трубы конденсатора (и, соответственно, от ребра) к нагреваемому раствору зависит от температуры стенки трубы, а температура по высоте ребра непостоянна, то для подстановки в формулу (2) $\alpha_{\text{р}}$ рассчитывалось для температуры, средней между расчетной температурой наружной стенки гладкой трубы и средней температурой нагреваемого раствора, т.е.

$$\alpha_{\text{р}} = \alpha_1\left(\frac{t_{\text{с1}} + t_{\text{ж}}}{2}\right) \quad (10)$$

Тогда уравнение 4.38 принимает вид:

$$\alpha_{\text{прк}} = \alpha_1\left(\frac{t_{\text{с1}} + t_{\text{ж}}}{2}\right) \cdot E\,\frac{F_{\text{рк}}}{F_{\text{р.с.к}}} + \alpha_1(t_{c1}) \cdot \frac{F_{\text{р}}}{F_{\text{р.с.}}}, \quad (11)$$

На рисунке 2 приведено сравнение результатов, полученных при расчёте численным методом и по формуле (8), для одной трубки конденсатора, в зависимости от высоты ребра при температуре насыщения внутри трубы 153 °С (средняя температура нагреваемого раствора 75 °С, количество ребер – 14, диаметр трубки 0,056 м, длина ребра 0,8 м, толщина 4 мм).

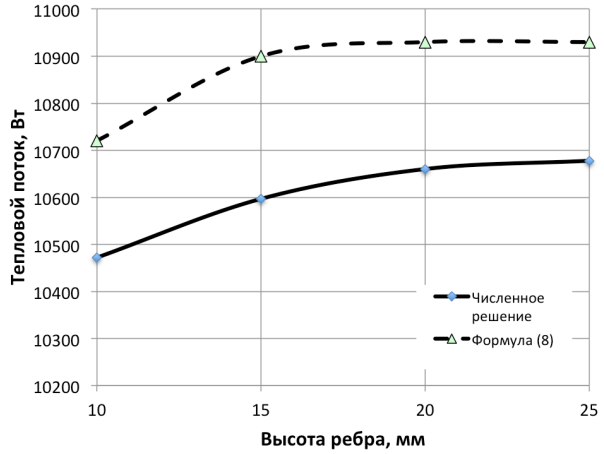


Рисунок 2. Сравнение результатов, полученных компьютерным моделированием и по формуле (8)

Сравнительный анализ показывает, что, для условий теплопереноса на наружной поверхности конденсатора в диапазоне высот ребра от 10 до 25 мм, расхождения в результатах расчета очень слабо зависят от высоты и находятся приблизительно в пределах 3-х процентов, причем результаты расчетов по общепринятому в литературе соотношению дают завышенные результаты. В этом случае целесообразно в этой области значений параметров результаты расчетов теплового потока по указанному соотношению уменьшать на соответствующую величину.

Таким образом можно сделать вывод, что при расчёте теплового потока через оребрённую поверхность по общепринятым уравнениям возникает ошибка, связанная со сложностью точного определения температуры в основании ребра и предположением о постоянстве температуры по сечению ребра.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Михеев М. А.* Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. - 344 с.

2. *Термосифонный теплообменный аппарат* / Е. С. Бородина, М. П. Тюрин, И. Ю. Розанов, Л. М. Кочетов, О. Г. Бельданова. Патент РФ №2532061 МПК F28D 7/00. Заявитель и патентообладатель Бородина Е. С. дата подачи заявки 20.11.13, опубликован 27.10.14. Бюл. №30. 7 с.: ил.

3. *Тюрин М. П., Бородина Е. С., Кочетов Л. М., Бельданова О. Г.* Теоретическое моделирование процессов тепломассопереноса в двухфазном закрытом термосифоне // Дизайн и технологии. 2014. № 41. С. 55-59.

4. *Александров А.А., Акатьев В.А., Тюрин М.П., Бородина Е.С.* Решение внешней и внутренней задач тепломассобмена для закрытого двухфазного термосифона // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. No 4. С. 109–121. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-4-109-121

УДК 542.61:66.086.2:661.12

ВОДНОЕ ЭКСТРАГИРОВАНИЕ СЫРЬЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ
AQUEOUS EXTRACTION OF RAW MATERIALS UNDER THE IMPACT OF HIGH INTENSITY PULSED ELECTRIC FIELD

Валерий Тимофеевич Казуб*, Станислав Павлович Рудобашта,**
Анна Геннадиевна Кошкарова*
Valeriy T. Kazub*, Staniclav P. Rudobashta,**
Anna G. Koshkarova*

**Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал ГБОУ ВПО ВолгГМУ, Россия, Пятигорск*
**Pyatigosrk Medical Pharmaceutical Institute – branch of VSMU, Russia, Pyatigosrk (e-mail: bukva46@mail.ru, vip.any@yandex.ru)*
***Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия, Москва*
***Russian State Agrarian University – RSAU - MAA named after Timiryazev, Russia, Moscow (e-mail: rudobashta@mail.ru)*

Аннотация: В исследовании показана целесообразность промышленного использования технологии экстрагирования целевых компонентов из растительного сырья с применением импульсного электрического поля, воздействие которого позволяет сократить длительность процесса, снизить энергозатраты, заменить этиловый спирт водой, а в сравнении с процессом электроразрядного экстрагирования получать более чистый экстракт.

Abstract: The intensification of extraction processes is aimed at accelerating the mass transfer in the system of solid-liquid. The search and development of new methods is carried out in the way, which is based on transmission of vibrations, pulsations, vibrations of different frequency and amplitude to solid-liquid system.

Ключевые слова: водное экстрагирование, импульсное электрическое поле, высокая напряженность, диэлектрическая проницаемость, измельчение, поверхностное натяжение.

Keywords: aqueous extraction, pulsed electric field, high intensity, dielectric constant, comminution, surface tension

Известные методы интенсификации процессов экстрагирования не всегда приемлемы из-за высокотемпературных режимов, приводящих к деструкции извлекаемых веществ [1]. Метод обработки растительного сырья, помещенного в жидкость, с помощью электрических разрядов [2-5] обладает ощутимыми преимуществами перед традиционными методами, однако, несмотря на высокую скорость и полноту извлечения при экстрагировании под воздействием электрических разрядов, происходит загрязнение экстракта продуктами эрозии металлических электродов, что требует принятия специальных мер по их удалению.

В работе исследуется технология, основанная на импульсном электрическом поле высокой напряженности [8,10], которая сводит к нулю вероятность появления металлических примесей в целевом продукте по сравнению с процессом электроразрядного экстрагирования.

Для изучения кинетики экстрагирования растительного сырья изготовлен экстракционный аппарат объемом 4 л. В экстракционном аппарате (рис. 1) существует граница раздела между жидкой смесью и изолятором корпуса (боковые стенки), которая, с точки зрения электрической прочности, является слабым звеном и обладает наименьшим пробивным напряжением. По этому пути ($L_{пр}$) возможен электрический пробой, при этом инициируемый гидроудар может привести к разрушению камеры. Вероятность такого явления возрастает из-за возможной адсорбции на поверхностях боковых стенок камеры пузырьков воздуха, облегчающих процесс формирования разряда по поверхности. Для удаления пузырьков со стенок камеры, после ее заполнения сырьем и водой, вращающийся высоковольтный электрод имеет щетки, изготовленные из фторопласта, закрепленные непосредственно на электроде у боковых стенок камеры. Одновременно с удалением пузырьков воздуха осуществляется перемешивание смеси при его замачивании.

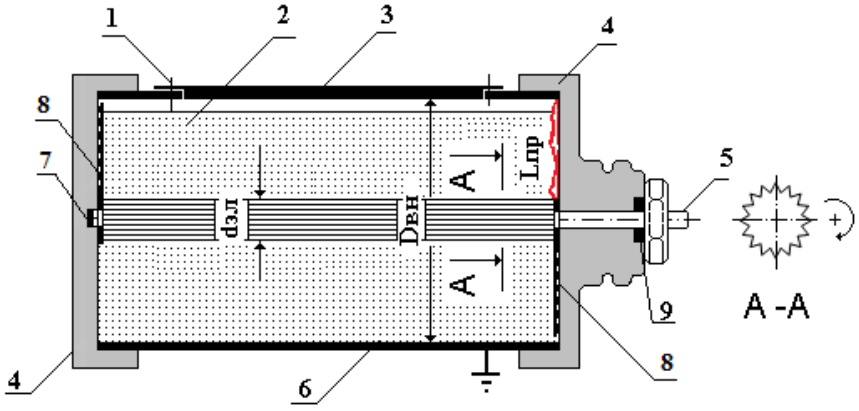


Рис. 1. Конструкция экстрактора.

1 – крепежные винты крышки; 2 – смесь сырья с водой; 3 – крышка; 4 – боковые изоляционные стенки; 5 - высоковольтный электрод; 6 - заземленный корпус; 7 – фторопластовая шайба; 8 – щетки; 9 - манжет.

В качестве сырья для исследований выбраны листья софоры японской, несмотря на то, что традиционно в фармации используют цветки и плоды этого растения, которые содержат в экстрактивных веществах рекордное количество флавоноидов. Использование листьев софоры японской перспективно с точки зрения дополнительного растительного сырья для фармацевтической промышленности, ранее не используемого в промышленных целях. Кроме того, имеются данные по водному экстрагированию листьев софоры с применением электрического разряда, которые в нашем случае могут использоваться для сравнения как контрольные.

Проведение водной экстракции методом мацерации позволяет извлекать из софоры японской только 19,3% флавоноидов от общего количества экстрактивных веществ, поэтому, традиционно экстрагирование осуществляют этиловым спиртом (этанолом) или его раствором. Это позволяет при использовании в качестве экстрагента 60%-го раствора этанола довести содержание флавоноидов в экстрактах до 28,6% [11].

Однако этиловый спирт относится к легко воспламеняющимся жидкостям, с высокой пожароопасностью этанола характеризующейся низкой температурой вспышки. Температура кипения этанола +78,3°С. Пары этилового спирта вредны для здоровья человека и этанол более дорог, чем вода. Предельно допустимая концентрация спирта в воздухе составляет 1 мг/дм^3.

С целью подтверждения возможности замены этанола, дорогого и токсичного экстрагента на воду, при экстрагировании под действием импульсного электрического поля высокой напряженности проведены исследования, позволяющие количественно оценить полноту извлечения биологически активных веществ этанолом различной концентрации и водой.

Для регистрации электрических параметров импульсных напряжений применен электронный осциллограф С8-13 с блоком памяти. Для подсчета числа импульсов, затраченных на обработку сырья, применялся частотомер ЧЗ-34.

Генератор позволял получать импульс напряжения колоколообразной формы амплитудой до 50кВ, длительностью $0{,}2\cdot10^{-6}$ с и фронтом импульса напряжения $10\cdot10^{-8}$с. Для выбора оптимальных параметров технологического процесса экстрагирования исследования проводились при варьировании соотношением фаз Т/Ж от 1/10 до 1/26, временем обработки, межэлектродным промежутком и напряженностью поля.

Предварительные исследования, проведенные при соотношении сырье-экстрагент Т/Ж = 1/13, в коаксиальной камере с межэлектродным промежутком R=36,5 мм, напряженностью поля у высоковольтного электрода приблизительно равной $7\cdot10^{6}$ В/м, временем обработки 200 с, показали, что при водном экстрагировании с использованием импульсного электрического поля из листьев софоры японской извлекается 24,7% флавоноидов, что примерно на 3,9% меньше, чем позволяет 60%-ый этанол. Однако при этом процесс сокращается примерно на 165 часов.

Таким образом, замена этилового спирта водой позволит исключить из технологического процесса экстрагирования более дорогой и токсичный экстрагент, сократить продолжительность процесса почти на 7 суток, что сделает способ извлечения экологически чистым, менее трудоемким и экономически целесообразным.

Анализ распределения электрического поля показывает, что внутри диэлектрической среды при приложении импульсного электрического поля в областях расположения неоднородностей имеют место зоны повышенных напряженностей. При экстрагировании под воздействием электрического поля пористые частицы сырья, расположенные в воде, приобретают электрический заряд. Каждая частица растительного сырья, поры которой заполнены водой, представляет собой многослойный конденсатор, напряженность электрического поля в такой системе распределяется обратно пропорционально диэлектрическим проницаемостям слоев. Значение напряженности электрического поля в структуре растительного материала, имеющего диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_1\approx7$ на порядок выше, чем на участках, заполненных водой с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 = 81$.

Под действием поля с напряженностью порядка $5\cdot10^{6}$ В/м, реализуемого в наших условиях, на границе раздела сред возникает пондеромоторная сила, которая по литературным данным оценивается величиной $5\cdot10^{10}$ Н/м^2 [4]. Эта сила, направленная в сторону убывания диэлектрической проницаемости, действует на растяжение и разрыв пористой частицы ($\varepsilon_2 > \varepsilon_1$) и тем самым способствует проникновению экстрагирующей жидкости внутрь структуры сырья.

Анализ гранулометрического состава исходного сырья и сырья, подвергнутого обработке импульсным электрическим полем при описанных выше параметрах технологического режима, показал, что под воздействием импульсного электрического поля происходит измельчение частиц. Количество частиц диаметром 5 мм уменьшилось на 4,5%, частиц диаметром 4 мм – на 3,9%; частиц 3 мм больше – на 2,6%, частиц 2 мм – на 5,3%, частиц 1 мм – на 0,5%.

Измельчение частичек сырья можно объяснить действием сил, возникающих на границе раздела сред с разными диэлектрическими проницаемостями [6].

Для сопоставления полноты извлечения целевого компонента в процессе экстрагирования с наложением импульсного электрического поля и процесса экстрагирования без электроимпульсного воздействия были проведены сопоставительные эксперименты. Растительное сырье подвергалось экстрагированию водой при температурах в разных опытах от 30^0С до 60^0С с шагом 10^0С (увеличение температуры выше 60^0С нецелесообразно, так как возможна деструкция извлекаемых биологически активных компонентов). Увеличение температуры системы приводит к ожидаемому росту выхода

целевого компонента и к увеличению скорости массообмена по сравнению с результатами, полученными при 18^0С.

Этот же вид сырья из одной партии экстрагировали водой с наложением на систему импульсного электрического поля при температуре смеси 18^0С. Эксперименты показали, что воздействие импульсного поля в процессе экстрагирования в течение 200с приводит к увеличению температуры смеси с 18^0С до 21^0С, при этом количество экстрактивных веществ, перешедших в раствор, примерно соответствует количеству извлечений при экстрагировании без воздействия поля, но при температуре смеси 60^0С. Таким образом, экстрагирование под действием импульсного электрического поля и экстрагирование при температуре 60^0С без воздействия поля дает близкие результаты по количеству извлеченных веществ, что подтверждается результатами измерения оптической плотности растворов фотоколориметром.

В процессе экстрагирования сырья под воздействием импульсного электрического поля, инициирующим фактором является не только увеличение температуры, в результате чего возрастает скорость диффузии, но и измельчение частиц сырья, приводящее к увеличению поверхности массообмена.

В процессе исследований выявлено, что обработка воды импульсами напряжения амплитудой 20 кВ в течение 200 секунд приводит к снижению сил поверхностного натяжения, о чем свидетельствует изменение коэффициента поверхностного натяжения от $72{,}956 \cdot 10^{-3}$ Н/м до $65{,}04 \cdot 10^{-3}$ Н/м, измеренного сталагмометром. Такая величина коэффициента поверхностного натяжения (65,043 Н/м) соответствует воде с температурой $66{,}4^0$С. Но в процессе обработки температура повысилась всего с 18^0С до 21^0С, при этой температуре коэффициент поверхностного натяжения воды равен $72{,}37 \cdot 10^{-3}$ Н/м. Это позволяет сделать вывод, что воздействие импульсного электрического поля изменяет поверхностное натяжение воды и, очевидно, что причиной этому является разрыв водородных связей. Снижение поверхностного натяжения воды улучшает смачиваемость, растворимость содержимого клетки и облегчает диффузию извлекаемых веществ из сырья в экстрагент [7,9]. С этой точки зрения мы не видим ограничений по использованию других видов пористого растительного сырья для экстрагирования с применением импульсного электрического поля.

При обработке импульсным электрическим полем сырья, пропитанного водой, на полярные молекулы воды воздействуют силы, стремящиеся повернуть молекулы. В результате трения молекул при их перемещении выделяется теплота. Поэтому наличие в порах сырья воды является определяющим фактором повышения температуры смеси при воздействии внешнего электрического поля.

Для оценки степени нагрева смеси проведено моделирование распределения теплового поля методом конечных элементов в камере, заполненной частицами сырья и водой. Результаты позволяют количественно оценить разницу в тепловыделении в ткани растительного сырья и в каналах, содержащих воду.

Величина мощности, выделяющейся в ткани растительного сырья, колеблется в диапазоне $(1{,}1\text{-}7{,}2) \cdot 10^3$ Вт/м^3, а в порах, содержащих воду $(1{,}3\text{-}7{,}5) \cdot 10^9$ Вт/м^3. Эти данные согласуются с расчетами по известному уравнению, позволяющему рассчитать тепловую мощность, выделяющуюся в диэлектрике:

$$\mathbf{P = 5,55\varepsilon \cdot tg\delta \cdot f \cdot E^2 \cdot 10^{-11}}\ \text{Вт/м}^3,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; f – частота поля; E – напряженность поля.

Наибольшее влияние на количество выделенной теплоты оказывает величина диэлектрической проницаемости вещества, напряженность электрического поля и его частотная характеристика.

В заключение статьи следует отметить, что применение импульсного электрического поля для водного извлечения флавоноидов из листьев софоры японской позволяет сократить длительность процесса по сравнению с процессом их экстрагирования этиловым спиртом примерно на 7 суток, при этом степень их извлечения уменьшается незначительно (примерно на 3,9% меньше, чем позволяет 60%-ый этанол).

Сокращение длительности процесса происходит в результате действия таких факторов как измельчение сырья, нарушение структуры растительных клеток, некоторого повышения температуры системы и снижения поверхностного натяжения воды.

Проведенные эксперименты показали целесообразность промышленного использования технологии импульсного электрического экстрагирования целевых компонентов из растительного сырья, поскольку она позволяет существенно сократить длительность процесса, заменить этиловый спирт водой, а в сравнении с процессом электроразрядного экстрагирования получать более чистый экстракт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломачинский В. А. Научное обоснование эффективных экстракционных технологий переработки растительного сырья. Автореф… дисс. д-ра техн. наук. М., МГТА, 2002. – 61 с.

2. Рудобашта С.П., Казуб В.Т., Борисов А.Г. Влияние режимных параметров процесса на кинетику электроразрядного экстрагирования целевого компонента из растительного сырья // Хранение и переработка сельхоз сырья. 2005. № 12.

3. Казуб В.Т., Кошкарова А.Г. Использование электроразрядной технологии для извлечения биологически активных компонентов. Пути развития науки и образования в современных условиях: материалы международного симпозиума. - Сочи, 2013. - С.202-206.

4. Казуб В.Т., Соловьева Е.В. Кинетика процессов экстрагирования полисахаридов под воздействием электрических разрядов. Материалы XV международной научн.- практ. конф. «Социально-экономическое развитие российских регионов в условиях модернизации», 24-26 сентября 2011. Белек (Турция). Пятигорск, 2011. – С. 213-220.

5. Казуб В.Т. Кинетика и основы аппаратурного оформления процессов электроразрядного экстрагирования биологически активных соединений. Автореф… дисс. д-ра техн. наук. Тамбов, ТГТУ, 2002. – 32 с.

6. Губкин А.Н. Физика диэлектриков. М. «Высшая школа»,1971. – 272с.

7. Казуб, В.Т., Кошкарова А.Г. Моделирование гидродинамических потоков методом электрогидродинамической аналогии. Математическая физика и ее приложения: материалы междунар. молодежной научн. конф. 28-30 июня 2012г. - Пятигорск, 2012. – Т.3. - С. 152-155.

8. Казуб, В.Т. Интенсификация процессов экстрагирования импульсным электрическим полем высокой напряженности. Казуб В.Т., Кошкарова А.Г. // Вестник ТГТУ. – 2014. - Т. 20, - № 3. – С. 496-501.

9. Казуб, В.Т. Определение скорости продвижения экстрагента в растительный материал при его набухании. Казуб, В.Т., Кошкарова А.Г.// Вестник ТГТУ. 2014. Том 20. № 4. – С. 773-779.

10. Казуб В.Т. Пат. № 2200022 РФ. МКИ А61К35/78. Способ экстрагирования биологически активных соединений из растительного сырья. //Казуб В.Т., Криворотов Н.В., Кудимов Ю.Н. , Голов Е.В. Заявлено 19.07.99. Опубл. в БИ № 7, 2003.

11. Рудобашта С.П., Казуб В.Т., Кошкарова А.Г. Исследование кинетики экстрагирования под воздействием импульсного электрического поля//Вестник ФГБОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2016. № 5 (75). С.49-55.

УДК 66.083

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ЗЕРНОВОГО МАСЛИЧНОГО СЫРЬЯ
MODELLING OF PROCESS OF EXTRUSION OF GRAIN OLIVE RAW MATERIALS

Виталий Николаевич Василенко, Лариса Николаевна Фролова,
Иван Вадимович Драган, Надежда Александровна Михайлова,
Дарья Александровна Таркаева
Vitaly N. Vasilenko , Larisa N. Frolova , Ivan V. Dragan,
Nadezhda A. Mikhailova, Duriya A. Tarkaeva

Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, Воронеж
Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh
(e-mail: vvn_1977@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрена математическая модель описывающая движение расплава экструдата в формующем канале матрицы при малых скоростях и числах Рейнольдса, в процессе экструзии зернового масличного сырья.

Abstract: The mathematical model describing the movement of fusion of an ekstrudat in the forming channel of a matrix at small rates and Reynolds's numbers in the course of extrusion of grain olive raw materials is considered.

Ключевые слова: экструзия, масличное сырье, кинетика процесса.

Keywords: extrusion, olive raw materials, process kinetics.

Многостадийность современных технологических процессов накладывает строгие требования, предъявляемые к качеству получаемого продукта, четкому согласованию производительности различного оборудования технологического потока при комплексной переработке семян масличных культур. В настоящее время специалистами отрасли предпринимаются попытки экструзионной обработки масличных культур, которые требуют своего научного обоснования.

В качестве математической модели, описывающей движение расплава экструдата в формующем канале матрицы при малых скоростях и числах Рейнольдса (Re < 2300), была выбрана «ламинарная жидкость». В качестве опорных величин были приняты: температура T = 273 К, давление P = 101 кПа, начальная скорость движения расплава экструдата на входе в формующий канал матрицы v = 0,22 м/с. Уравнения Навье-Стокса были дополнены необходимыми граничными условиями (рис. 1).

Параметры для расчета в программе Flow Vision задавались изменяемой объемной сеткой, состоящей из набора ячеек заданного размера. В Flow Vision численное интегрирование уравнений по пространственным координатам проводилось с использованием прямоугольной адаптивной локально измельченной сетки.

Для отражения получаемой информации использовали ряд плоскостей, на которые проецировались изменения исследуемой величины. После обработки результатов строились графики изменения скорости и давления экструдата по длине канала (рис. 2).

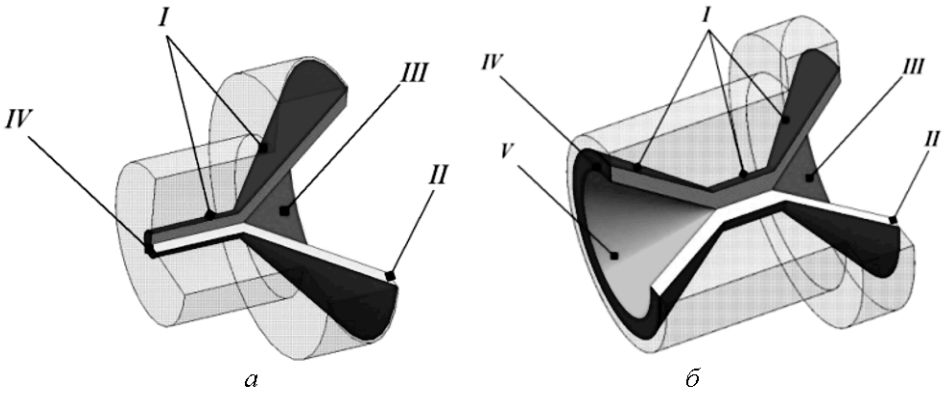


Рис. 1. Граничные условия формующего узла экструдера цилиндрической (*а*) и кольцевой формы (*б*)

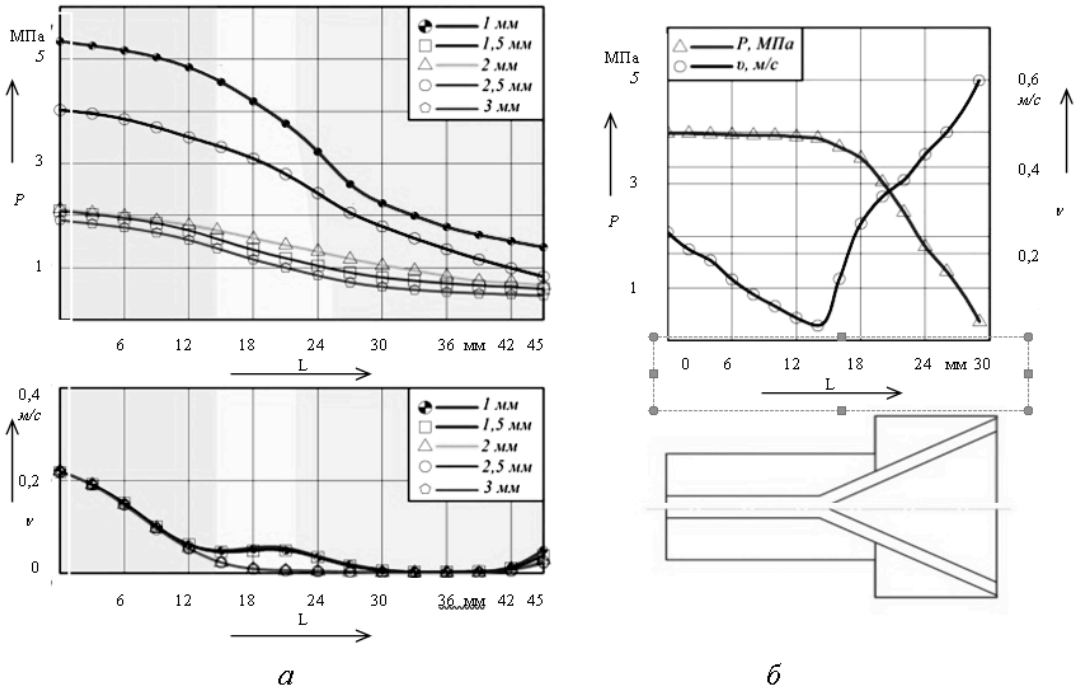


Рис. 2. Изменения скорости *v* и давления *P* по длине канала матрицы экструдера: цилиндрической (*а*) и кольцевой формы (*б*)

В результате были определены рациональные режимы процесса экструдирования масличного сырья: начальная влажность сырья – 12…14 %, температура продукта в предматричной зоне – 383…393 К, угловая скорость вращения шнека – 5,12…8,50 $с^{-1}$; давление продукта в предматричной зоне экструдера до 4 МПа.

Для точного выбора математической модели были изготовлены конструкции формующих узлов и проведена серия экспериментов, позволяющая определить отклонения, которые изменялись в интервале 14,85…20,39 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Михайлова Н.А., Русина К.Ю., Таркаева Д.А. Создание энергоэффективного оборудования для переработки масличного сырья // Вестник машиностроения. 2017. № 01. С. 87-88.

2. Остриков А.Н., Павлов И.О., Ненахов Р.В., Василенко В.Н. Математическая модель неизотермического течения жидкости в предматричной зоне экструдера // Хранение и переработка сельхозсырья. 2001. № 12. С. 7-9.

3. Остриков А.Н., Ненахов Р.В., Василенко В.Н. Многофакторный статический анализ процесса экструзии комбинированных картофелепродуктов, обогащённых белковыми добавками // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2001. № 4. С. 13-15.

4. Василенко В.Н., Копылов М.В., Фролова Л.Н., Драган И.В. Математическая модель движения сырья в шнековом канале маслопресса // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 3 (57). С. 18-22.

5. Афанасьев В.А., Остриков А.Н., Василенко В.Н., Фролова Л.Н. Мобильные комбикормовые заводы для развития малых и средних фермерских хозяйств // Кормопроизводство. 2014. № 6. С. 39-42.

6. Остриков А.Н., Василенко В.Н. Экструдирование комбикормов: новые подходы и перспективы // Комбикорма. 2011. № 8. С. 39-42.

7. Фролова Л.Н., Василенко В.Н., Михайлова Н.А. Ресурсосберегающее оборудование для влаготепловой подготовки масличного сырья к прессованию // Вестник машиностроения – 2016. № 01. С. 86-88/

8. Василенко В.Н., Копылов М.В., Фролова Л.Н., Драган И.В. Математическая модель движения сырья в шнековом канале маслопресса / Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 3 (57). С. 18-22.

9. Остриков А.Н., Василенко В.Н., Татаренков Е.А., Копылов М.В. Экструдированные белковые текстураты из зернобобовых культур / Мясная индустрия. 2009. № 10. С. 31-33.

УДК 621.372.8:66.084.8

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ»
ULTRASONIC INTENSIFICATION OF PROCESSES IN SYSTEMS "GAS-LIQUID"

Владимир Николаевич Хмелёв, Галина Алексеевна Боброва, Роман Николаевич Голых, Виктор Александрович Нестеров, Сергей Николаевич Цыганок, Андрей Викторович Шалунов
Vladimir N. Khmelev, Galina A. Bobrova, Roman N. Golykh, Victor A. Nesterov, Sergey N. Tsyganok, Andrey V. Shalunov

Бийский технологический институт, г. Бийск
Biysk Technological Institute (branch) of Altay State Technical University named after I. I. Polzunov, Biysk
(e-mail: vnh@bti.secna.ru, bobrova.ga@bti.secna.ru, grn@bti.secna.ru, nva@bti.secna.ru, grey@bti.secna.ru, shalunov@bti.secna.ru)

Аннотация: В статье проанализированы существующие подходы к ультразвуковой интенсификации процессов, протекающих на межфазных границах «газ – жидкость» при реализации их в промышленных масштабах. Для повышения эффективности процессов предложены конструкции плоских волноводов и созданы специализированные технологические аппараты, которые обеспечат увеличенную площадь излучения, равномерность воздействия и отсутствие взаимной компенсации колебаний разных участков поверхности излучателя.

Abstract: The article presents approaches to the ultrasonic intensification of the processes taking place on the interface boundaries «gas-liquid» when they are realized on an industrial scale. Their advantages and disadvantages are revealed. And also a type of flat waveguides is proposed, which will allow insuring the necessary flow of processes under the influence of ultrasound of high intensity.

Ключевые слова: ультразвук, волновод, колебания, фокусировка, суперпозиция волн, стоячая волна

Keywords: ultrasound, waveguide, fluctuations, focus, superposition of waves, standing wave

Современные химические технологии основываются на реализации процессов, которые протекают в гетерогенных системах на границе раздела двух и более разнородных фаз. Значительное число процессов реализуется в двухфазных системах «газ-жидкость» (мокрая очистка газов; дегазация жидкости; сушка материалов, состоящая в выделении влаги и её последующем испарении в газовую фазу; перегонка; абсорбция; разрушение пены; поверхностные химические реакции и др.).

Рост потребностей производств и потребителей обуславливает необходимость многократного повышения эффективности данных процессов.

Одним из перспективных подходов к повышению эффективности химико-технологических процессов на границах «газ-жидкость» является ультразвуковое (УЗ) воздействие. Воздействие УЗ колебаниями высокой интенсивности обеспечивает многократное ускорение различных процессов за счёт изменения межфазной поверхности и интенсификации массопереноса. Кроме того, УЗ воздействие позволяет осуществлять реакции, которые невозможно реализовать в обычных условиях.

При воздействии ультразвука на обрабатываемую среду возникает ряд эффектов, позволяющих ускорить как процессы массопереноса, так и протекающие химические реакции.

Применение ультразвука приводит к образованию волнообразных возмущений на границе раздела фаз в системе «газ–жидкость», что увеличивает площадь межфазной поверхности, с которой пропорционально связана скорость массопереноса. Возникновение «звукового ветра», создаёт дополнительные движущие силы, ускоряющие массоперенос целевого компонента сквозь межфазную границу.

Таким образом, УЗ воздействие ускоряет, в частности, абсорбционное разделение газовых смесей (поглощение целевого газового компонента специальной жидкостью-абсорбентом).

Кроме того, под действием ультразвука, благодаря волнообразным возмущениям границы «жидкость-газ», происходит разрушение поверхностных пленок. Механизм разрушения пленок заключается в следующем: газовые пузырьки, находящиеся в толще пленки, перемещаясь под действием акустических течений, увлекают за собой часть вещества. В результате происходит перемещение массы пленки, что приводит к её разрыву. Это способствует разделению неоднородных систем «газ-жидкость», содержащих газовую фазу в дисперсном состоянии, когда толщина стенок жидкости очень мала (процесс пеногашения).

Когда жидкая фаза неразрывно связана с твёрдым веществом, представляющим собой, как правило, капиллярно-пористое тело, УЗ колебания способствуют разрыву этих связей и переносу влаги в газовую фазу. Тем самым ускоряется процесс сушки материала [1].

На сегодняшний день положительные эффекты от применения ультразвукового воздействия получены лишь в лабораторных и полупромышленных условиях, однако использование такого воздействия в промышленных масштабах до сих пор не достигнуто.

Это связано с тем, что существующие ультразвуковые аппараты не позволяют озвучивать объём промежуточного слоя между жидкой и газовой фазой более 0,1 $м^3$ и площадь поверхности раздела «газ-жидкость» более 0,5 $м^2$ без создания специальных условий распространения, отражения и усиления колебаний.

В то время для ультразвуковой интенсификации процессов на границе «газ-жидкость» в промышленных установках площадь зоны озвучивания должна составлять более 3 $м^2$, а объём зоны озвучивания – более 1 $м^3$ [2].

Различными исследователями [3-6] до сегодняшнего дня предлагалось несколько подходов для промышленного масштабирования ультразвуковой интенсификации процессов на границе «газ-жидкость». Все они основывались на интерференции акустических пучков, испускаемых с разных участков излучателя и проходящих различные пути переотражения.

Наибольшее распространение получили подходы, основанные на фокусировке ультразвуковых колебаний, суперпозиции плоских волн и создании стоячих волн.

Фокусировка колебаний обеспечивает усиление интенсивности колебаний более чем в 10 раз, позволяя достичь интенсивностей воздействия более 155 дБ в *газовой фазе* или более 20 Вт/см^2 в *жидкой фазе*. Однако объём, в котором достигаются столь высокие интенсивности, не превышает 1 см^3. В работе [3] предложено частичное решение данной проблемы путем механического перемещения или вращения излучателя. Перемещение или вращение излучателя позволяет увеличить объём среды, подвергаемый воздействию высоких высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний, до 10 раз. Однако ввиду ограниченного времени воздействия на каждый элемент объёма среды или участок поверхности раздела «газ-жидкость», данный подход всё равно не обеспечивает многократного увеличения производительности процессов.

Кроме того, реализация механического перемещения излучателя в жидкой фазе изменит условия течения жидкости и, следовательно, снизит эффективность процессов.

Принцип суперпозиции волн заключается в том, что при распространении в среде нескольких волн каждая из них распространяется так, как, будто другие волны отсутствуют, а результирующее смещение частиц среды в любой момент времени равно геометрической сумме смещений, которые получают частицы, участвуя в каждом из слагающих волновых процессов Использование суперпозиции волн позволяет усиливать ультразвуковые колебания до 4-х раз. Однако существенный недостаток данного метода заключается в том, что интерферирующие волны должны иметь строго одинаковую частоту и заранее определённую разность фаз, иначе происходит взаимная компенсация колебаний. В некоторых случаях, чтобы избежать данной ситуации используют сложение волн различных частот, кратных друг другу. При сложении волн, имеющих кратные частоты, исключается зависимость суммарной интенсивности колебаний от фазового сдвига. Однако использование разночастотных излучателей не обеспечивает устойчивость протекания процессов по причине зависимости эффективности большинства процессов от частоты, что требует значительных издержек на производство [4-5].

Поэтому возникает необходимость создания стоячей волны и условий для возникновения резонансных явлений в ней с целью усиления моночастотных колебаний.

Сущность процесса создания стоячей волны заключается в том, что имеется некая отражающая поверхность, и падающая на неё волна (первичная волна, излучаемая источником УЗ колебаний) накладывается на отражённую волну. В результате происходит усиление колебаний за счёт сложения волн. Это позволяет, как увеличить интенсивность воздействия, так и объём зоны, в которой интенсивность воздействие превышает пороговое значение, необходимое для интенсификации процессов в системах «газ-жидкость» (например, пороговую интенсивность, необходимую для возникновения кавитации в жидкой фазе) [6]. Однако из-за поглощения и дифрракционного расхождения колебаний в среде, интенсивность отражённой волны оказывается более чем в 2 раза меньше интенсивности первичной. Это не позволяет путём создания стоячей волны усилить колебания и увеличить объём озвучиваемой зоны более чем на 50 %.

Таким образом, существующее УЗ оборудование, даже при создании специальных условий распространения, отражения и усиления колебаний неспособно обеспечить промышленную интенсификацию химико-технологических процессов в системах «газ-жидкость» из-за достигаемых объёмов и зон озвучивания в 6-10 раз меньших по сравнению с требуемыми.

Это связано главным образом с недостатками существующих конструкций ультразвуковых излучателей, такими как:

– наличие участков поверхности излучателя, колеблющихся в противоположной фазе;

– недостаточные линейные размеры излучателя, приводящие к дифракционному расхождению колебаний;

– неравномерность распределения амплитуды колебаний излучателя;

– недостаточность вводимой УЗ энергии из-за большой разницы волновых сопротивлений газовой и жидкой фазы.

Для устранения указанных недостатков и обеспечения промышленной интенсификации процессов на границе «газ-жидкость» предложены конструкции излучателей (рисунок 1) в виде составных плоских волноводов, обладающих рядом преимуществ:

1) равномерное распределение интенсивности ультразвукового воздействия по всей ширине излучающей поверхности, так как отсутствуют участки, колеблющиеся в противофазе, согласно рисунку 1а;

2) снижение дифракционного расхождения за счет увеличенной ширины излучающей поверхности, в 3 раза превышающей диаметр, например, дискового излучателя;

3) увеличение энергии акустических колебаний за счет использования нескольких ультразвуковых колебательных систем (УЗКС).

Распределение колебаний плоского волновода, полученное путем конечно-элементного моделирования, представлено на рисунке 1а. Далее на рисунке 1б и 1в представлены аппараты с излучателями, которые предназначены для реализации таких процессов как сушка листовых материалов, поглощение газовой фазы жидкостью, пропитка [7].



а б в

Рисунок 1 – Ультразвуковые аппараты для интенсификации процессов в системах «газ-жидкость» с излучателями в виде плоских волноводов: а) распределение колебаний плоского волновода; б) ультразвуковой аппарат с плоским волноводом и одной УЗКС; б) ультразвуковой аппарат с плоским волноводом и двумя УЗКС;

Аппараты с плоским волноводом и одной УЗКС (рисунок 1б) позволяют озвучивать поверхность шириной до 0,15 м. Возбуждение колебаний в волноводе с помощью двух УЗКС позволяет увеличить ширину озвучиваемой поверхности до 0,36 м (рисунок 1в).

Данные аппараты создают ультразвуковые колебания на частоте 22 кГц при амплитуде не менее 30 мкм. Производительность процессов в системах «газ-жидкость» достигает 1 $м^2$ слоя жидкости, находящейся в капиллярах листового материала или стекающей в виде плёнки, в час.

Создание и использование составных волноводов позволяет увеличить ширину излучающей поверхности с обеспечением равномерного излучения. За счет этого обеспечивается более качественное протекание процесса, так как все участки поверхности излучателя колеблются с одинаковой фазой в отличие от, например, многозонных или дисковых излучателей.

Таким образом, предложенные конструкции плоских волноводов обеспечат промышленную УЗ интенсификацию процессов в системах «газ-жидкость».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-00227 а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хмелев, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности // курс лекций. Барнаул: АлтГТУ, 2010. – 177 с.

2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии // 7-ое изд. - М.:Химиздат, 1961 - 830 с.

3. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Галахов А.Н., Ромашкин А.А. Разработка ультразвукового оборудования для разрушения пен и исследование его функциональных возможностей // Материалы конференции «Измерение, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» Бийск, 2011 – с.178-182

4. Ультразвуковой ингалятор [Текст]: пат. 2070062 Российская Федерация: МПК6 A61M15/02, A61M11/00 / Хмелев В.Н., Гавинский Ю.В., Котов Б.С.; заявитель и патентообладатель Котов Борис Степанович; Хмелев Владимир Николаевич; Гавинский Юрий Витальевич. – № 93021377/14; заявл. 20.04.93; опубл. 10.12.96, Бюл. № 15. – 4 с.: ил.]

5. Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Шакура В.А., Демьяненко М.В. Многочастотный ультразвуковой модуль экстракции // Ползуновский альманах – 2014. №1.– с.92-96.

6. Khmelev V.N., Golykh R.N., Shalunov A.V., Bazhin V.E., Nesterov V.A. Determination of Optimum Conditions of Ultrasonic Cavitation Treatment of High-viscous and Non-newtonian liquid media // 16th International Conference of Young Specialists on Micro|Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2015: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2015. – P. 208-212.

7. Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Цыганок С.Н., Титов Г.А. Ультразвуковая сушка березового шпона // Южно-Сибирский научный вестник – 2012. №1. – с. 188-192.

УДК 539.217.3

ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА
HYGROSCOPIC PROPERTIES OF SUNFLOWER SEEDS

Владислав Игоревич Кутейников, Станислав Павлович Рудобашта
Vladislav I. Kuteinikov, Stanislav P. Rudobashta

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, rk7p77@gmail.com)

Аннотация: Рассмотрены статические и динамические методы исследования гигроскопических свойств материалов, их преимущества и недостатки. Представлены опытные данные по гигроскопическим свойствам семян подсолнечника, их ядер и оболочек, полученные статическим методом.

Abstract: Considered static and dynamic methods of investigation of hygroscopic properties of materials, their advantages and disadvantages. We present experimental data on the desorption isotherm of sunflower seeds, its kernels and shells, obtained by the static method.

Ключевые слова: гигроскопичность, статический и динамический методы, изотерма десорбции, семена подсолнечника, ядро, оболочка.

Keywords: hygroscopicity, static and dynamic methods, the desorption isotherm, sunflower seeds, kernel, shell.

Знание гигроскопических свойств материала необходимо для определения направления протекания массообменного процесса (сушка или поглощение влаги из газовой среды), расчета кинетики процесса и выбора условий хранения высушенного материала [1-4]. При экспериментальном исследовании гигроскопических свойств материалов используются два метода: статический и динамический [4,5].

Статический метод заключается в том, что материал помещают в среду влажного воздуха и выдерживают в ней в течение времени, необходимого для установления равновесия [5]. Различают следующие разновидности статического метода: весовой, объемный и эксикаторный. В весовом методе измеряют количесво поглощенного материалом пара с помощью прецицизионных весов, подробно описанных в [6]. При весовом методе измерительную ячейку с помещенным в нее образцом материала сначала

вакуумируют, затем впускают в нее определенную порцию пара, ждут 1…2 часа установления равновесия и взвешивают образец без извлечения из ячейки. Затем опыт повторяют при другом давлении пара. Измеренному давлению пара p соответствует относительная влажность $\varphi = p/p_н$, где $p_н$ – давление насыщенного пара при температуре опыта.

В объемном методе измеряют объем пара, поглощенного навеской материала. Количество поглощенного пара опредляютпо по его равновесному давлению в системе. Недостатком метода является необходимость замера мертвого объема пара.

Наиболее простым статическим методом является эксикаторный, при котором опыт проводят с использованием эксикаторов, в которые помещают вещество, поддерживающее определённую относительную влажность воздуха в них. В качестве таких веществ используют либо насыщенные водные растворы определённых солей, либо растворы серной кислоты разной концентрации.

Динамические методы [5] заключаются в продувке слоя зернистого материала, для которого снимается изотерма сорбции или десорбции, потоком воздуха той или иной влажности. Измеряются концентрации пара в потоке воздуха на входе его в слой и выходе из слоя. После установления равновесия влажность воздуха на выходе из слоя становится равной его влажности на входе. Количество поглощенного пара находят из материального баланса измерительной ячейки. Разновидностью динамического метода является хроматографический метод, при котором с помощью детектора хроматографа регистрируют концентрацию пара на выходе из адсорбционной колонки.

Каждый из рассмотренных методов обладает своими достоинствами и недостатками. Эксикаторный метод аппаратурно прост, но длителен (гарантированное время установления равновесия составляет 3…4 недели), при длительном контакте пищевого материала с высоковлажной средой может происходить его порча. Статический весовой метод обеспечивает более быстрое установление концентрационного равновесия, изотерма сорбции (десорбции) может быто снята в течение одного дня. Однако, аппаратурно он сложнее, чем эксикаторный, так как при применении вакуумированной системы необходимо иметь герметичную аппаратуру, вакуумный насос, вакуумметр, ячейка должна быть термостатирована и в то же время давать возможность отслеживать изменение веса образца без извлечения его из среды водяного пара.

В данной работе был использован статический эксикаторный метод - для определения изотерм десорбции семян подсолнечника в целом, их ядер и оболочек - при температуре 24 ^oC. Раздельное определение равновесного влагосодержания для отдельных составных частей семени подсолнечника позволяет установить вклад каждой из них в общее равновесное влагосодержание и точнее описать кинетику его сушки – как двухслойного тела. Для создания в емкостях с помещенными в них образцами исследуемых семян, их ядер и оболочек использовали насыщенные растворы следующих солей: CH_3COOK, $MgCL_2$, $Mg(NO_3)_2$, $NaNO_2$, KJ, $NaNO_3$, KCL, K_2SO_4. Значения относительной влажности воздуха над насыщенными растворами этих солей, в среде которого находились семена при температуре опыта, брали по данным [7]. Опыты проводили с семенами подсолнечника сорта «МАС 95.ОЛ». Семена, а также их ядра и оболочки, помещали в бюксы, которые устанавливали в эксикаторы с насыщенными растворами указанных выше солей, и выдерживали в воздушном термостате при температуре 24^oC в течение 1 месяца, после чего эксикаторы с бюксами извлекали из термостата и определяли влагосодержание образцов весовым методом в соответствии с ГОСТ 10856-96 [8]. Результаты измерений приведены на рис. 1 в виде зависимостей $u_р = f(\varphi)$, где $u_р$ – равновесное влагосодержание материала, (кг влаги)/(кг сухого материала), φ – относительная влажность воздуха, %.

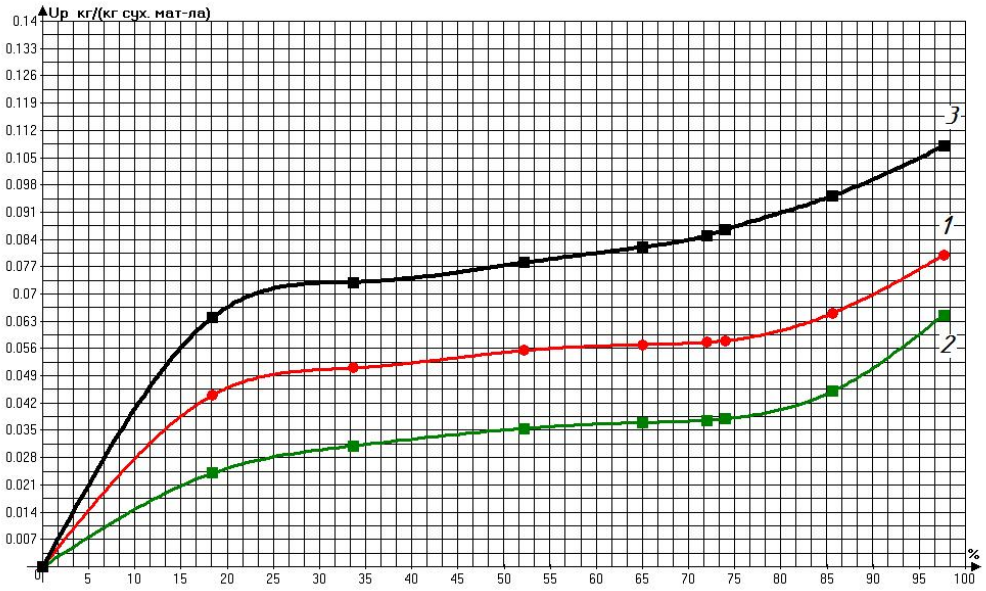


Рис.1. Изотермы десорбции $u_{\text{р}} = f(\varphi)_t$ при температуре t = 24°С для семян подсолнечника сорта «МАС 95.ОЛ»: 1 - семена в целом, 2 - ядра, 3 - оболочки семян.

Как видно из рисунка, изотермы имеют характерный для растительных коллоидных капиллярно-пористых материалов S-образный вид. В средней области графиков имеет место слабый угол подъема линии равновесного влагосодержания $u_{\text{р}} = f(\varphi)$. Оболочки семян обладают большей поглотительной способностью, чем ядра, что объясняется различиями в их составе и строении. Полученные данные могут быть использованы для анализа и расчета влагообмена семян подсолнечника с воздухом в процессах их сушки и хранения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лыков А. В.* Теория сушки. 2-е изд. М.: «Энергия». 1960. 465с.
2. *Рудобашта С.П.* Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.
3. *Рудобашта С. П.* Теплотехника. 2-е изд. Доп. М.: «Перо». 2015. 672 с.
4. *Гинзбург А.С., Савина И.М.* Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов. Справочник. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1982. 280 с.
5. *Кельцев Н.В.* Основы адсорбционной техники. М.: Химия. 1976. 512 с.
6. *Сахаров А.*И. Весы в физико-химических исследованиях. М.: Наука. 1968. 229 с.
7. *Schneider, A.* Neue Diagramme znr Bestimmung der relativen Luft - feuchtigkeit uber gesattigten, wassrigen Salzlosungen und wassrigen Schwefelsaure - losungen bei verschiedenen Temperaturen // Holz als Roh - und Werkstoff, 1960. Jahrg. 18. Heft 7. S. 269.
8. ГОСТ 10856-96. Семена масличные. Метод определения влажности. М.: Стандартинформ. 2010. 4 с.

УДК 631.33

АВТОРЕГУЛИРОВАНИЕ ПОДАЧИ СЕМЯН В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ ВЫСЕВАЮЩЕМ АППАРАТЕ
AUTOREGULATION OF FLOW IN A PNEUMATIC SEED METERING APPARATUS

Бадри Хутаевич Ахалая, Юрий Хасанович Шогенов
Badri H. Akhalaia, Yuri H. Shogenov

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ Москва
Российская академия наук (РАН), Россия, Москва
Federal agricultural research centre VIM Moscow
Russian Academy of Sciences (RAS), Russia Moscow
(e-mail:boris.novikov2012@yandex.ru; yh1961s@yandex.ru)

Аннотация: Предложен пневматический высевающий аппарат, который может быть использован в сеялках, преимущественно для совмещенного высева семян. Аппарат снабжен дистанционным управлением регулятора подачи и высева семян.

Abstract: Pneumatic sowing devices, which can be used in the drills, primarily for combined sowing of seed have been proposed. The machine is equipped with remote control of the regulator and seeding.

Ключевые слова: аппарат, семена, регулятор, диск.
Keywords: apparatus, seeds, controller, disk.

Возделывание высокопродуктивных кормовых культур является одним из главных факторов для укрепления кормовой базы животноводства. При этом совмещенные посевы нескольких культур на одной площади позволяют получить силос высокого качества [1-3].

Широко распространены и используются в сельскохозяйственном производстве пневматические высевающие аппараты, включающие бункер для семян, корпус с камерой разрежения и семенной камерой, сбрасыватель лишних семян и высевающий диск с присасывающими отверстиями, установленный между семенной камерой и камерой разрежения и ворошилку, а также устройство для высева семян состоящее из семенного бункера, вентилятора, воздуховода, камеры разрежения, на оси установленного высевающего диска с отверстиями, ворошилки, приводной звездочки, регулировочной заслонки, клапана опорожнения и разгрузочного окна. Известные устройства имеют ряд недостатков:

а) для перехода от одной культуры на другую приемный бункер необходимо перезагрузить семенами другой культурой, требующего дополнительного рабочего времени;

б) не предусмотрен сошник, позволяющий менять глубину заделки семян.

Целью работы является упрощение конструкции, делая его более универсальным, сокращение рабочего времени на переход высева семян от одной культуры на другую.

Цель достигается тем, что пневматический высевающий аппарат с регулятором подачи семян, состоящий из семенного бункера, вентилятора, воздуховода, приемной камеры, камеры разрежения, высевающего диска с отверстиями, ворошилки, приводной звездочки, регулировочной заслонки, клапана опорожнения и разгрузочного окна, снабжен полозовидным, двухуровневым сошником с заслонкой над ним, разделенный перегородкой бункер снабжен задвижкой размещенной под каждой его частью, при этом заслонки и задвижка выполнены с дистанционным приводом, а к нижней части высевающего диска подведен патрубок [4,5].

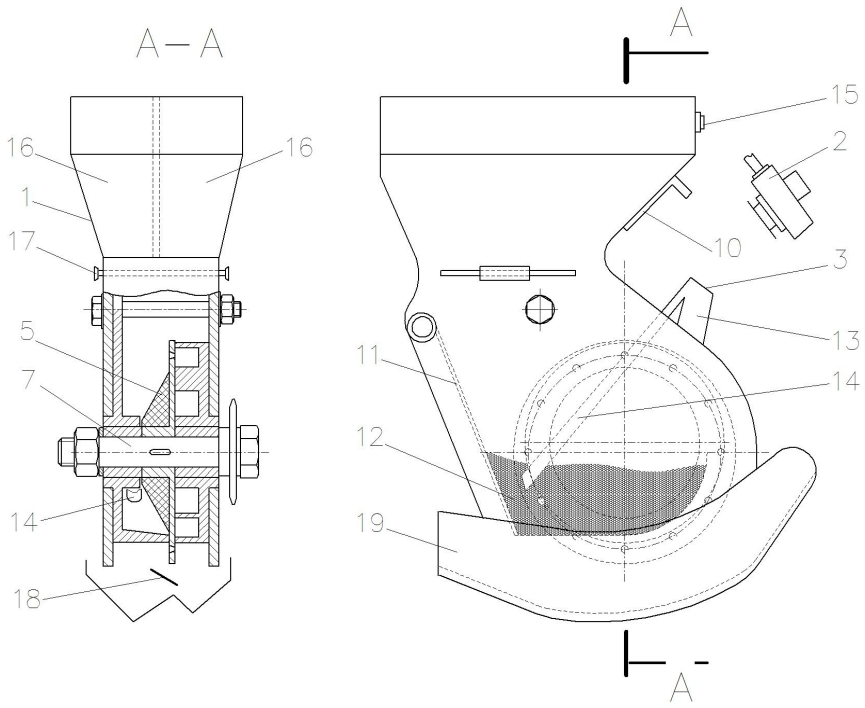


Рис.1 Пневматический высевающий аппарат с регулятором подачи семян

Пневматический высевающий аппарат (рис.1) с регулятором подачи семян содержит семенной бункер 1, вентилятор 2, воздуховод 3, камеру разрежения 4, высевающий диск 5 с отверстиями 6, ось 7 диска 5, ворошилку 8, приводную звездочку 9, регулировочную задвижку 10, клапан опорожнения 11 и разгрузочное окно 12. Воздуховод 3 в нижней части разделен на два патрубка 13 и 14, один - 13 из которых подведен к камере разрежения 4, а другой 14 выполнен гибким в виде вакуум транспортера и подведен к разгрузочному окну 12. Бункер 1 сбоку имеет загрузочное отверстие 15. Бункер 1 разделен на две части 16 и снабжен задвижками 17 (Рис.2), на дне, дистанционно перекрывающими поступление семян различных культур поочередно из частей 16 бункера 1 в приемную камеру высевающего аппарата. Высевающий аппарат содержит перекрывающую заслонку 18 над двухуровневым сошником 19. Высевающий диск в нижней части снабжен патрубком 20 для сдува семян 21 с отверстия 6 диска 5.

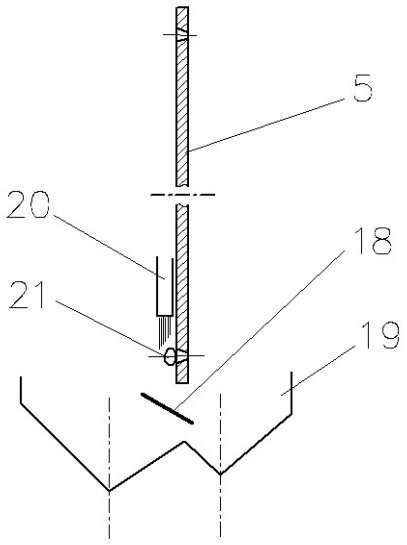


Рис.2 Регулятор высева семян.

Во время работы высевающего аппарата семена из бункера поступают к отверстиям высевающего диска, далее к отверстии диска присосавшее семя выходит за пределы зоны действия вакуума, а установленный в нижней части высевающего диска патрубок воздушным потоком сдувает семя и ускоряет падение его в борозду.

Другой патрубок воздуховода, выполненный гибким, в виде вакуум-транспортера, присасывает семена, расположенные у разгрузочного окна, где в процессе работы они постоянно накапливаются. Семена посредством патрубка с помощью вентилятора, отправляются обратно в семенной бункер через отверстия.

При использовании в бункерах под частями задвижек и заслонки в двухуровневом сошнике, приводимыми в движение дистанционно, возможен переход от одной культуры на другую без остановки агрегата.

Управляя одновременно и дистанционно из кабины трактора задвижками и заслонкой можно перекрывать части бункера и сошника в любой последовательности, что позволяет получить различные полезные варианты размещения семян двух культур на одной площади, размещать их на разную глубину и получить урожай двух культур на одной площади без дополнительных затрат.

Разработанный пневматический высевающий аппарат с регулятором подачи семян улучшает конструкцию, делая его более универсальным, маневренным, сокращает рабочее время на получение урожая двух культур с одной площади, снижает эксплуатационные затраты на 10-15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Измайлов А.Ю. Шогенов Ю.Х.* Разработка интенсивных машинных технологий и новой энергонасыщенной техники для производства основных видов сельскохозяйственной продукции // Техника и оборудование для села. 2016. №5. С.2-5.

2. *Ахалая Б.Х., Сизов О.А., Текушев А.Х.,* Сулейманов М.И. Анализ конструкций пневматических высевающих аппаратов // Инновационные машинные технологии АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – М.: ФГБНУ ВИМ, 2014.– С.130-133.

3. *Ахалая Б.Х.* Совершенствование технологии заготовки качественных кормов // Научно – технический прогресс в животноводстве: Сб. научн. труд. XII Междунар. науч.-практ. конф. – Подольск.: – 2009. – С.118-122.

4. *Пат. 167694 РФ.* Устройство для высева семян /Ахалая Б.Х. Шогенов Ю.Х., Уянаев Ю.Х., Солдаткин А.К., Грызунов С.В. // Бюл., 2017. – №1.

5. *Пат. 163569 РФ.* Пневматический высевающий аппарат с регулятором подачи семян /Ахалая Б.Х. Текушев А. Х., Потапов А.В., Рухая З.И.// Бюл., 2016. – №21.

УДК 66.046

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ГИДРОЛИЗЕ АКТИВИРОВАННОГО ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО МАТЕРИАЛА

THERMAL AND MASS-EXCHANGE PROCESSES UNDER THE HYDROLYSIS OF ACTIVATED LIGNOCELLULOSIC MATERIAL

Дмитрий Богданович Просвирников, Искандер Рефович Ахметшин
Dmitry B. Prosvirnikov, Iskander R. Akhmetshin

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань
Kazan national research technological university, Russia, Kazan
(e-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены процессы, происходящие при гидролизе активированного лигноцеллюлозного материала, полученного путем паровзрывной обработки древесины, представлена математическая модель.

Abstract: The processes occurring during the hydrolysis of activated lignocellulosic material obtained by steam-explosion treatment of wood are considered, a mathematical model is presented.

Ключевые слова: теплообмен, массообмен, гидролиз, активация, целлюлоза, лигнин.

Keywords: heat exchange, mass exchange, hydrolysis, activation, cellulose, lignin.

В последние 50 лет значительное внимание исследователей было уделено получению, изучению свойств и возможностей применения порошковой целлюлозы (ПЦ), в том числе микрокристаллической целлюлозы (МКЦ), т.е. порошковой целлюлозы «предельной» степени полимеризации (СП). МКЦ, а в частности наноцеллюлоза (НЦ) используются в таких областях как пищевая, фармацевтическая промышленность [1]. Основными видами сырья для получения МКЦ являются: древесная целлюлоза (сульфатная или сульфитная), хлопковая, целлюлоза из однолетних растений, химико-темрмомеханичесская масса [2,3]. Особый интерес представляет сырье для получения МКЦ – целлюлоза, выделенная из древесины с применением активационного метода паровзрывной обработки [4,5] с последующей делигнификацией низкомолекулярных фрагментов лигнина.

Процесс заключается в последовательности следующих стадий обработки лигноцеллюлозного сырья: 1) паровзрывная обработка древесного сырья с получением волокнистого активированного лигноцеллюлозного материала (АЛМ), 2) освобождение АЛМ от низкомолекулярных фракций лигнина (делигнификация), 3) кислотная обработка АЛМ (гидролитическая деструкция аморфной части целлюлозы в АЛМ).

Наименее изученным аспектом является характеристика тепло- и массообменных процессов, происходящих при кислотной обработке АЛМ.

При деструкции АЛМ путем кислотного гидролиза, в первую очередь разрушаются водородные связи и аморфные участки целлюлозы, после чего остаются отдельные участки кристаллических упаковок (или кристаллов). Для математического описания процессов и явлений, происходящих при гидролитической деструкции АЛМ, ниже представлены уравнения.

Состав исходного сырья АЛМ (в % от массы абсолютно сухой древесины) после паровзрывной обработки описывается уравнениями (1) – (5) [6]:

- альфа-целлюлоза

$$C_1 = 88.53\exp(-0.0016t) - 0.08t^{1.56}\exp(-0.01t); \quad (1)$$

- лигнин

$$C_2 = 10.89\exp(0.011t) - 6.43\cdot10^{-6}t^{3.1}; \quad (2)$$

- гемицеллюлоза

$$C_3 = 7.65\exp(0.012t) - 4.68\cdot10^{-9}t^{4.7}\exp(-0.008t); \quad (3)$$

- экстрактивные вещества

$$C_4 = 120.92\exp(-0.014t) - 0.25t^{1.5}\exp(-0.025t); \quad (4)$$

- всего твердых продуктов из ели (рис. 7.35)

$$C = 78.59\exp(0.0026t) - 2.7\cdot10^{-16}t^{8.7}\exp(-0.03t), \quad (5)$$

где t - температура паровзрывной обработки, °С.

Характеристика удельной поверхности и частицы материала запишется в виде эмпирического уравнения (6) [6]:

$$A_{уд} = \frac{0.01 - 0.004p_{по} - 0.0003{p_{по}}^2 + 0.0003{p_{по}}^3 + 0.0008\ln\tau_{дек} + 0.0015(\ln\tau_{дек})^2}{1 - 0.66p_{по} + 0.12{p_{по}}^2 + 0.144\ln\tau_{дек} + 0.087(\ln\tau_{дек})^2}$$

$$\mathrm{A_{уд}} = \frac{0{,}01\text{-}0{,}004\mathrm{p_{по}}\text{-}0{,}0003\mathrm{p_{по}}^2+0{,}0003\mathrm{p_{по}}^3+0{,}0008\ln\tau_{дек}+0{,}0015(\ln\tau_{дек})^2}{1\text{-}0{,}66\mathrm{p_{по}}+0{,}12\mathrm{p_{по}}^2+0{,}144\ln\tau_{дек}+0{,}087(\ln\tau_{дек})^2} \quad (6)$$

при заданных температуре $\mathrm{t_{по}}$, давлении $\mathrm{p_{по}}$ паровзрывной обработки и времени декомпрессии реактора $\tau_{дек}$, с. В (6) $\mathrm{p_{по}}$ также определяется по эмпирическому выражению [6]

$$p_{по} = 2.04e^{2.7\cdot t_{по}^{0.3}} \quad \mathrm{p_{по} = 2{,}04e^{2{,}7t_{по}^{0{,}3}}}. \quad (7)$$

Далее материал подвергается делигнификации (преимущественно кислородно-щелочной). Средний поперечный размер частицы (диаметр цилиндрической частицы) взорванного материала определяется по выражению (8):

$$d = \frac{6}{\rho_{ЛЦ} \cdot A_{УД}}, \tag{8}$$

где $\rho_{ЛЦ}$- плотность лигноцеллюлозного материала после паровзрывной обработки, кг/м^3.

Диффузионная пропитка АЛМ делигнифицирующим реагентом опишется согласно закону Фика, в котором градиент концентраций (г/с) определится как:

$$\frac{dG}{d\tau_д} = -DA_{УД} m_{ЛЦ} \frac{dc}{dl}, \tag{9}$$

где G – количество диффундирующего варочного раствора, г; $\tau_д$ – продолжительность процесса диффузии, с; $m_{ЛЦ}$ – масса абсолютно сухого лигноцеллюлозного волокна, поступившего на делигнификацию; c – концентрация растворенного вещества, г/см^3; l – расстояние, на котором происходит диффузия (средний диаметр частицы по (8)), см; D – коэффициент диффузии, зависящий от параметров растворителя, проникающих частиц и температуры, см^2/с.

Кинетика делигнификации АЛМ запишется уравнениями (10) - (12). Константа скорости реакции для остаточного лигнина $k_л$ (1/ч) вычисляется по формуле [7]:

$$k_л = \frac{1}{\tau} \ln \frac{m_{ЛЦ}}{m_{ЛЦ} - x}, \tag{10}$$

где $(m_{ЛЦ} - x)$ – количество остатка (выход целлюлозы) или лигнина после τ ч делигнификации. Изменение массы (целлюлоза в процессе делигнификации не участвует) лигнина представится как:

$$\frac{dm_л}{d\tau} = -k_Л \cdot m_{ЛЦ} \cdot C_2, \tag{11}$$

где $m_Л$ – масса лигнина, C_2 – начальная концентрация лигнина по уравнению (2).

Освобожденная от лигнина целлюлоза далее подвергается кислотному гидролизу согласно общему уравнению (12) с образованием деструктивных фрагментов аморфной части целлюлозы в виде моно- и олигосахаридов.

$$[C_6H_{10}O_5]n + nH_2O(H^+) = nC_6H_{12}O_6. \tag{12}$$

Не гидролизованная часть целлюлозы в результате неполного гидролиза остается в виде кристаллических фракций целлюлозы. Изменение содержания полисахарида целлюлозы описывается уравнениями (12) – (15)

$$\frac{dC_1}{d\tau_г} = k_1 \cdot C_{kt}(C_1 - C_x),$$

$$k_1 = \alpha_1 N \delta_1 Q_{10}, \tag{13}$$

где k_1 – константа скорости гидролиза целлюлозы, C_1 - начальная концентрация целлюлозы, C_x - концентрация целлюлозы в момент времени гидролиза $\tau_г$, α_1 - относительная каталитическая активность катализатора (кислоты), N – нормальность катализатора, выраженная числом его грамм-эквивалентов в 1 л раствора, δ_1 - относительный коэффициент устойчивости полисахарида к гидролизу, характеризующий прочность гликозидных связей в полисахаридах, Q_{10} – относительный коэффициент, характеризующий влияние температуры процесса на константу скорости гидролиза полисахарида.

В уравнении (13) представлено значение коэффициента реакционной способности полисахарида, которое у АЛМ значительно повышается благодаря паровзрывной активации.

Экспериментальным путем установлено [8], что k_1 для целлюлозы может быть определена в зависимости от температуры гидролиза $t_г$:

$$k_1 = 0{,}001 \exp\left(44{,}93 - \frac{18807{,}64}{273 + t_г}\right). \tag{14}$$

Изменение температуры материала во время гидролиза описывается выражением (15):

$$\frac{dt_{MAT}(x,\tau)}{d\tau} = a_x \cdot \frac{\partial^2 t_{MAT}(x,\tau)}{\partial x^2} \quad (15)$$

с начальными условиями

$$T_{СЛ}(0,x) = T_{НАЧ} \quad (16)$$

и граничными условиями

$$r_t j_к = -\lambda_{сл} \frac{\partial T_{СЛ}}{\partial x}\Big|_{x=0} \quad (17)$$

где a_x - коэффициент температуропроводности АЛМ, $j_к$ - тепловой поток.

Поскольку гидролиз аморфной части целлюлозы сопровождается распадом целлюлозы до моно- и олигосахаридов, которые в свою очередь при воздействии температуры также распадаются до простых веществ по закону (18):

$$\frac{dC_y}{d\tau_г} = k_2 \cdot (C_x - C_y), \quad (18)$$

$$k_2 = \alpha_2 N \delta_2 Q_{10}, \quad (19)$$

Экспериментальным путем установлено [8], что k_2 для моно- и олигосахаридов также может быть определена в зависимости от температуры гидролиза $t_г$:

$$k_1 = 0{,}001 \exp(44{,}64 - \frac{17321{,}93}{273 + t_г}). \quad (20)$$

Реальный и максимальный выходы сахаров, а соответственно и остаток кристаллической трудногидролизуемой части целлюлозы можно определить по уравнениям (21) – (22):

$$C_z = \frac{\mu P_0 k_1}{k_2 - k_1}(e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}), \quad (21)$$

$$C_{z\max} = \mu P_0 \frac{k_1}{k_2}^{\frac{1}{1-\frac{k_1}{k_2}}}, \quad (22)$$

а, зная соотношение кристаллической и аморфной частей в целлюлозе АЛМ, можно определить оптимальную продолжительность гидролиза:

$$t_{opt} = \frac{\ln k_1 - \ln k_2}{k_1 - k_2}, \quad (23)$$

Таким образом, в работе показана теоретическая возможность регулирования процесса гидролиза АЛМ с высоким содержанием целлюлозы с целью достижения максимального выхода кристаллической фракции целлюлозы и подготовки ее для получения микрокристаллической целлюлозы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Азаров В. И., Кононов Г. Н.* Химия древесины и синтетических полимеров //СПб.: СПбЛТА.–1999.–629 с. – 2011.

2. *Bondeson D., Mathew A., Oksman K.* Optimization of the isolation of nanocrystals from microcrystalline cellulose by acid hydrolysis //Cellulose. – 2006. – Т. 13. – №. 2. – С. 171-180.

3. *Gujjala, L. K., Bandyopadhyay, T. K., & Banerjee, R.* 2016 Kinetic modelling of laccase mediated delignification of Lantana camara. Bioresource technology, 212: 47-54.

4. *Просвирников Д. Б., Ахметшин И. Р.* Получение фильтрующего материала на основе порошковой целлюлозы //Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – №. 3-2. – С. 8-2.

5. *Prosvirnikov D. B. et al.* Mathematical modelling of the steam explosion treatment process for pre-impregnated lignocellulosic material //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Т. 124. – №. 1. – С. 012087.

6. *Prosvirnikov D. B. et al.* Multifactorial modelling of high-temperature treatment of timber in the saturated water steam medium //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Т. 124. – №. 1. – С. 012088.

7. *Пен Р. З., Каретникова Н. В.* Катализируемая делигнификация древесины пероксидом водорода и пероксикислотами (обзор) //Химия растительного сырья. – 2005. – №. 3.

8. *Холькин Ю. И.* Технология гидролизных производств. – 1989.

УДК 674.047

ЗАВИСИМОСТЬ КИНЕТИКИ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ ОТ ВЛАЖНОСТИ СРЕДЫ
THE DEPENDENCE OF THE KINETICS OF DRYING OF THE WOOD FROM MOISTURE ENVIRONMENT

Михаил Геннадьевич Ермоченков
Mihail G. Ermochenkov

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Мытищинский филиал, Россия, Мытищи
Moscow state technical University. N. Uh. Bauman (national research University), Mytishchi branch, Russia, Mytishchi
(e-mail: ermochenkov@mgul.ac.ru)

Аннотация: математическое моделирование процесса сушки древесины предполагает наличие информации о внутренних источниках теплоты и массы. Удаление влаги из древесины рассматривается как сложный многостадийный физико-химический процесс. Приведены результаты исследования кинетики процесса. Получены в явном виде зависимости энергий активации первой, второй и третьей стадий от влажности среды.

Abstract: mathematical modeling of drying process of wood involves the availability of information about the internal sources of heat and mass. The removal of moisture from wood is considered as a complex multistage physical-chemical process. The results of the study of the kinetics of the process. Obtained in explicit form the dependence of the activation energies of the first, second and third stages from the humidity of the environment.

Ключевые слова: сушка древесины, кинетические параметры, влажность среды.

Key words: wood drying, kinetic parameters, humidity environment.

Термическое воздействие на древесину находит все более широкое применение для улучшения физико-механических, химических, биологических, декоративных и других свойств. К таким процессам можно отнести сушку древесины. При сушке из материала удаляются различные виды свободной и связанной влаги, что приводит к изменению свойств.

Для математического описания процессов, протекающих в материале при термическом воздействии, в том числе и на этапе сушки, была разработана математическая модель [1]. Она описывает тепло- и массообмен в древесине при нагреве. Одной из задач математического моделирования является описание внутренних источников теплоты и массы. Процесс удаления связанной влаги можно рассматривать как сложный физико-химический процесс. Наличие в древесине влаги с различными видами связи с древесным веществом, разрушающимися в разных диапазонах температур, обуславливает многостадийность процесса сушки.

Константу скорости, соответствующую j-му элементарному процессу, можно описать уравнением Аррениуса:

$$k_j = A_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT_j}\right) \qquad (1)$$

где k_j – константа скорости элементарного j-го процесса; A_j – частотный фактор процесса $с^{-1}$; E_j – энергия активации, Дж/моль; R – газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Уравнение для описания скорости протекания стадии имеет вид:

$$\frac{d\omega_j}{d\tau} = \omega_{0,j} \cdot A_j \cdot \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right) \quad (2)$$

Скорость протекания многостадийного процесса описывается уравнением [2, 3, 4]:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \sum_{j=1}^{m} \omega_{0,j} A_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right), \quad (3)$$

где j – индекс, соответствующий номеру стадии; m – число стадий; T – температура; $\omega_{0,j}$- безразмерная масса стадии.

В случае моделирования процесса испарения влаги в древесине

$$\omega = \frac{W_i - W_к}{W_o - W_к}, \quad (4)$$

где W_i, W_k, W_0 – текущая, конечная и начальная влажность древесины.

Кинетические параметры для каждой стадии A_j, E_j и $\square_{o,j}$ могут быть определены по результатам термогравиметрических экспериментов [5, 6, 7]. Метод расчета частотного фактора, энергии активации и начальной массы отдельных стадий изложен в [2, 3]

Для проведения экспериментальных исследований процессов испарения влаги в древесине была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Она позволяет проводить эксперименты в среде с контролируемой влажностью. Воздух, подаваемый в нагреватель и далее в рабочую камеру установки, предварительно осушается в холодильнике. Температура внутри холодильника может меняться в диапазоне от комнатной до -45 ^{o}C, это позволяет получать воздух соответствующей влажности.

Были проведены исследования кинетики сушки древесины при разной влажности воздуха, подаваемого в рабочую камеру. На рис. 1 приведены результаты термогравиметрических исследований скорости сушки древесины березы при влажности среды $\varphi = 1\%$ и $\varphi = 63\%$. Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о зависимости скорости удаления связанной влаги от параметров среды. Исходя из характера смещения термогравиметрической кривой при изменении ф для упрощения задачи сделано допущение, что функцией влажности среды является только энергия активации E.

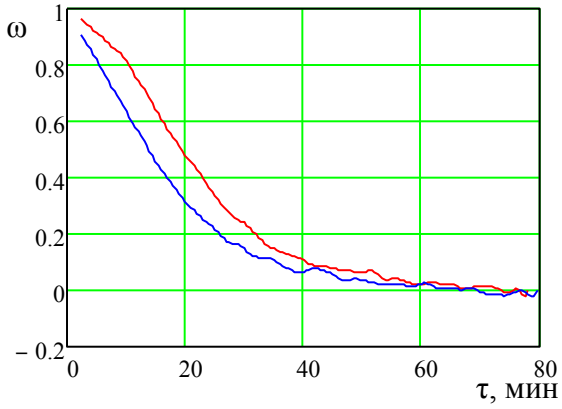


Рис. 1. Графики изменения относительной массы образца по времени при сушке в среде с относительной влажностью:

——— – $\varphi = 63\%$;

– – – – – – – – – $\varphi = 1\%$

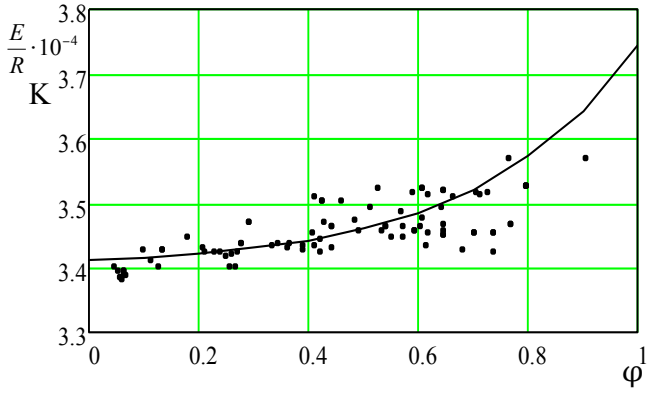


Рис. 2. Результаты исследования зависимости энергии активации первой стадии процесса сушки древесины березы от влажности среды

Для исследования влияния влажности воздуха, подаваемого в камеру, на скорость сушки термогравиметрические эксперименты проводились в воздушной среде с различной начальной относительной влажностью. Влажность воздуха на входе изменялась в пределах $\varphi = (3 \div 91)\%$.

На рис. 2 приведен график зависимости энергии активации первой стадии сушки древесины березы от относительной влажности воздуха. Точками отмечены значения энергии активации первой стадии при различной относительной влажности среды. После обработки экспериментальных данных была получена эмпирическая зависимость E от φ в виде выражения:

$$E_1(\varphi) = 107{,}6 \cdot \exp(3.46 \cdot \varphi) + 34000. \quad (5)$$

При определении коэффициентов уравнения регрессии использовался метод средних.

Расчетные значения $E(\varphi)$ приведены сплошной линией.

На рис. 3 приведен график изменения энергии активации второй стадии в зависимости от относительной влажности среды. Уравнение регрессии, описывающее зависимость энергии активации второй стадии процесса удаления связанной влаги из древесины березы, имеет вид:

$$E_2(\varphi) = -2{,}8233218 \cdot 10^8 \cdot \exp(-2{,}2384272 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi) + 2{,}823634 \cdot 10^8. \quad (6)$$

На рис. 3 функция $E_2(\varphi)$ приведена в виде сплошной линии, точками нанесены экспериментальные данные.

Уравнение регрессии, описывающее зависимость энергии активации третьей стадии процесса удаления связанной влаги из древесины березы, имеет вид:

$$E_3(\varphi) = 219 \cdot \exp(8{,}01 \cdot \varphi) + 15236. \quad (7)$$

На рис. 4 приведены результаты экспериментальных исследований влияния влажности среды на значение энергии активации третьей стадии. Сплошная линия – расчетные значения по эмпирической зависимости (7), точки – экспериментальные данные.

Проведенные исследования показали, что кинетические параметры более высокотемпературных стадий мало зависят от свойств среды, так как протекают при более высоких температурах.

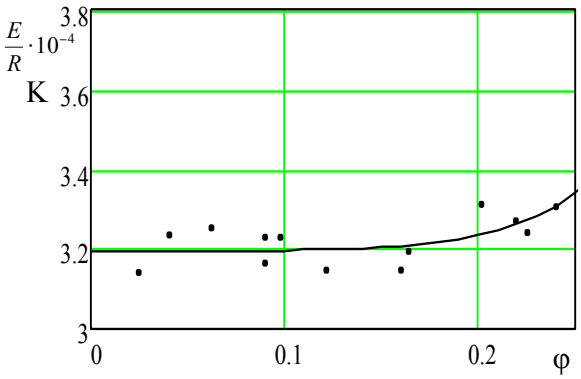


Рис. 3. Результаты исследования зависимости энергии активации второй стадии процесса сушки древесины березы от влажности среды

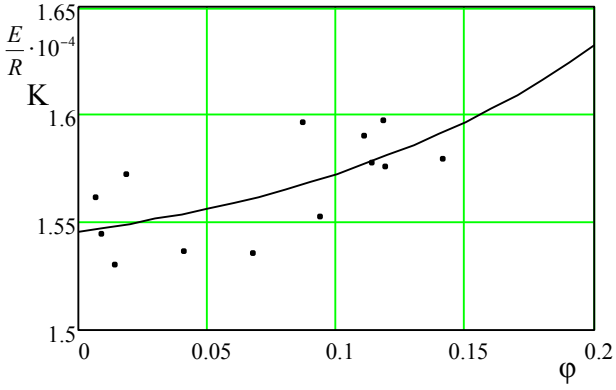


Рис. 4. Результаты исследования зависимости энергии активации третьей стадии процесса сушки древесины березы от влажности среды

Исходя из изложенного можно сделать вывод, что предложенная модель адекватно описывает внутренние источники массы в древесине при сушке. Скорость процесса зависит от влажности среды. Полученные уравнения зависимостей энергий активаций первой, второй и третьей стадий от относительной влажности среды позволяют рассчитывать скорость удаления связанной влаги из древесины при любой влажности среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермоченков М.Г., Семенов Ю.П. Математическая модель процессов, протекающих в древесине при интенсивной сушке. Строение, свойства и качество древесины // Труды IV Международного симпозиума. – СПб.: СПб ЛТА, 2004. - Стр. 530-533.
2. Шведов Б. А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем. Дис. … докт. техн. наук. – М.: МЛТИ, 1990. – 542 с. (2)
3. Жигунов С.В. Тепломассообмен и кинетика термодеструкции при высокотемпературном нагреве композиционных материалов. Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГУЛ, 1990. – 184 с. (6)
4. Ермоченков М. Г., Евстигнеев А.Г., Кувик Т.Е.. Термогравиметрические исследования кинетики термической сушки древесины //Научные труды. – Вып. 335.М.: МГУЛ, 2007. – С. 36–46. (3)
5. Кислицын А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. – М.: Лесная пром-сть, 1990. – 312 с. (8)
6. Slopiecka, Katarzyna; Bartocci, Pietro; Fantozzi, Francesco. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis / 3rd International Conference on Applied Energy (ICAE) Perugia, ITALY, 2011. - APPLIED ENERGY, 2012. – Vol. 97. – Is. - Pp. 491-497.
7. Grieco, Enrico; Baldi, Giancarlo. Analysis and modelling of wood pyrolysis / CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE, 2011. – Vol. 66. - Is. 4. - Pp. 650-660.

УДК 628.511

ВЫБОР ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ФИЛЬТРОВ
THE CHOICE OF FILTER MATERIALS AND THE RATIONAL DESIGN OF THE FILTER REGENERATION SYSTEM

Леонид Иванович Гудим, Вадим Валерьевич Марков
Leonid Ivanovich Gudim, Vadim Valeryevich Markov

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

Аннотация: Рассмотрены требования для фильтровальных материалов фильтров с регенерацией, рассмотрен выбор рациональной конструкции системы регенерации, предложены коэффициенты регенерации и пылеулавливания, как критерии для оптимизации режимно-конструктивных параметров.

Abstract: The requirements for filtering filter materials with regeneration are considered, the rational design of the regeneration system is selected, the coefficients of regeneration and dust collection are proposed for optimizing the regime-constructive parameters.

Ключевые слова: фильтровальные материалы, система регенерации фильтров.

Key words: filter materials, filter regeneration systems.

Обширной областью применения фильтров из волокнистых материалов является очистка промышленных газов. Здесь требуется очистка значительных объёмов газа (десятки и сотни тысяч м3/ч) с концентрацией пыли от долей до десятков г/м3. В процессе фильтрования на поверхности фильтрперегородки должен формироваться осадок, а перегородка должна хорошо восстанавливать свои фильтрующие свойства после удаления осадка в цикле регенерации тем или иным способом (обратная продувка, встряхивание и др.) Очевидно, что в зависимости от области применения фильтра выбирается рациональная структура материала для его фильтрперегородки, и конструкция системы регенерации.

В промышленности все большее применение находят рукавные и кассетные фильтры с регенерацией фильтрперегородки обратной импульсной продувкой сжатым воздухом. Избыточное давление сжатого воздуха в ресивере составляет 0,4...0,8 МПа, длительность импульса 0.1...0,3 с. При этом частота импульсов, их необходимая мощность сложным образом зависят от многих параметров: свойств и дисперсного состава улавливаемой пыли, концентрации пыли в очищаемом воздухе, фильтровальных свойств материала фильтровальной перегородки, характера и скорости процесса фильтрования, конструктивных особенностей фильтрперегородки.

Удержание и нарастание по толщине на фильтрперегородке слоя осадка определяется воздействием на частицы слоя аэродинамической силы, прижимающей их к перегородке, сил адгезии и аутогезии. Сила адгезии, или сила взаимодействия частиц с материалом фильтрперегородки действует в начальный период ее запыления, на начальной стадии образования равновесной запыленности. Дальнейшее нарастание и удержание слоя на поверхности перегородки определяется силами аутогезии, или взаимодействия частиц друг с другом, и аэродинамическими.

Сила адгезионного взаимодействия частиц с перегородкой зависит от природы частиц, параметров среды и материала перегородки. Монослой частиц под воздействием этих сил может удерживаться очень прочно и обычными средствами регенерации не разрушается. Проблема регенерации фильтрперегородки связана с преодолением аутогезионных связей в слое осадка.

В качестве показателя, характеризующего аутогезию сыпучих материалов, принимается прочность на разрыв пылевого слоя. По величине разрывной прочности пылевого слоя принято квалифицировать пылевидные материалы на четыре группы:

Группа	**Разрывная прочность, Па**
Не слипающиеся	< 60
Слабо слипающиеся	60-300
Средне слипающиеся	300-600
Сильно слипающиеся	> 600

В зависимости от того, к какой группе относится улавливаемая пыль, какова ее разрывная прочность можно решать вопрос о режимных параметрах регенерации фильтра, т.е. о расходе продувочного воздуха и его скорости.

При регенерации фильтрперегородки обратной импульсной продувкой сжатым воздухом, образовавшийся на ней в цикле фильтрования, слой осадка разрушается и сбрасывается за счет аэродинамического давления на него продувочным воздухом. Разрушению слоя осадка способствует также аэродинамическое встряхивание фильтрэлемента, которое происходит при воздействии на него кратковременным импульсом. Можно предполагать, что аэродинамическое давление, определяемое перепадом давления ΔPпр в вертикальном слое осадка при продувке должно быть не меньше суммы его разрывной прочности Rn и аэродинамического фильтрационного потока, удерживающих слой осадка [1]:

$$\Delta P_{пр} = R_n + \Delta P_n \tag{1}$$

$$W = \frac{\mu W_{пр} h_0 (1-\xi_0)^2}{\varphi^2 d^2 \xi_0^3} = R_{\text{П}} + \Delta P_{\text{П}} \tag{2}$$

Откуда для необходимой скорости продувки $W_{пр}$ имеет:

$$W = \frac{(R_n + \Delta P_n)\varphi^2 d^2 \xi_0^3}{\mu h_0 \ K_k (1-\xi_0)^2} \tag{3}$$

Расход воздуха на продувку из цикла регенерации составит:

$$Q_{пр} = W_{пр} S \tag{4}$$

где: S - площадь фильтровальных перегородок

ξ_o – пористость осадка;

φ - поправочный коэффициент пористости;

h_o – толщина слоя осадка;

d – диаметр волокна;

μ - динамическая вязкость воздуха;

K_k - коэффициент гидравлического сопротивления осадка с перегородкой.

Узел импульсной продувки может включать в себя ресивер, клапаны, коллекторы, сопла, эжекторные трубки, вытеснители, блок управления. Рассмотрим возможные конструктивные варианты этих элементов и методы расчета их режимных и конструктивных параметров.

Объем V ресивера зависит от количества n одновременно продуваемых патронов, длительности импульса $\tau_и$, допустимым падением давления ΔP в ресивере воздуха за время импульса и расходом воздуха Q, который необходим на импульс.

Количество n одновременно регенерируемых патронов не должно быть слишком большим, чтобы существенно не нарушался режим фильтрования в остальных и не оказалось кратковременное повышение избыточного давления в фильтре и в воздуховодах превышающим допустимые значения по условиям прочности и деформации их элементов.

Допустимое значение n можно достаточно просто рассчитать, зная объем фильтра, расход сжатого воздуха за один импульс и допустимое избыточное давление в фильтре. [3]

Масса продувочного воздуха плотностью процесса фильтрования согласно (4)

$$M_n = \rho_\phi W_n S_1 n \tau_u \tag{5}$$

где: S_1 – площадь фильтрперегородки одного патрона;

$\rho_ф$ – плотность воздуха при $P_ф$ и температуре $T_ф$ в фильтре;

Очевидно, $M_п$ должно равняться массе воздуха, вышедшего из ресивера за импульс. Отсюда, для объема ресивера имеем

$$V = W_n S_1 n \tau_u \frac{P_\phi T}{\Delta P T_\phi} \tag{6}$$

где: ΔP - падение давления в ресивере за импульс;

T - температура воздуха в ресивере, °К;

Продувочный воздух из коллектора в продуваемый фильтрпатрон поступает через сопло или отверстие в боковой стенке коллектора.

Расход воздуха через сопло, параметры струи, эффективность процесса регенерации во многом определяется размерами и формой сопла, его расположением над фильтрпатроном. Сопло может быть коническим звуковым или сверхзвуковым в виде сопла Лаваля. Встречаются зарубежные фильтры, в которых продувка ведется через простые отверстия или через короткие цилиндрические патрубки выполненные в раздающем коллекторе.

Имеются конструкции, в которых для усиления эжекции окружающего воздуха между соплом и патроном устанавливаются патрубки Вентури.

Имеются конструкции, в которых продувочной струе сообщается подкрутка.

Таким образом, на эффективность процесса регенерации импульсной -продувкой сложным образом влияет большое число факторов. По принимаемым решениям в литературе нет четких теоретических и данных сравнительных экспериментальных исследований.

Рассмотрим особенности истечения продувочного воздуха через различные выпускные устройства и их возможное влияние на процесс регенерации.

Размеры коллектора или клапана будем считать настолько большими по сравнению с выпускным устройством, чтобы скорость можно было бы считать равной нулю, а U_o, P_o, T_o, p_o - параметрами торможения.

Запишем уравнение Бернулли для процесса истечения, пренебрегая потерями энергии. Очевидно, ввиду быстротечности процесс будет адиабатическим.

$$\frac{U_1^2}{2} + \frac{kP_1}{k-1p_1} = \frac{kP_0}{k-1p_0} \tag{7}$$

С учетом соотношений:

$$\frac{p_0}{p_1} = (\frac{p_0}{p_1})^{\frac{1}{k}} = (\frac{p_1}{p_0})^{-\frac{1}{k}} \tag{8}$$

Для скорости истечения получим:

$$U_1 = \sqrt{\frac{2kP_0}{k-1\rho_0}}\sqrt{1(\frac{P_1}{P_0})^{\frac{k-1}{k}}} \tag{9}$$

Скорость звука в точке торможения C_0 и критическая скорость C_* определяется параметрами заторможенного газа:

$$C_0 = \sqrt{k\frac{P_0}{\rho_0}} \text{ и } C_* = C_0\sqrt{\frac{2}{k+1}} \tag{10}$$

Отсюда,

$$U_1 = C_0\sqrt{\frac{2}{k-1}}\sqrt{1-(\frac{P_1}{P_0})^{\frac{k-1}{k}}} = C_*\sqrt{\frac{k+1}{k-1}}\sqrt{1-(\frac{P_1}{P_0})^{\frac{k-1}{k}}} \tag{11}$$

Найдем массовый расход воздуха через отверстие или сопло:

$$M = \rho_1 U_1 S = \rho_0 S(\frac{P_1}{P_0})^{\frac{1}{k}}\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{P_0}{\rho_0}\left[1-(\frac{P_1}{P_0})^{\frac{k-1}{k}}\right]} \tag{12}$$

Анализ (12) показывает, что при $\xi_* = \frac{P_1}{P_0} = (\frac{2}{k+1})^{\frac{k}{k-1}}$, называемое критическим, массовый расход имеет максимально критическое значение:

$$M_{\max} = S \tag{13}$$

Характер зависимости массового расхода от ξ объясняется тем, что при уменьшении P_1 до критического, соответствующего ξ_* скорость истечения U_1 достигает критического значения, равного местной скорости звука C* и на срезе сопла устанавливается, так называемый, звуковой барьер и всякое дальнейшее изменение P_1 не проникает в выпускное устройство. Например, для воздуха к=1,41 ξ_*=0,528.

Разница в максимальном значении расхода при истечении через отверстие в коллекторе, или через насадки будет определяться коэффициентом расхода, учитывающим гидравлическое сопротивление проходу воздуха через них.

В сверхзвуковом сопле Лаваля происходит преобразование дозвукового потока в сверхзвуковой: M>1, W>a, где: M - число Маха; W - скорость газа; a - местная скорость звука; Уравнение неразрывности или постоянства массового-расхода:

$$M = \rho UF = const. \tag{14}$$

где: ρ - плотность газа; U - скорость; F - площадь поперечного сечения.

В конфузорной части газ двигается с ускорением. Скорость возрастает от 0 до критической U = C*. Увеличение скорости сопровождается падением давления, следовательно, и плотности, что частично усиливает рост скорости по сравнению с ростом только за счет уменьшения площади поперечного сечения. Поэтому, сужать канал при подходе к критическому сечению нужно уже не так быстро. В критическом сечении скорость становится равной скорости звука U = C*.

В диффузорной части сопла скорость увеличивается за счет дальнейшего падения плотности, что видно из уравнения (14).

Зависимость скорости от площади поперечного сечения сопла:

$$\frac{F}{F_{kp}} = \frac{(1+\frac{k-1}{2}M^2)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{M(\frac{k+1}{2})^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} = \frac{(1+0{,}2M^2)^3}{1{,}73M} \quad (15)$$

где: k = 1,41 – показатель адиабаты.

Из (15) видно, что относительная площадь сечения сопла, число Маха, означает скорость взаимно определяющие друг друга. Давление, температура и плотность газа также определяются числом Маха:

$$\frac{P_0}{P} = (1+\frac{k-1}{2}M^2)^{\frac{k}{k-1}} \quad (16)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1+\frac{k-1}{2}M^2 \quad (17)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = (1+\frac{k-1}{2}M^2)^{\frac{k}{k-1}} \quad (18)$$

Из (15) следует, следует, что для получения на срезе сопла определенной скорости и числа Маха необходимо иметь соответствующую площадь $F/F_{кр}$ и иметь достаточный запас давления в камере перед соплом.

Давление на срезе сверхзвукового сопла не связано с внешним давлением, а зависит только от давления в камере и формы сопла.

Приведенные выше формулы дают хорошую точность расчета, т.к. процесс близок к идеальной адиабате.

Расчет газа через сверхзвуковые сопла зависит только от состояния газа перед соплом и площади $F_{кр}$:

$$M = \rho_* C_* F_{кр} \quad (19)$$

Или для воздуха (k = 1,4; R = 287,3;):

$$G = 0{,}0404\frac{P_0 F_{кр}}{\sqrt{T_0}} \quad (20)$$

Из (16-18) для параметров воздуха в критическом сечении имеем:

$$T_0 = 1{,}2T_{кр};\ P_0 = 1{,}89P_{кр};\ a_0 = 1{,}1a_{кр};\ \rho_0 = 1{,}58\rho_{кр} \quad (21)$$

Когда давление на срезе сопла $P_н$ равно давлению в среде P_0, в которую вытекает струя, имеем, так называемый, расчетный режим истечения. В случае истечения в нерасчетном режиме, когда Рн>Ро, давление в струе и в атмосфере должны выровняться. Этот процесс сопровождается циклами и переходами скорости от сверхзвуковой к дозвуковой и обратно со скачками уплотнения.

В том случае, когда Рн<Ро скачки уплотнения могут образовываться сразу на срезе сопла или проникать во внутрь диффузора. При большом противодавлении сверхзвуковое истечение оказывается невозможным. Скачки всё ближе подходят к критическому сечению.

С учетом всех потерь давления в сопле, массовый расход воздуха можно определить:

$$M = \mu 0{,}0404\frac{P_0 F_{кр}}{\sqrt{T_0}} \quad (22)$$

где: коэффициент расхода $\mu = 0{,}97 – 0.98$;

При выборе фильтровальных материалов для промышленных регенерируемых фильтров важное значение имеет количественная и качественная оценка регенерируемости фильтровальной перегородки, способности выходить на приемлемое значение начального установившегося сопротивления, сохранять пылеулавливающую способность и выдерживать большое число механических воздействий на нее в циклах «фильтрование - регенерация». В работе [2] приведено описание экспериментального стенда (совместно разработанного и

изготовленного для этих целей в МГТУ им. А.Н. Косыгина и ООО «Эковент К») применительно к промышленным рукавным и кассетным фильтрам с регенерацией обратной импульсной продувкой сжатым воздухом, которые в настоящее время широко применяются в различных отраслях промышленности.

Количественную оценку результатов испытаний на регенерируемость материала можно выполнить по опытным значениям коэффициента регенерируемости Кр, рассчитанного по формуле для одинаковых периодов времени,

$$K_p = 1 - \int_0^{\tau} \Delta P_н(\tau) d\tau / (\Delta P_{пр} - \Delta P_н) T \qquad (23)$$

где Т – время испытания.

Для аппроксимации функции $\Delta P_н(\tau)$ можно использовать формулу (24), которая хорошо согласуется с опытными данными [2] процесса постепенной закупорки пор перегородки

$$\Delta P_н(\tau) = \Delta P_п + \Pi\left[1 - \exp(-\tau / \tau_п)\right] \qquad (24)$$

где $\Pi = (\Delta P_{пр} - \Delta P_о)$ - константа; $\tau_п = \sigma_{max} / (K_0 W_ф C)$ - характерное время; σ_{max} - максимальное значение задержки, когда все поры перегородки максимально забиты пылью для заданных условий процессов фильтрования и регенерации, соответствующих выходу на ΔРР, и вероятность дальнейшей задержки равна нулю; $К_0$ - вероятность задержки в начале процесса чистой перегородкой (от 0 до 1); Wф - скорость фильтрования; С - концентрация пыли на входе в фильтр. Уравнение (24) качественно отражает влияние на процесс таких параметров как скорость фильтрования, концентрация пыли, сопротивление перегородки, ее пористость. Подобным же образом и за тот же период фильтрования можно оценить среднюю степень улавливания пыли K_η данной перегородкой, работающей в данных условиях

$$K\eta = \frac{1}{T}\int_0^T \eta(\tau) d\tau$$

По значениям коэффициентов Кр K_η можно судить о целесообразности применения того или иного фильтровального материала в конкретных условиях пылеочистки.

Выводы

1. Для выбора фильтровальных материалов и рациональной системы конструктивных элементов системы регенерации фильтров необходимо проведение дополнительных испытаний на экспериментальном стенде [2], для которого разработаны методики испытаний.
2. Для более точной оценки фильтрованных свойств материалов и элементов системы регенерации, оптимизации режимно-конструктивных параметров фильтровальных элементов предложено использовать коэффициенты регенерации и пылеулавливания.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гудим Л.И., Решетнев Д.С.* Проектирование и испытание свойств нетканых фильтровальных материалов // Сб. научн. тр.: Актуальные проблемы технологии нетканых текстильных материалов. – М. МГТУ им. Косыгина, 2005 – С.28-41.

2. *Гудим Л.И., Исаев В.В., Марков В.В., Решетнев Д.С.* Стенд для испытания волокнистых фильтровальных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. - 2011.- №4.- С.32-35.

3. *Гудим Л.И., Марков В.В.* Повышение эффективности регенерации фильтров с импульсной продувной // Химические волокна – 2015. – с.80-83.

УДК 631.331

ТЕХНИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ДОЗИРОВАНИЯ КАЛИБРОВАННЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ
TECHNICAL DEVICE FOR DOSING CALIBRATED LOOSE MATERIALS

Иван Николаевич Сёмов
Ivan N. Semov

Пензенский ГАУ, Россия, Пенза
Penza state agrarian University, Russia, Penza
(e-mail: semiw@mail.ru)

Аннотация: Поставлена проблема дозирования семян сахарной свеклы. Приведена конструктивно-технологическая схема предлагаемого технического решения. Прилагаются результаты производственной проверки и экономическое обоснование применения предлагаемой разработки.

Abstract: The problem of dosing sugar beet seeds is posed. The constructive technological scheme of the proposed technical solution is given. The results of the production inspection and the business case for the proposed development are attached.

Ключевые слова: семена, сахарная свекла, устройство
Key words: seeds, sugar beet, device

Внедрение интенсивных промышленных технологий в строительство, машиностроение, медицину, сельское хозяйство, пищевую промышленность предусматривает резкое повышение требований к качеству дозирования калиброванных сыпучих материалов.

Повышенные требования к качеству дозирования калиброванных сыпучих материалов предъявляет сельское хозяйство. Это связано в первую очередь с тем что работа идёт с биологическим объектом – живым семенем (например сахарной свеклы), повреждение которого недопустимо и ведёт к гибели зародыша и вследствие потери урожая.

Для пунктирного (точного) посева семян сахарной свеклы, наибольшее распространение получили сеялки с механическими высевающими аппаратами как за рубежом, так и в России. Особенно распространены вертикально-дисковые аппараты, которые из-за простоты конструкции; отсутствия громоздких приспособлений типа ворошилок, ускорителей выброса т.п., достаточного качества поштучного отбора семян и их укладки несут основную нагрузку на посеве. При всех их достоинствах у вертикально-дисковых аппаратов есть и недостатки. Это в первую очередь недостаточные показатели равномерности распределения семян и растений в рядках и высокий процент дробления посевного материала. Особенно это проявляется у сеялок типа СКТ-12 различных модификаций при посеве калиброванных инкрустированных семян [1].

Поэтому при переходе к индустриальным технологиям с более совершенными агроприемами, позволяющими существенно повысить полевую всхожесть, на ведущее место выходит возможность модернизации конструкции сеялки для стабильно точного высева 6-8 семян.

Поэтому целью решения данной проблемы в ФГБОУ ВО «Пензенский ГАУ» был разработан, изготовлен и испытан высевающий аппарат с подпружиненным выталкивателем семян (рисунок1) [2].

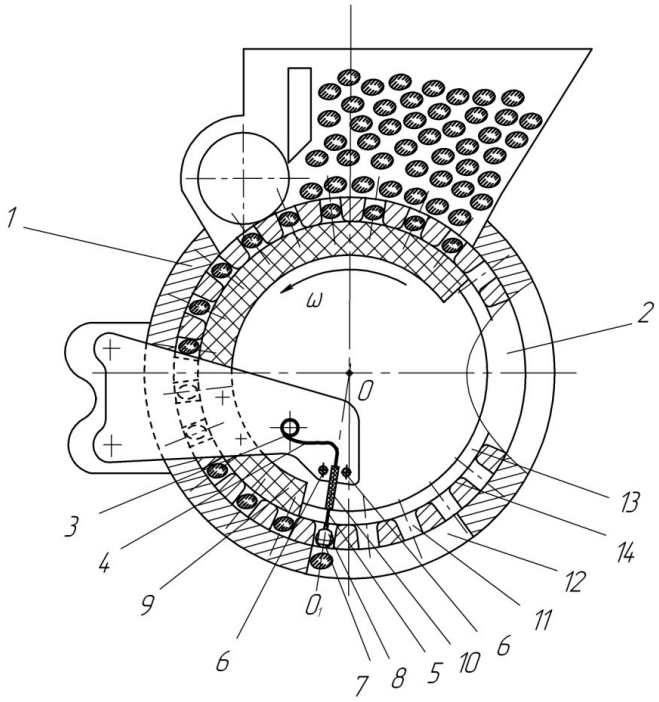


Рисунок 1 – Схема высевающего аппарата.

1 - корпус высевающего аппарата; 2-высевающий диск; 3 - подпружиненный выталкиватель; 4 - нерабочая часть подпружиненного выталкивателя; 5 - рабочая часть подпружиненного выталкивателя; 6 - гаситель колебаний; 7 - шарик; 8 - шаровое гнездо; 9 - сектор-вставка; 10 - ограничитель хода; 11 - ячейка; 12 - высевное окно; 13 - кольцевая проточка; 14 - перемычка

При теоретическом обосновании конструктивно-режимных параметров высевающего аппарата с подпружиненным выталкивателем семян рассматривалась работа высевающего аппарата в трех положениях шарика относительно ячейки высевающего диска: шарик выходит из ячейки; шарик движется по перемычке между ячейками; шарик заходит в ячейку.

Были установлены аналитические зависимости для определения времени и положения шарика подпружиненного выталкивателя семян в каждый из моментов, силы, действующей на семя при выходе его из ячейки.

Оптимальные конструктивно-режимные параметры высевающего аппарата с подпружиненным выталкивателем семян определялись методом планирования многофакторного эксперимента униформротатабельного плана [3]. На основе априорного ранжирования факторов и отсеивающего эксперимента были отобраны три фактора в большей степени, влияющие на равномерность распределения семян Р (где Р - частота появления интервалов со средним расстоянием между семенами) в рядке: окружная скорость высевающего диска (Vд), поступательная скорость посевной секции (Vс), жесткость подпружиненного выталкивателя семян (с) [4]. После обработки результатов получена адекватная модель рабочего процесса распределения семян сахарной свеклы в рядке высевающим аппаратом, которая в раскодированном виде имеет следующую зависимость:

$$P = -74{,}251 + 116{,}997 \cdot \text{Vä} + 50{,}226 \cdot Vc + 54{,}223 \cdot \tilde{n} - 678{,}594 \cdot \text{Vä}^2 -$$

$$-17{,}073 \cdot Vc^2 - 4{,}636 \cdot \tilde{n}^2 + 0{,}246 \cdot \text{Vä} \cdot \text{Vc} + 21{,}35 \cdot \text{Vä} \cdot \tilde{n} + 0{,}095 \cdot Vc \cdot \tilde{n}.$$

Лабораторные исследования позволили установить конструктивно-режимные параметры высевающего аппарата с подпружиненным выталкивателем семян сахарной свеклы окружную скорость высевающего диска Vд = 0,106…0,198 м/с, поступательную скорость посевной секции Vс = 1,3…1,7 м/с, жесткость подпружиненного выталкивателя семян с=4,75…5,55 Н/м, при которых достигается максимальная равномерность распределения семян в рядке ν=16…19% [5].

Лабораторно-полевые и производственные исследования сеялки с экспериментальными высевающими аппаратами семян сахарной свеклы подтвердили целесообразность применения высевающего аппарата с подпружиненным выталкивателем семян, а также достоверность теоретических и лабораторных исследований.

Проведенные экономические расчеты подтверждают что применение сеялки с подпружиненным выталкивателем семян для посева сахарной свеклы экономически целесообразно. При незначительном росте эксплуатационных издержек при посеве семян сеялкой с подпружиненным выталкивателем семян (на 58 руб./га), годовая экономия от получения дополнительной продукции составляет 177,5 тыс. руб/га. Годовой экономический эффект при нормативной годовой загрузке 40 ч составил 177,4 тыс. рублей на одну сеялку, при сроке окупаемости 0,63 года [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Сёмов, И.Н. Разработка и обоснование конструктивно-режимных параметров дискового высевающего аппарата с подпружиненным выталкивателем семян сахарной свеклы: дисс. … канд. техн. наук: 05.20.01: защищена 15.06.2007 утв. 02.11.2007 / Сёмов Иван Николаевич. – Пенза, 2007 – 130 с.

2. Технологии и средства механизации сельского хозяйства: учебное пособие / А.В. Мачнев, Н.И. Стружкин, Н.П. Ларюшин и др. – Пенза: РИО ПГСХА, 2016. – 254 с.

3. Кухарев, О.Н. Устройство для шлифования семян / О.Н. Кухарев И.Н. Сёмов, И.А. Старостин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2014. – №2. – С. 8-10.

4. Kukharev, O.N. The technical solution for a laminated coating on a rounded surfaces / O.N. Kukharev, I.N. Semov E.G. Rylyakin Contemporary Engineering Sciences. 2015. Т. 8. № 9. С. 481-484.

5. Кухарев, О.Н. Эффективность применения барабанного дражиратора с вращающимся дном / О.Н Кухарев, И.Н. Сёмов, А.М. Чирков // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. –№ 9. – С. 34-36.

6. Оптимизация устройства с эластичным элементом для дозирования калиброванных сыпучих материалов: монография / Н.П Ларюшин, И.Н. Семов. О.Н. Кухарев, И.И. Романенко. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 172 с.

УДК 66.047.3.085.1

ИЗУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ КИНЕТИКИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ СУШКИ СТОЛОВОЙ СВЕКЛЫ

STUDY AND ANALYSIS OF THE KINETICS OF THE STATIONARY DRY BIRES DRYING REGIMES

Екатерина Юрьевна Желтоухова, Виктор Сергеевич Черненко, Игорь Валентинович Ларин
Ekaterina Yu. Zheltoukhova, Viktor S. Chernenko, Igor V. Larin

Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, Воронеж
Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh
(e-mail: Katsturova@gmail.com, chernenco94@gmail.com, larin.igor2010@mail.ru)

Аннотация: В ходе опытов были подобраны стационарные режимы радиационно-конвективной сушки пластин столовой свеклы.

Abstract: Stationary regimes of radiation-convective drying of table beets were selected during the experiments.

Ключевые слова: радиационно-конвективная сушка, стационарный режим сушки, столовая свекла.

Keywords: radiation-convective drying, stationary drying regime, table beet.

Консервная и овощесушильная промышленность занимает важное место в обеспечении населения продуктами питания. Рынок сушеной столовой свеклы с каждым годом стабильно растет. Увеличение потребления сушеных овощей можно объяснить их повышенным сроком годности и высокой концентрацией полезных веществ. Свежие корнеплоды столовой свеклы, поступающие на производство, по своему качеству должны соответствовать техническим условиям ГОСТ 32285 – 2013.

Свекла являются чрезвычайно полезным овощем, который имеет множество полезных компонентов. Процесс сушка свеклы дает возможность сохранить и использовать все вкусовые и полезные характеристики продукта в течение продолжительного времени. Сушеную свеклу включают в рацион питания для выведения из организма шлаков и токсинов. Содержащиеся в свекле флавоноиды способствуют снятию сосудистых спазмов, увеличивают прочность капилляров, снижают артериальное давление, положительно воздействуют на кровь; имеют антиканцерогенное и антирадиационное действие.

Сушку можно отнести к одному из методов консервирования, который способствует сохранению около 98% от всех термолабильных веществ (витаминов, микро- и макроэлементов) свежего продукта.

На экспериментальной радиационно-конвективной сушильной установке проводились серии опытов со стационарными параметрами сушки столовой свеклы: температура продукта: 45 ÷ 60°С, скорость движения теплоносителя : 0,3 ÷ 1,5 м/с, расстояние от продукта до ИК- лампы: 200 ÷ 250 мм. Мытая столовая свекла проход инспекцию и сортирование; затем нарезается тонкими пластинами толщиной 1,5 мм.

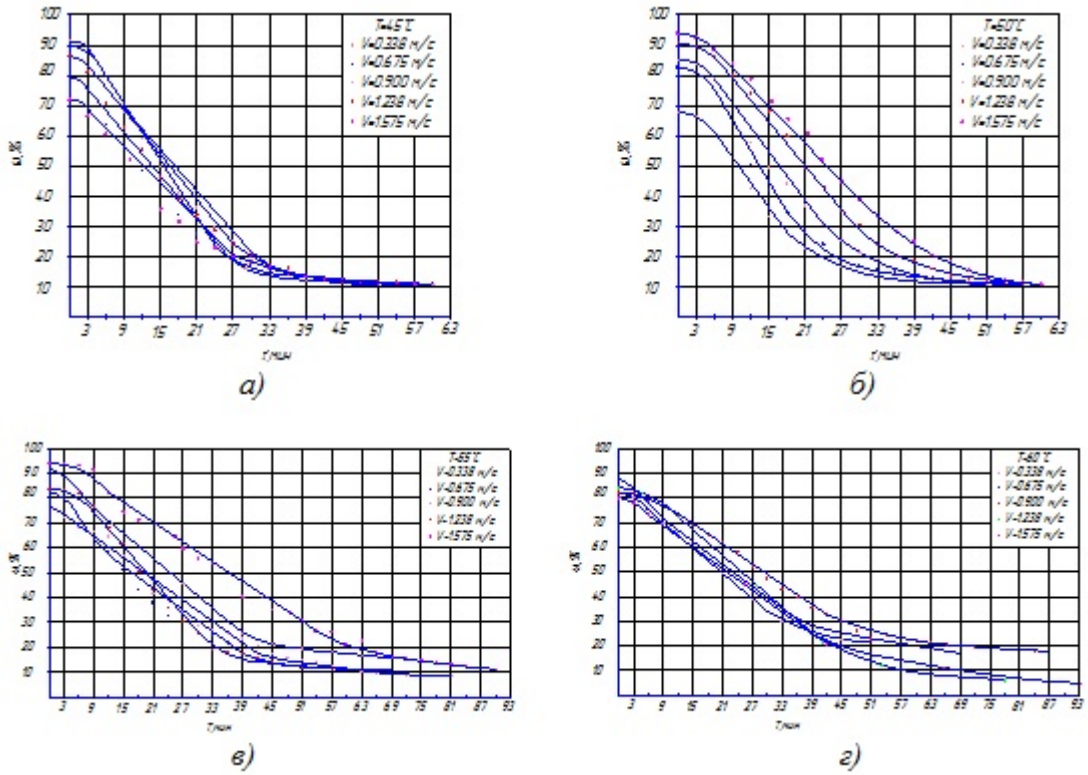


Рис. 1. Кривые сушки свеклы: *а*) при t = 45° С, *б)* при t = 50° С, *в)* при t = 55° С, *г)* при t = 60° С

Нарезанные пластинки свеклы подвергают стационарной радиационно-конвективной сушке. Нагрев продукта осуществляется ИК-лучами с длиной волны в диапазоне 1,16-1,65 мкм и плотностью теплового потока 2,69-5,44 кВт/м^2 при одновременном обдувании воздухом для обеспечения разности парциальных давлений над продуктом. В результате анализа полученных данных (рис.1, 2.) можно сделать вывод, что в периоде постоянной скорости сушки, преимущественно, удаляется капиллярная и осмотическая влага. При этом

вся теплота, подводимая к пластинкам свеклы, идет на интенсивное поверхностное испарение влаги при неизменной температуре продукта.

В период убывающей скорости сушки происходит уменьшение скорости сушки и повышение температуры пластин, при этом удаляется осмотическая и адсорбционная влага. Данный период берет свое начало в момент, когда влажность на поверхности свеклы устанавливается равной первой критической, температура этой поверхности увеличивается. Место испарения влаги находится не на поверхности, а внутри обрабатываемого продукта, в связи с этим влага перемещается из центральных слоев пластин к зоне испарения в жидком виде, а от зоны испарения до поверхности она движется в парообразном состоянии.

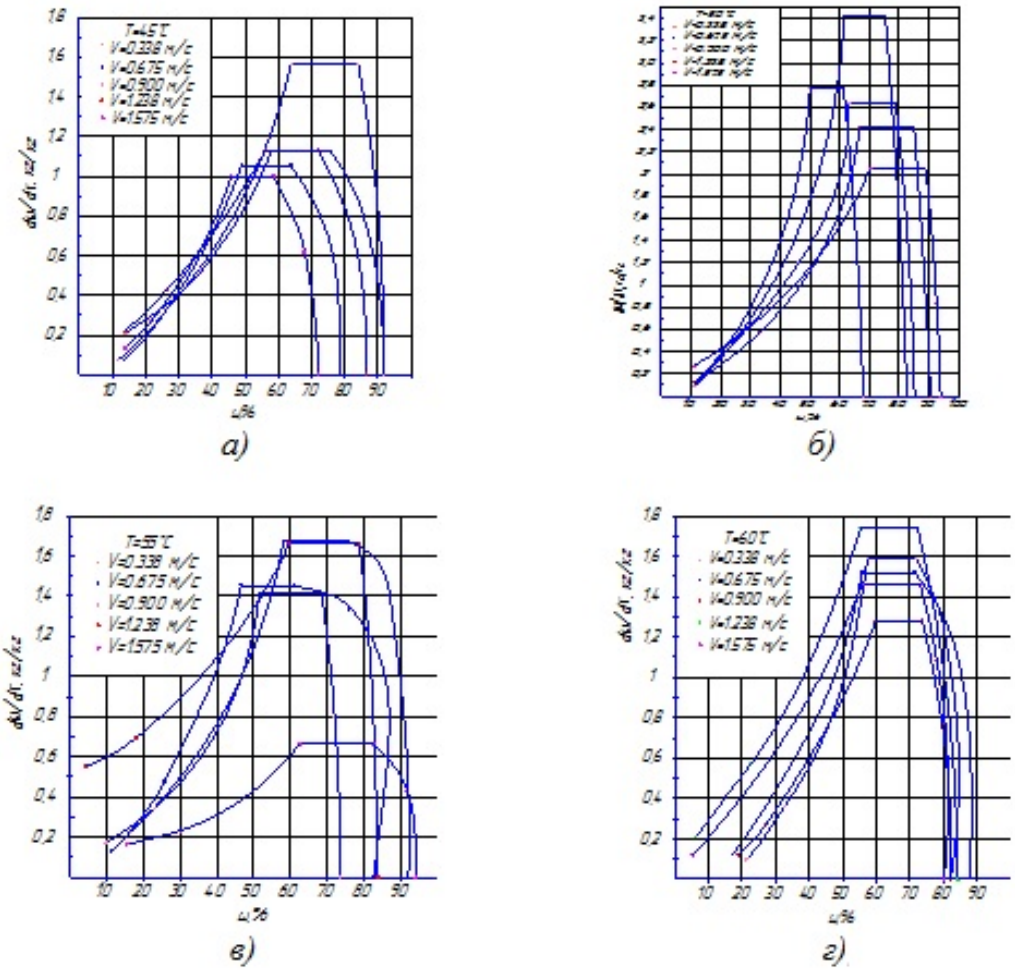


Рис. 2. Кривые скорости сушки свеклы: *а*) при t = 45° С, *б)* при t = 50° С, *в)* при t = 55° С, *г)* при t = 60° С

В ходе экспериментов были подобраны стационарные режимы сушки. Предлагаемые режимы позволяют получать равномерно высушенные пластины свеклы. За счет данных режимов происходит интенсивное испарение влаги с их поверхности. Нагрев пластин свеклы занимает меньшее время, чем из них удаляется влага. В результате этого полностью отсутствует перегрев, что гарантирует высокое качество готового продукта.

В будущем полученные результаты будут использованы для подбора рациональных ступенчатых режимов сушки пластин свеклы. В конечном итоге, будут получены равномерно высушенные пластины; интенсифицирован процесс испарения влаги в соответствие с основными кинетическими закономерностями за счет применения комбинированного теплоподвода к высушиваемым пластинам продукта; увеличить тепловую эффективность процесса; уменьшить энерго- и трудозатраты на изготовление сушеной свеклы благодаря использованию ступенчатых режимов комбинированной радиационно-конвективной сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сарафанова, Л. А. Современные пищевые ингредиенты. Особенности применения [Текст] / Л. А. Сарафанова. – СПб.: Профессия, 2009. – 208 с.

2. Калашников Г.В. Ресурсосберегающие технологии пищевых концентратов [Текст] / Г.В. Калашников, А.Н. Остриков. Воронеж: ВГУ, 2001.-355 с.

3. Желтоухова Е.Ю. Технологическая линия сушки свеклы [Текст] / Желтоухова Е.Ю., Черненко В.С., Ларин И.В // Материалы международная научно-техническая конференции, посвящённая 100-летию со дня рождения М.Х. Кишиневского / ФГБОУ ВО «ВГУИТ». – Воронеж, 2016 – с.494

УДК 536.24.12

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАЛЛА НА ИЗМЕНЕНИЕ СУММАРНОГО ОБЪЕМА ПОР И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОРИСТОЙ ГРАНУЛИРОВАННОЙ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ

THE EFFECT OF METAL CONCENTRATION ON THE CHANGES OF THE TOTAL PORE VOLUME AND THERMAL CONDUCTIVITY OF POROUS GRANULAR ALUMINUM OXIDE

Алимамад Гулмамадович Мирзомамадов*, Махмадали Махмадиевич Сафаров**
Абдукодир Неъматов*, Сунатулло Сабзаалиевич Абдуназаров***
Alimamad G. Mirzomamadov*, Mahmadali M. Safarov**
Abduqodir Nematov*, Sunatullo S. Abdunazarov***

**Таджикский государственный педагогический университет им. Садриддина Айни, Таджикистан, Душанбе*
**Tajik state pedagogical university named after Sadriddin Aini, Tajikistan, Dushanbe*
(e-mail: ptuh1985@mail.ru, nematov50@mail.ru)
***Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Душанбе, Таджикистан, Душанбе*
***Branch of Moscow state university named after M. V. Lomonosov in Dushanbe, Tajikistan, Dushanbe*
(e-mail: mahmad1@list.ru)
****Институт Энергетика Таджикистана в г. Курган-Тюбе, Таджикистан, Курган-Тюбе*
****Institute of power engineering of Tajikistan in Kurgan-Tyube, Tajikistan, Kurgan-Tyube*
(e-mail: Sunnat8060@mail.ru)

Аннотация: В данной работе приводятся результаты экспериментально - теоретического исследования коэффициента теплопроводности, суммарный объем пор образцов медных катализаторов на основе пористой гранулированной окиси алюминия цилиндрической формы при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Abstract: this paper describes the results of experimental and theoretical studies of thermal conductivity, the total pore volume of the samples of copper catalysts based on porous granular aluminum oxide cylindrical shape at room temperature and atmospheric pressure.

Ключевые слова: медные катализаторы, пористая гранулированная окись алюминия, коэффициент теплопроводности, суммарный объем пор.

Keywords: copper catalysts, porous granular aluminum oxide, thermal conductivity coefficient, the total pore volume.

Исследование теплофизических свойств технически важных композиционных материалов в твердой фазе в широком интервале температур и в различных паровых средах имеет большое научное и прикладное значение. Систематические исследования теплофизических свойств дают полезные сведения о природе материалов, позволяют определить практическое их использование, а также служат основой для дальнейшего развития физики твердого тела. Знание теплофизических параметров особенно важно при

конструировании промышленных тепловых установок самых разнообразных типов, а также для расчета кинетики исследуемых образцов.

В данной работе представлены экспериментальные значенияя теплопроводности пористой гранулированной окиси алюминия с медными наполнителями при комнатной температуре [1,2].

С ростом содержания металла теплопроводность пористой гранулированной окиси алюминия несколько возрастает. В процессе пропитки металл наносится на гранулу и вносится в ее поры в виде мелких кристаллических образований, разделенных друг от друга веществом гранулы. Естественно, заметное увеличение теплопроводности такие металлические вкрапления внести не могут. Однако, как показывает эксперимент, они все-таки приводят к незначительному увеличению эффективной теплопроводности засыпки гранул с ростом содержания металла.

Объяснить это можно отчасти тем, что при металлизации гранул происходит уменьшение объема пор. Действительно, согласно рис.1 с ростом процента металла на поверхности окиси алюминия происходит уменьшение объема пор гранул, причем объем пор гранул уменьшается по линейному закону.

Уменьшение пористости гранул приводит к росту теплопроводности засыпки, которая изменяется с увеличением процентного содержания металла также по линейному закону. Экспериментальные значения приведены на рис.2.

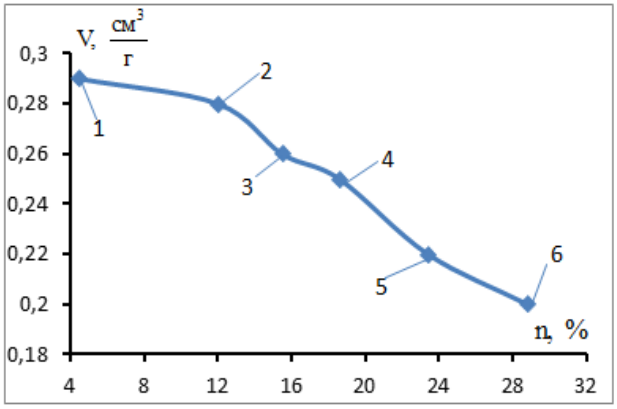


Рисунок 1. Зависимость суммарного объема пор пористой гранулированной окиси алюминия с медными наполнителями от концентрация меди: Al_2O_3+ 1 – (4,5 % Cu); 2 – (12 % Cu); 3 – (15,5 % Cu); 4 – (18,6 % Cu); 5 – (23,4 % Cu); 6 – (28,8 % Cu)

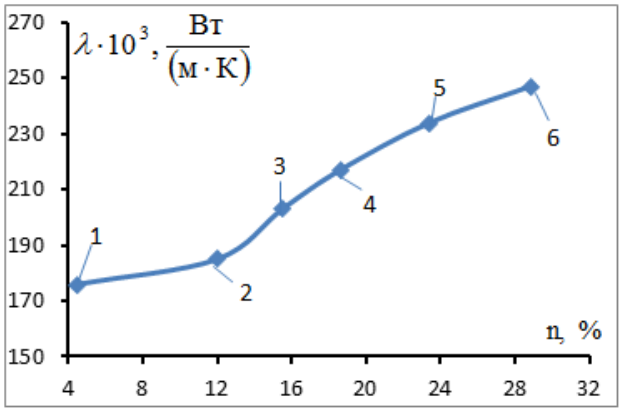


Рисунок 2. Зависимость теплопроводности пористой гранулированной окиси алюминия с медными наполнителями от концентрации меди: Al_2O_3+ 1 – (4,5 % Cu); 2 – (12 % Cu); 3 – (15,5 % Cu); 4 – (18,6 % Cu); 5 – (23,4 % Cu); 6 – (28,8 % Cu)

Как видно из рисунка 2, теплопроводность пористой гранулированной окиси алюминия увеличивается.

Изучение зависимости теплопроводности от пористости засыпки порошков в воздухе приводится в работе [3]. Согласно данным работы с уменьшением пористости теплопроводность засыпки порошков возрастает.

Наши исследования позволяют сделать вывод, что теплопроводность возрастает по линейному закону при уменьшении объема пор вследствие металлизации. Экспериментальные значения показаны на рис.3.

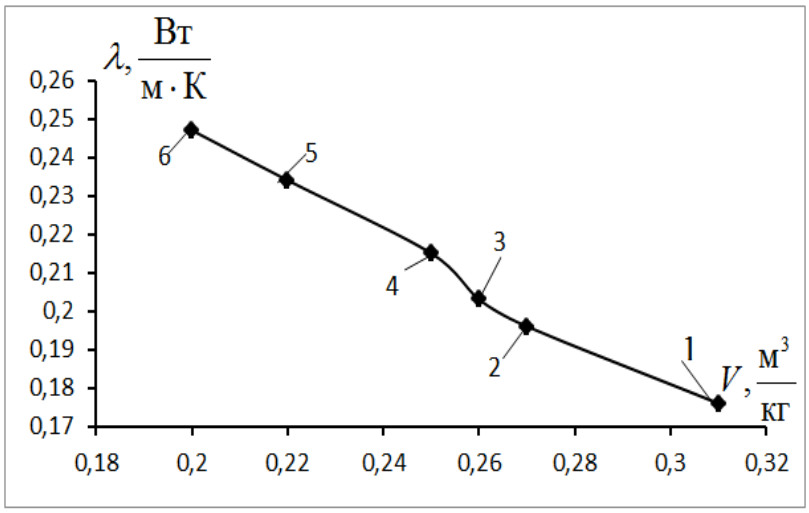


Рисунок 3. Зависимость теплопроводности пористой гранулированной окиси алюминия с медными наполнителями от суммарного объема пор: Al_2O_3+1 – (4,5 % Cu); 2 – (12 % Cu); 3 – (15,5 % Cu); 4 – (18,6 % Cu); 5 – (23,4 % Cu); 6 – (28,8 % Cu)

Однако, данные эксперимента позволяют сделать вывод, что кристаллы металла, обладающие большой теплопроводностью, вносят больший вклад в увеличение теплопроводности засыпки окиси алюминия, чем кристаллы соответствующего металла с меньшей теплопроводностью.

Таким образом, увеличение теплопроводности засыпки окиси алюминия после металлизации обусловлено не только изменением объема пор гранулы, но также зависит и от тепловых параметров металлического наполнителя, в частности от его теплопроводности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирзомамадов А.Г. Взаимосвязь между теплопроводностью и адсорбцией пористой гранулированной окиси алюминия с наполнителями никеля в процессе увлажнения / А.Г. Мирзомамадов, М.М.Сафаров, //Вестник Таджикского национального университета. – 2015. – №1/5 (188) – С. 89-93.

2. Мирзомамадов А.Г. Влияние влажности на изменение теплопроводности металлических катализаторов на основе пористой гранулированной окиси алюминия/ А.Г. Мирзомамадов, М.М. Сафаров [и др.]//Вестник Таджикского национального университета.– 2016. – №1/4 (216) – С.71-76.

3. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов./Г.Н.Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

УДК 66.047

ЗАДАЧА О НАГРЕВЕ ВОЛОКНА С УЧЕТОМ ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИХ ТЕПЛООБМЕН ФАКТОРОВ
THE PROBLEM OF HEATING A FIBER WITH THE ACCOUNT OF FACTORS THAT INTENSIFY HEAT TRANSFER

Галина Альбертовна Зуева, Галина Николаевна Кокурина, Андрей Алексеевич Балашов
Galina A. Zueva, Galina N. Kokurina, Andrej A. Balashov

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново
Ivanovo state University of Chemistry and Technology, Russia, Inanovo
(e-mail: zueva_galina15@mail.ru)

Аннотация: Проведено математическое моделирование динамики нагрева тела цилиндрической формы при граничном условии третьего рода, неравномерном начальном распределении температуры и внутренних источниках теплоты, порожденных импульсным нагружением и потоком лучистой энергии. Представлены результаты численного эксперимента, подтверждающие возможность использования модели для математического описания термообработки материала волокнистой структуры.

Abstract: A mathematical modeling of heating dynamics of a cylindrical body with a boundary condition of the third kind, an uneven initial temperature distribution and internal heat sources generated by an impulse loading and flow of radiant energy was carried out . The results of a numerical experiment confirming the possibility of using a model for the mathematical description of heat treatment of a fibrous material are given.

Ключевые слова: динамика нагрева, лучистая энергия, импульсное нагружение, цилиндрическое тело.

Keywords: heating dynamics, radiant energy, impulse loading, cylindrical body..

Нагрев волокон является одной из общих стадий технологий переработки волокнистых систем. Прочностные свойства, качество материала зависят от правильного выбора температурного режима обработки волокон. Перенос теплоты в волокне осуществляется теплопроводностью. Поэтому необходимы подробные сведения о переменных во времени температурных полях в волокнистом материале. В отделке волокнистых материалов иногда используется кратковременный, но интенсивный прогрев до определенной температуры, т.к. длительное нагревание волокна может привести к его повреждению. В связи с этим требуется построить математическую модель стадии нагрева волокнистого материала, пригодную, как для расчёта стадии прогрева волокна в процессах сушки, так и для расчета процесса нагрева материала в общем случае - с учетом интенсифицирующих теплообмен факторов, таких как внутренние источники теплоты, порожденные импульсным ударным нагружением материала и подводом лучистой энергии.

По форме волокно приводят, как правило, к эквивалентному цилиндру, приняв за основу равенство поверхностей. При математическом моделировании можно рассматривать отдельное волокно как неограниченный цилиндр. Следовательно, задача о прогреве отдельного волокна может быть формализована как задача о прогреве цилиндра. Таким образом, возникает необходимость решения задачи о теплопроводности неограниченного цилиндра при граничном условии третьего рода, неравномерном начальном распределении температуры и внутренних источниках теплоты, порожденных ударным нагружением и потоком лучистой энергии.

Выявим структуру нестационарного переноса теплоты в неограниченном цилиндре радиуса R (твердом, изотропном теле) с неравномерным начальным распределением температуры $f(r)$ $(0 < r < R)$. Цилиндр помещают в среду с переменной температурой $\theta(t)$.

Между поверхностью цилиндра и внешней средой происходит теплообмен по закону Ньютона. Осуществляется также лучистый теплообмен. Анализ природы внутренних источников теплоты при ударном нагружении твердых тел позволяет сделать вывод о возможности их аппроксимации с помощью импульсной δ - функции Дирака. Будем полагать, что в моменты нагружения t_i ($i=\overline{1,n}$) внутри цилиндра действуют импульсные источники теплоты удельной мощности A_i, распространенные по радиусу цилиндра равномерно.

Поглощение веществом цилиндрического тела лучистой энергии по закону Бугера [1] порождает в нем объемные источники теплоты

$$q(r) = \mu(1-\omega)E(0)\exp(-\mu(R-r)),$$

интенсивность которых уменьшается вдоль направления распространения излучения. Здесь r – текущий радиус цилиндра, м; $E(0)$ – плотность потока лучистой энергии, падающей на поверхность цилиндра, Дж/(м^2 ·с); μ – коэффициент ослабления; ω – коэффициент отражения.

Математическая формулировка задачи:

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T(r,t)}{\partial r}\right) + \frac{1}{c\gamma}\sum_{i=0}^{n} A_i\delta(t-t_i) + \\ + \frac{\mu}{c\gamma}(1-\omega)E(o)\exp(-\mu(R-r)),\ t>0,\ 0<r<R; \quad (1)$$

$$T(r,0) = f(r); \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial r} = 0;\ T(0,t) \neq \infty; \quad (3)$$

$$\lambda\frac{\partial T(R,t)}{\partial r} = \alpha\big(\theta(t) - T(R,t)\big). \quad (4)$$

Требуется найти $T(r,t)$, при $t>0,\ 0\le r\le R$.

Здесь $T(r,t)$ – поле температур цилиндра, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м^2 ·К), a – коэффициент температуропроводности, м^2/с; с – удельная массовая теплоемкость твердой фазы, Дж/(кг·К); γ – плотность, кг/м^3; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2 ·К); $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака.

Непосредственно, применив преобразование Лапласа, решить задачу (1) – (4) не удается в силу сложности выражений для плотностей тепловыделений, часть из которых зависит только от t, а часть только от r. Применили метод расчета нестационарного температурного поля тела цилиндрической формы при сформулированных выше условиях, воспользовавшись подходом, предложенным в [2]. Получили аналитическое решение задачи (1) - (4), позволяющее рассчитать температуру цилиндра в произвольной точке в любой момент времени. В случае, когда внутренние источники теплоты отсутствуют и температура среды постоянная, решение данной задачи совпадает с решением соответствующей задачи, которое представлено в известной монографии А.В. Лыкова [3].

С целью проведения численного эксперимента представленная модель была проанализирована в среде MathCAD. Исходные данные для расчета: R = 0,0007 м; θ1 = 293 К, θ = 333 К, α = 0,1 Вт/(м2•К), λ = 0,046 Вт/(м·К); $a = 0{,}1$ м^2/с; $E(0) = 5\times10^6$ Вт/м^3; $\mu = 0{,}1$; $\omega = 0{,}1$; $A_i = 10^5$ Вт/м^3 $(i = 1{,}2)$.

На рис. 1 представлены графики изменения температуры во времени ($\tau = at/R^2$) при комбинированном подводе энергии: 1- во внутреннем сечении цилиндра ($\xi = r/R = 0{,}5$) и 2 - на его поверхности ($\xi = r/R = 1$). На рисунке хорошо заметны скачки температуры в моменты удара при τ = 1, τ = 2, а так же разница между температурой внутри цилиндра и на его поверхности.

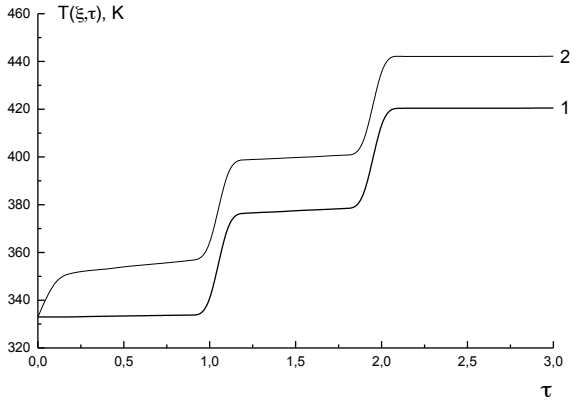


Рис. 1. Изменение температуры цилиндра $T(\xi,\tau)$ во времени с учетом импульсного нагружения и подвода лучистой энергии:
1 - внутри цилиндра ξ =0.5;
2 - на поверхности цилиндра ξ =1.

Как видно из рисунка, температура на поверхности цилиндра более высокая, по сравнению с температурой внутри него. Это можно объяснить тем, что в соответствии с законом Бугера мощность внутренних источников теплоты, порожденных подводом лучистой энергии, в приповерхностных слоях выше, чем во внутренних слоях материала, а мощность импульсных источников теплоты, вызванных импульсным нагружением, зависит только от времени.

Полученное решение задачи теплопроводности применительно к цилиндрическому телу при граничных условиях третьего рода, с учетом интенсифицирующих теплообмен факторов может быть использовано при построении математического описания термообработки волокнистых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шашков Л.Г.* Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его. М.: Энергоатомиздат, 1983.

2. *Петухов Б. С.* Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Издательство МЭИ, 2003.

3. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.

УДК 53.043:664

ИСКУССТВЕННЫЙ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС С ИНДУЦИРОВАННЫМ ТЕПЛОМАССООБМЕНОМ
THE ARTIFICIAL ENERGOTECHNOLOGICAL PROCESS WITH INDUCED HEAT AND MASS TRANSFER

Николай Иванович Погожих*, Андрей Олегович Пак*, Алина Владимировна Пак **
Nicolay I. Pogozhikh*, Andrey O. Pak*, Alina V. Pak**

**Харьковский государственный университет питания и торговли, Украина, Харьков*
**Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Ukraine, Kharkiv*
(e-mail: drpogozhikh@mail.ru, pak_andr@mail.ru)
***Харьковский торгово-экономический институт Киевского национального торгово-экономического университета, Украина, Харьков*
***Kharkiv Institute of Trade and Economics of Kyiv National University of Trade and Economics, Ukraine, Kharkiv*
(e-mail: pak_alya@mail.ru)

Аннотация: Обоснована перспективность поиска «искусственных» энерготехнологических процессов. Раскрыт феномен индуцированного тепломасообмена.

Abstract: The study justifies the importance of developing «artificial» energotechnological processes. The phenomenon of the “artificial” energotechnological process of induced heat and mass transfer is observed in a thermostat.

Ключевые слова: искусственный энерготехнологический процесс, термостат, обтюратор, эффект индуцированного тепломассообмена

Keywords: artificial energotechnological process, thermostat, obturator, the effect of induced heat and mass transfer

Интенсивное развитие отраслей промышленности, индустриализация стран мира привели к необходимости поиска научного обоснования решений проблем эффективного использования энергетических ресурсов при соблюдении растущих требований к экологичности производств. Внутри проблемы следует выделить так называемые энерготехнологические процессы [1], то есть такие искусственные действия человека, которые через определенные последовательности законов природы, приводят к конечному продукту за счет использования и/или преобразования одних видов энергии в другие. Необходимо отметить, что любые преобразования теплоты, являются необратимыми, то есть приводят к росту энтропии (беспорядка). Именно этот факт в основном и определяет экологичность энерготехнологических процессов, в которых протекают фазовые переходы вещества I рода [2]. При этом перспективным есть поиск «искусственных» энерготехнологических процессов, для которых хотя бы один или несколько параметров или свойств системы не имеют «сродства» с окружающей средой и принять равновесное значение могут только при преодолении некоторого энергетического активационного барьера – E_A. Например, технологии выращивания кристаллов [3], полупроводников [4], каталитические реакции [5] и т.п.

Особый интерес, в этом плане, представляет такой энерготехнологический процесс, как сушка. Атмосферное давление и температура, химический состав поверхности Земли и атмосферы обусловливают такое явление, как круговорот воды в природе [6], поэтому с технической точки зрения можно считать, что в условиях Земли высохнет (увлажниться, замерзнет) все, то есть для воды фазовые переходы I-рода, в условиях Земли, протекают произвольно, естественно. Исходя из этого, следует считать, что большинство способов сушки в промышленности – это интенсификация естественного процесса за счет создания определенных условий.

Одним из искусственных способов сушки есть способ сушки смешанным теплоподводом (СТП-сушка) [7]. СТП-сушка основана на создании условий для активного гидродинамического и теплового взаимодействия агента сушки с объектом сушки. «Искусственность» СТП-сушки заключается в том, что при соблюдении необходимых для реализации СТП-процесса условий между специальным теплообменным модулем с влажным сырьем и сушильным агентом происходит интенсивный массообмен [8]. Во время СТП-сушки используются такие понятия как «запуск» и «срыв» процесса. При этом управлять «запуском» и «срывом», а также характером процесса обезвоживания можно условно выделенными внешними и внутренними факторами [9]. Особенно важно то, что варьирование внешними и внутренними факторами дает возможность управлять удельными энергозатратами на процесс обезвоживания [10], интенсивностью тепломассообмена [11] и качеством получаемой продукции [12]. Исследования СТП-сушки, проводимые в настоящее время дают возможность утверждать, что СТП-процесс есть частный случай более общего процесса – процесса индуцированного тепломассообмена (далее ИнТМО) [13].

Актуальность исследования эффекта ИнТМО состоит в том, что возможности его использования значительно шире, чем использование только для обезвоживания. Таким образом, развитие научных основ данного процесса является актуальной задачей для выявления потенциальных возможностей его использования в производстве.

Наблюдение эффекта ИнТМО возможно в системе, состоящей из термостата с влажным коллоидным капиллярно-пористым телом (ККПТ) и паровоздушной смесью. Под термостатом понимается система, температура которой поддерживается постоянной за счет создания необходимых и достаточных условий для протекания процессов, результатом которых является поддержание постоянной температуры.

Таким образом, имеется термостат, стенки которого площадью S_t охватывают объем V_t. Температура стенки термостата T_t поддерживается постоянной. Внутри термостата находится жидкость объемом V_{liquid} и газ объемом V_{gas}, который является смесью воздуха и пара жидкости. Также может содержать твердое тело объемом V_{solid} нерастворимое или

частично растворимое в жидкости, проявляющее или нет лиофильную активность, имеющее или нет определенную структуру (строение). Давление в термостате постоянное и равно атмосферному p. С атмосферой (окружающей средой любой температуры) термостат сообщается через некоторый обтюратор, который имеет объем значительно меньший объема термостата $V_{obt} << V_t$ и площадь (отверстие в термостате) значительно меньшую площади поверхности термостата $S_{obt} << S_t$.

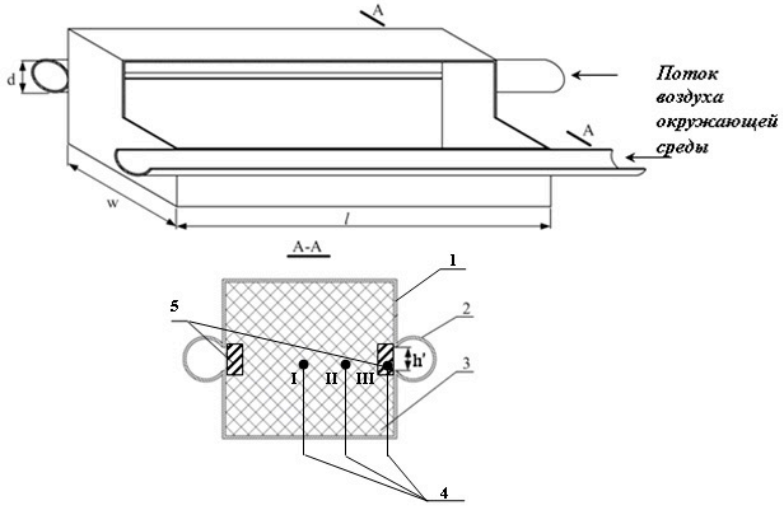


Рис. 1. Установка для наблюдения эффекта ИнТМО с характерными размерами, мм: l=100; w=20; d=10; h=1

Для наблюдения эффекта ИнТМО используется установка представленная на рис. 1. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – термостат; 2 – трубки, через которые продувается поток воздуха окружающей среды; 3 – тело, состоящее из трех фаз: газообразной, жидкой и твердой; 4 – термопары; 5 – обтюраторы.

Судить о «запуске» процесса ИнТМО можно по кинетике температуры в различных точках внутри термостата, которую получают регистрацией сигнала от термопар. Термограммы, получаемые при этом, представлены на рис. 2.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Внутрь термостата размещают тело, состоящее из твердой, жидкой и газообразной фаз. Через определенное время температура тела внутри термостата примет значение равное его равновесной температуре, т.е. температуре стенки термостата. Далее через трубки, изображенные на рис. 1, продувается воздух окружающей среды с такой скоростью, что в результате турбулентного режима течения создается флуктуация поперечной составляющей скорости потока воздуха. Процесс ИнТМО «запускается». На термограмме «запуску» процесса соответствует падение температуры, отделенное пунктирной линией на рис. 2. После удаления жидкой фазы внутри термостата (минимум кинетики температуры), температура тела начинает приближаться к равновесной температуре термостата.

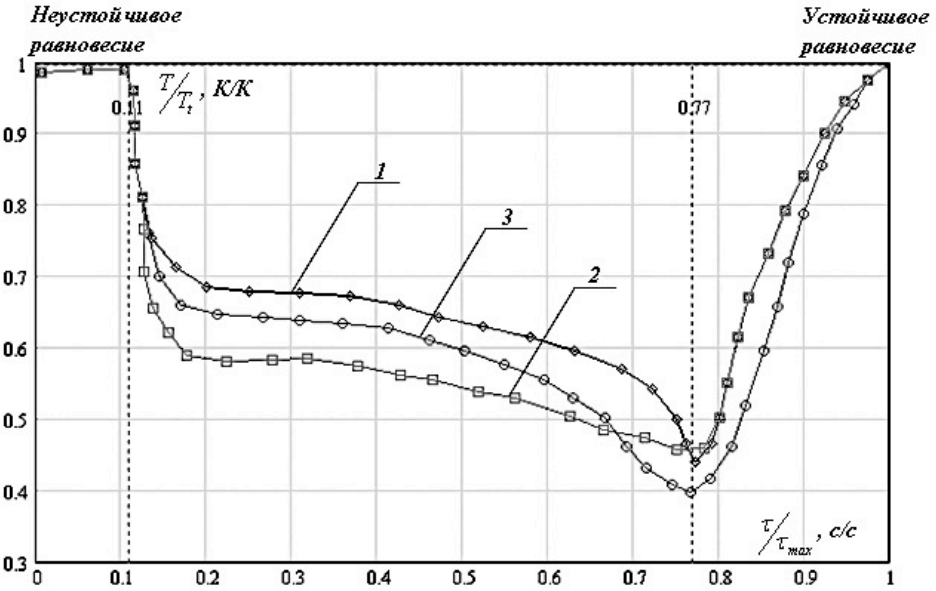


Рис. 2. Кинетика температуры тела в процессе ИнТМО, полученная от термопар: 1 – I; 2 – II; 3 – III

Во время процесса ИнТМО имеют место два равновесных состояния:

1. температура всех частей динамической системы асимптотически стремится к общей равновесной температуре, при этом практически отсутствует массообмен с окружающей средой – неустойчивое равновесие;

2. температура всех частей динамической системы равна равновесной температуре, при этом жидкая фаза внутри термостата отсутствует – устойчивое равновесие.

Сам же эффект ИнТМО заключается в удалении жидкой фазы из объема термостата при движении системы от неустойчивого равновесия к устойчивому (рис. 3).

Паровоздушную среду (газовую смесь) внутри термостата в процессе ИнТМО следует считать сплошной. Интегрально внутри термостата может находиться три фазы – твердая, жидкая и газообразная, которые находятся между собой в равновесии. Сплошная газовая среда образуется из-за того, что стенки термостата выполнены из паронепроницаемого материала, а массообмен с окружающей средой возможен только через обтюратор, площадь которого, по крайней мере, на порядок меньше площади поверхности термостата, через которую может осуществляться теплообмен. Отклонение любого параметра от равновесного значения заставляет сплошную среду противодействовать его изменению. То есть, если по каким-либо причинам, произойдет изменение равновесного содержания паров воды в паровоздушной смеси внутри термостата, это вызовет изменение количества, состава и распределения жидкой воды за счет ее перехода из жидкого состояния в газообразное путем диффузии пара в сплошную газовую среду.

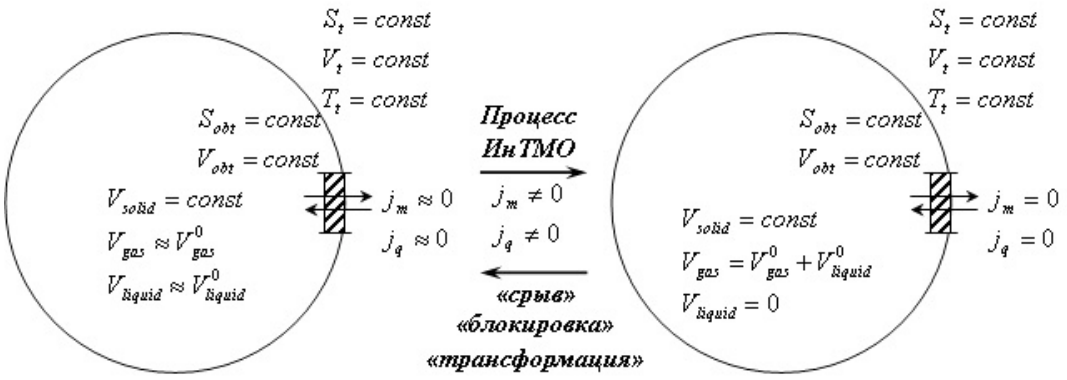


Рис.3. Движение системы от неустойчивого равновесия к устойчивому

Таким образом, поскольку сплошная газовая среда находится внутри термостата, то парциальное давление паров жидкости в среде равно давлению насыщенных паров жидкости при данной температуре. Эффект ИнТМО возможно наблюдать, если создать флуктуацию, например, концентрации частиц жидкости в сплошной газовой среде внутри термостата, путем выноса части сплошной газовой среды через обтюратор. На такую флуктуацию система «среагирует» восстановлением парциального давления паров жидкости до уровня насыщенных паров за счет перехода жидкой фазы в газообразную. Результатом описываемого процесса есть удаление жидкой фазы из термостата, а, именно – эффект ИнТМО.

Таким образом, описан феномен «искусственного» энерготехнологического процесса – ИнТМО, который наблюдается в термостате и заключается в индуцировании интенсивного удаления жидкой фазы из объема термостата и интенсивного рассеяния теплоты при движении системы от неустойчивого равновесия к устойчивому.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энерготехнологические процессы. Проблемы и перспективы. / Под редакцией д-ра техн. наук Л.В. Лысенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 190 с.

2. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. Т. 1: Теория равновесных систем: Термодинамика. М.: Едиториал УРСС, 2002. 240 с.

3. Steurer W. Twenty years of structure research on quasicrystals. Part I. Pentagonal, octagonal, decagonal and dodecagonal quasicrystals // Z. Kristallogr. 2004. P. 391–446.

4. Yacobi B.G. Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles // Springer. 2003. P. 1–3.

5. Matthiesen J., Wendt S., Hansen J., Madsen GK., Lira E., Galliker P., Vestergaard EK., Schaub R., Laegsgaard E., Hammer B., Besenbacher F. Observation of All the Intermediate Steps of a Chemical Reaction on an Oxide Surface by Scanning Tunneling Microscopy // ACS Nano. 2009. V 3 (3). P. 517–526 (doi:10.1021/nn8008245)

6. Dooge James C.I. Concepts of the hydrological Cycle. Ancient and modern // International Symposium OH_2 «Origins and History of Hydrology», Dijon, May, 9-11, 2001/ P. 1-10

7. Погожих Н. И., Потапов В. А., Цуркан Н. М. Способ сушки пищевых продуктов. Пат. 2096962 РФ // МКИ А23 В7/03. 1995. Бюл. №40. 3 с.

8. Погожих М.І., Пак А.О., Жеребкін М.В. Внутрішні чинники процесу гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2011. № 5/3 (53). С. 60–63.

9. Погожих М.І., Пак А.О., Жеребкін М.В. Функція розподілення потужності дисипативних структур всередині ФЄ під час ЗТП-сушіння // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2012. № 2/12 (56). С. 59–63.

10. Потапов В.О., Гриценко О.Ю. Аналіз енергоефективності процесу сушіння в тепломасообмінному модулі за умови підвищеного тиску // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. 2014. Вип. 1(19). С.133–141.

11. Погожих М.І., Пак А.О., Цуркан М.М. Сушіння плодово-ягідної сировини способом змішаного теплопідводу зі штучним пороутворенням : монографія. Харків : ХДУХТ, 2009. 102 с.

12. Потапов В.А., Якушенко Е.Н., Жеребкин М.В. Анализ способов сушки и оценка качества сушеной виноградной выжимки // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2013. № 6/11 (66). С. 38–41.

13. Pogozhikh M., Pak A. The development of an artificial energotechnological process with the induced heat and mass transfer // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. №.1/8 (85). P. 50–58. (doi: 10.15587/1729-4061.2017.91748)

УДК 66.011

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА НАГРЕВА СМЕСИ В РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ
CHOICE OF THE OPTIMAL VARIANT OF HEATING THE MIXTURE IN A DISTILLATION COLUMN

Михаил Константинович Захаров, Анастасия Анатольевна Бойчук
Mikhail K. Zakharov, Anastasia A. Boychuk

Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий), Россия, Москва
Moscow Technological University (Institute of Fine Chemical Technologies), Russia, Moscow
(e-mail:mkzakharov@gmail.com, boychuk.nastena@mail.ru)

Аннотация: Получены формулы для расчета внутреннего энергосбережения при различных вариантах нагрева исходной смеси паровым потоком в укрепляющей части ректификационной колонны. Учитывая анализ внутреннего энергосбережения и затрат теплоты, предложен оптимальный вариант проведения процесса.

Abstract: Formulas for internal energy saving's calculation in case of initial mixture heating by a steam flow in the rectification column were obtained. Accounting the internal energy saving and heat duty, the optimal variant of the process was suggested.

Ключевые слова: ректификация, внутреннее энергосбережение при ректификации, флегмовое число, затраты теплоты.

Keywords: distillation, internal energy saving in distillation, reflux ratio, heat duty.

Разделение жидких смесей методом ректификации относится к одному из самых энергоемких процессов химической технологии. Поиску способов организации процессов ректификации с наименьшими затратами теплоты посвящено много научных публикаций [1-9]. Одним из таких способов является подача в колонну исходной смеси без предварительного нагрева ее в теплообменнике [8].

Внутреннее энергосбережение при разных энергетических уровнях подаваемой на тарелку питания смеси рассчитывается по предложенной в [4] формуле:

$$\text{Эн} = \frac{\frac{R}{R+1}n^y + [1 + \frac{E-1}{R+1} \cdot \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0}]n_0}{n^y + n_0}, \quad (1)$$

R – флегмовое число, E – удельный расход парового потока в колонне для нагрева исходной смеси до температуры кипения, n^y, n^o - число теоретических тарелок в укрепляющей и отгонной частях колоны, x_1, x_2, x_0 - составы исходной смеси и продуктов разделения.

Под внутренним энергосбережением Эн следует понимать многократную «работу» (конденсацию) пара на тарелках ректификационной колонны, иными словами – коэффициент использования парового потока.

В данной работе выполнен поиск оптимального варианта нагрева исходной смеси за счет парового потока в колонне. Для этого будем сравнивать четыре варианта нагрева исходной смеси. Кроме двух вариантов подачи в колонну исходной смеси: традиционный (схема «а» на рис.1) и вариант подачи в колонну исходной смеси без подогрева (схема «б») [8] найдены суммарные затраты теплоты в двух новых вариантах нагрева исходной смеси (схемы «в» и «г»). В варианте схемы «в» исходная смесь нагревается паром, отводимым из укрепляющей части колонны с возвратом конденсата обратно в колонну, или, что тоже самое, введением в колонну теплообменника (поверхность теплообмена $F_п$) с целью нагрева исходной смеси от t_x до t'. Температура нагрева исходной смеси t' в этом случае несколько ниже t_1 из-за уменьшения температуры к верху колонны. В четвертом варианте (схема «г») нагревание исходной смеси осуществляется паровым потоком с самой верхней тарелки

колонны. Поскольку температура пара вверху колонны минимальна, то конечная температура исходной смеси t'' на выходе из подогревателя меньше t' (схема «в»).

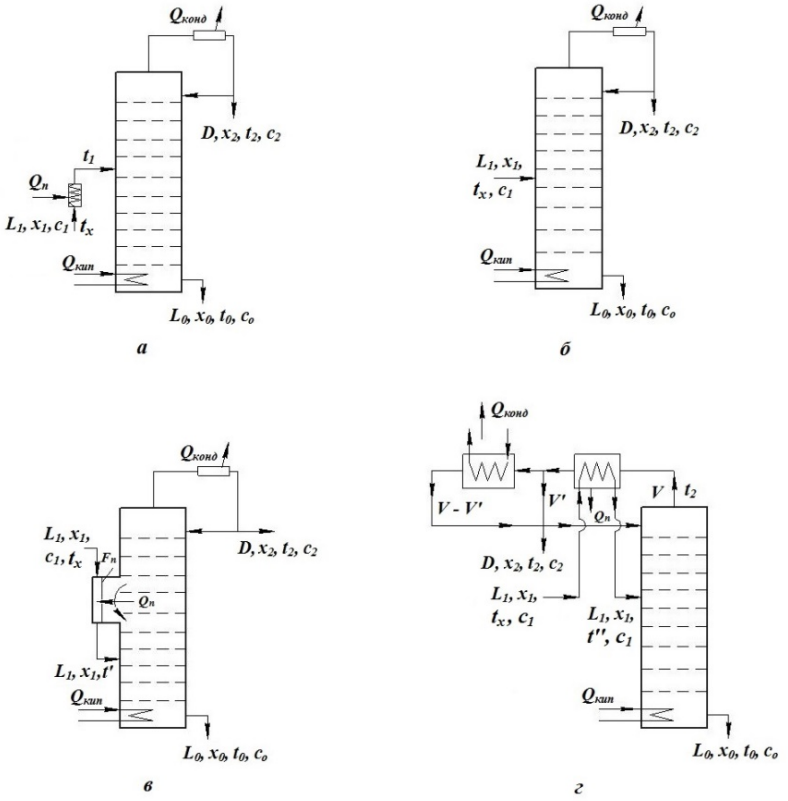


Рис.1. Различные варианты нагрева исходной смеси перед подачей в колонну

Подробно рассмотрим затраты теплоты в кипятильнике и внутреннее энергосбережение в ректификационной колонне с нагреванием исходной смеси от $t_{\text{х}}$ до t' паровым потоком в середине укрепляющей части колонны.

Схема работы такой ректификационной колонны представлена на рис. 2. Нагрев исходной смеси от $t_{\text{х}}$ до t' происходит за счет конденсации части парового потока и увеличения потока жидкости по колонне за счет образовавшегося конденсата. Укрепляющую часть колонны разделим на 2 секции с числом тарелок n_1^y(вверху) и n_2^y (внизу – до тарелки питания). При допущении $r_A = r_B = r$ поток флегмы в первой секции постоянен и равен $L = R \cdot D$, где D – поток дистиллята.

Определим величины потоков пара и жидкости во второй (средней) секции колонны. За счет отвода теплоты на подогрев исходной смеси L_1 теплоемкостью c_1 от температуры $t_{\text{х}}$ до t' в количестве

$$Q_{\text{п}} = L_1 c_1 (t' - t_{\text{х}}) \tag{2}$$

часть парового потока V_2, а именно

$$\Delta V_2 = V_2 - V = \frac{L_1 c_1 (t' - t_{\text{х}})}{r} \tag{3}$$

конденсируется. Поток образующегося конденсата $\Delta L_2 = \Delta V_2$ вместе с потоком флегмы из первой секции L образует жидкостной поток во второй секции

$$L_2 = L + \Delta L_2.$$

Из (3) следует, что

$$V_2 = V + \frac{L_1 c_1 (t' - t_{\text{х}})}{r} = V + L_1 (E_2 - 1), \tag{4}$$

где $E_2 - 1$ – поток пара в кмоль для нагрева 1 кмоль исходной смеси от температуры $t_{\text{х}}$ до t', r - теплота парообразования.

Соответственно

$$L_2 = L + L_1 (E_2 - 1) \tag{5}$$

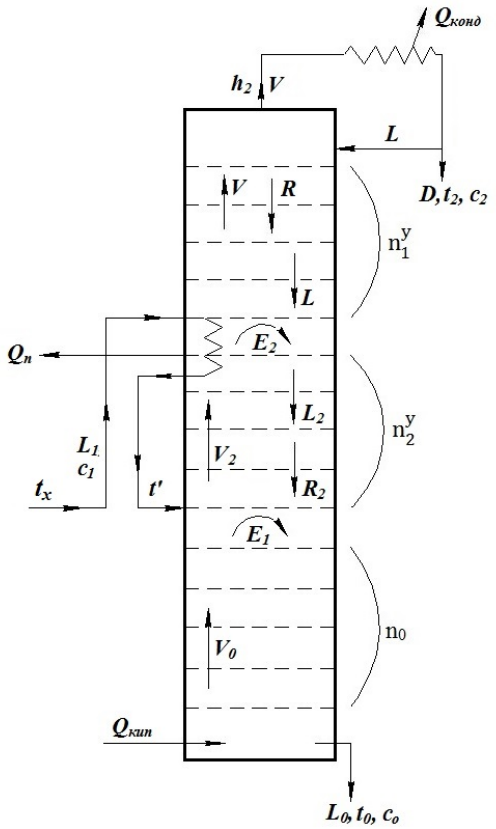


Рис.2. Потоки жидкости и пара по колонне.

С допущением равенства теплот парообразования компонентов смеси из отношения L_2/V_2, определяющего тангенс угла наклона рабочей линии, можно найти флегмовое число R_2 в этой секции, причем $R_2 > R_1$.

На тарелке питания исходная смесь L_1 нагревается от t' до t_1 за счет конденсации парового потока в количестве

$$\Delta V_1 = V_0 - V_2 = \frac{L_1 c_1 (t_1 - t')}{r}, \qquad (6)$$

где V_0 – поток пара в отгонной части колонны.

Аналогично выражению (4), получаем $V_0 = V_2 + L_1(E_1 - 1)$.

Из $E_1 - 1 = \frac{c_1(t_1 - t')}{r}$ и $E_2 - 1 = \frac{c_1(t' - t_x)}{r}$ следует, что $V_0 = V + L_1(E - 1)$,

где $E - 1 = \frac{c_1(t_1 - t_x)}{r}$.

По аналогии с расчетом внутреннего энергосбережения [4] при разных энергетических уровнях подаваемой на тарелку питания смеси в рассматриваемом варианте работы ректификационной колонны внутреннее энергосбережение (среднее по всей колонне) можно рассчитать по формуле

$$\text{Эн} = \frac{\frac{R}{R+1} n_1^y + \frac{R_2}{R_2+1} n_2^y + [1 + \frac{E-1}{R+1} \cdot \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0}] n^0}{n_1^y + n_2^y + n^0} \qquad (7)$$

Затраты теплоты в кипятильнике $Q_{\text{кип}}$ можно определить из теплового баланса колонны на рис.2.

$$Q_{\text{кип}} + L_1 c_1 t' - Q_{\text{п}} - Q_{\text{конд}} - D c_2 t_2 - L_0 c_0 t_0 = 0$$

При допущении равенства энтальпий исходной смеси и продуктов разделения, имеем

$$Q_{\text{кип}} = D(R+1)r + L_1 c_1 (t_1 - t_{\text{x}}) \qquad (8)$$

Формула (8) аналогична полученной ранее обобщенной формуле [8].

Поскольку флегмовое число R для схемы «в» на рис. 1 минимально, то этот вариант нагрева исходной смеси является наименее затратным. Внутреннее энергосбережение при этом максимально. Чем выше в колонне будет производиться нагрев исходной смеси, тем больше будет внутреннее энергосбережение за счет большего потока флегмы на большем числе тарелок в укрепляющей части колонны.

Эти выводы подтверждены сравнительным расчетом суммарных затрат теплоты при различных способах нагрева исходной смеси. Расчет выполнен [9] с помощью программного обеспечения HYSYS 3.2. В таблице 1 приведены результаты расчета при разделении 0,01 кмоль/с бинарной смеси бензол-толуол эквимолярного состава с получением продуктов разделения 98% мол. чистоты.

Из таблицы 1 видно, что наибольшие суммарные затраты теплоты имеют место в традиционном варианте (схема «а»). Это объясняется отсутствием какого-либо энергосбережения в отдельном подогревателе исходной смеси. Затраченный в нем пар далее уходит в виде конденсата. Он «не работает» в отличие от пара, движущегося по колонне. Меньшие затраты теплоты по схемам «б» и «в» связаны с большим внутренним

энергосбережением в колонне за счет увеличенного парового потока в отгонной и, частично, в укрепляющей секции – ведь часть его идет на нагревание исходной смеси. А до места нагрева «работает» больший паровой поток, чем в традиционном варианте.

Таблица 1. Затраты теплоты и внутреннее энергосбережение в колонне

Величина	Схема «а»	Схема «б»	Схема «в»	Схема «г»
Температура смеси на входе в колонну, ^{O}C	92,3	20	80	75,6
Суммарные затраты, кВт	532,2	483	481	444
Флегмовое число *R*	1,69	1,35	1,33	1.66
Число теоретических тарелок	18	18	18	18
Внутреннее энергосбережение	0,814	0,932	0,941	0,847

При нагревании исходной смеси паровым потоком с верхней тарелки колонны (или, что тоже самое, после выхода паров из колонны) суммарные затраты теплоты минимальны (схема «г»). Заметим, однако, что это уже не внутреннее, а внешнее энергосбережение (даже если теплообменник находится в самой колонне). Таким образом, внутреннее энергосбережение здесь немного больше, чем в традиционном варианте (0,847>0,814) из-за подачи в колонну недогретой до кипения исходной смеси, а уменьшение затрат теплоты до 444 кВт связано с рекуперацией теплоты выходящего из колонны парового потока. Безусловная выгода такой рекуперации заключается в том, что этот паровой поток хорошо (многократно) «отработал» в колонне.

Заключение. Выбор варианта проведения процесса ректификации связан непосредственно с комплексным анализом затрат теплоты и созданием условий для хорошего внутреннего энергосбережения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Halvorsen I.J., Skogestad S.* Energy efficient distillation // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2011. V.3. P. 571.

2. Koeijer G., Rosjorde A., Kjelstrup S., Distribution oh heat exchange in optimum diabatic distillation columns // Elseviers, Energy. 2004. V. 29. P. 2425

3. *Захаров М.К., Носов Г.А., Писаренко Ю.А., Жильцова Л.М., Швец А.А.* О целесообразности распределённого подвода теплоты по высоте ректификационных колонн // ТОХТ. 2017. Т. 51. № 4.

4. *Захаров М.К.* Энергетическая эффективность процесса ректификации // Тонкие химические технологии, 2015. Т. 10. №1. С. 29.

5. *Платонов В.М., Берго Б.Г.* Разделение многокомпонентных смесей. М.: Химия, 1965, 368с.

6. *Kim Y.H.* Design and control of energy-efficient distillation columns. // Korea J. Chem. Eng. 2016. V. 33. P. 2513.

7. *Sun L., Li J., Liu X.* Research on configurations of thermally integrated distillation column (TIDC). // Advanced Research on Electronic Commerce, Web Application, and Communication, 2011. V. 143. P. 335.

8. *Захаров М.К., Аббаси М.* Сравнение затрат теплоты на ректификацию при различных состояниях исходной бинарной смеси // Вестник МИТХТ. 2012. Т. 7. № 1. С. 41.

9. *Захаров М.К., Довбиш А.А.* Об энергосбережении при ректификации за счет нагревания исходной смеси паром в верхней части колонны // Материалы Международной научно-методической конференции «Химия и экология. Наука и образование». Москва: изд. МГОУ. 2010. С. 150.

УДК 66.021.3

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ В СИСТЕМЕ «ТКАНЬ – ЖИДКОСТЬ»
ANALYTICAL ASSESSMENT OF EFFECTIVENESS FOR PROCESS OF EXTRACTION IN SYSTEM "FABRIC – LIQUID

Александр Павлович Булеков
Alexander P. Bulekov

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

Аннотация: Представлена математическая модель и полученные на её основе расчетные соотношения для оценки эффективности процесса экстракции целевого компонента из тонкой пластины.

Abstract: At this article is presented the mathematical model and received on its basis rations for assessments of effectiveness for process of extraction a target component from a thin plate.

Ключевые слова: Экстракция, краевая задача, преобразование Лапласа массоперенос.
Keywords: Extraction, Laplace transformation mass transfer.

В текстильной технологии широко распространены процессы экстрагирования целевых компонентов (красителя, модификатора, моющих и жировых веществ) из плоских волоконных материалов (тканей) [1]. Повышение эффективности работы оборудования, предназначенного для реализации этих процессов, неразрывно связано с разработкой соответствующего их математического описания. Известные математические модели, используемые в текстильной технологии для этих целей, базируется на теории диффузных процессов [2] и, как правило, не учитывают особенности гидродинамической обстановки в рабочем объёме аппарата.

Цель данной работы состояла в определении и анализе процесса экстракции из тонкой пластины с учетом гидродинамической обстановки в установках, используемых в отделочном производстве для удаления технических загрязнений из ткани.

В соответствии с вышеизложенными выше условиями рассматриваемая задача формулируется следующий образом. В аппарат непрерывного действия, рабочий объем которого заполнен экстрагентом массой m (кг.), поступает плоская, толщиной 2δ (м) пластина с концентрацией извлекаемого компонента C_0 (кг/кг). Производительность по обрабатываемому материалу составляет G (кг/с). Одновременно в аппарат вводится экстрагент с концентрацией распределяемого компонента u_o (кг/кг) и расходом L (кг/с). Кинетические коэффициенты процесса (коэффициент диффузии v ($м^2$/с) и массоотдачи D (м/с)) принимаются постоянными.

Математическая модель рассматриваемого процесса включает в себя уравнение материального баланса по распределяемому компоненту и краевую задачу для одномерного уравнения диффузии в тонкой пластине, интерпретирующей полотно ткани. Указанные уравнения имеют вид:

$$G\left(C_0 - C(\tau\right) = L\left(u(\tau\right) - u_0\right) + m\frac{du(\tau)}{d\tau} \tag{1}$$

$$\frac{\partial C(x,\tau)}{\partial \tau} = D\frac{\partial^2 C(x,\tau)}{\partial x^2} \tag{2}$$

$$\overline{C}(\tau) = \frac{1}{\delta}\int_0^{\delta} C(x,\tau)dx \tag{3}$$

$$C(x,0) = \overline{C}(0) = C_0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial C(0,\tau)}{\partial x} = 0 \quad \tau\rangle 0 \tag{5}$$

$$-D\frac{\partial C(\delta,\tau)}{\partial x} = \beta(u_{\Pi}(\tau) - u(\tau)) \tag{6}$$

Для получения результатов, адекватных для целого класса подобных явлений введены безразмерные комплексы и критерии по формулам.

$$\eta = \frac{x}{\delta}\ ;\ q = \frac{L}{G}\ ;\ g = \frac{mD}{G\delta^2}\ ;\ F_0 = \frac{D}{\delta^2}\tau\ ; Bi_m = \frac{\beta\delta}{A_p D} = \frac{\beta^*\delta}{D}$$

В новых переменных и при условии достижения равновесия на границе разделе фаз, описываемого линейной зависимостью с коэффициентом пропорциональности $A_{p,}$ уравнения (1) – (2) принимают вид:

$$C_0 - \overline{C}(F_0) = q(u(F_0) - u_0) + g\frac{du}{dF_0} \tag{7}$$

$$\frac{\partial c(\eta,F_0)}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 c(\eta,F_0)}{\partial \eta^2} \tag{8}$$

Учитывая неоднородность и нестационарность граничного условия (6), для решения рассматриваемой краевой задачи использован метод интегральных преобразований (3). В соответствии с ним изображения функций-оригиналов C (η, F_0) и U (F_0) обозначены через $Y(\eta, \rho)$ и Z (P) соответственно. В принятых обозначениях рассматриваемая задача в пространстве изображений включает следующие операторные уравнения:

$$\frac{\varepsilon_0}{p} - \int_0^1 \mathrm{Y}(\eta_I p)d\eta = q(\mathrm{Z}(p) - \frac{u_0}{p}) + g(pZ(p) - u_0) \tag{9}$$

$$\overline{C}(F_0) = \int_0^1 C(\eta,F_0)d\eta \tag{10}$$

$$pY(\eta,p) - C_0 = \frac{\partial Y(\eta,p)}{\partial \eta^2} \tag{11}$$

$$C(\eta,0) = \overline{C}(O) = C_0 \tag{12}$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta}Y(0,p) = 0 \tag{13}$$

$$\frac{\partial C(0,F_0)}{\partial \eta} = 0 \tag{14}$$

$$\frac{\partial Y(1_I F_0)}{\partial \eta} = \mathrm{B}i_m(Z(p) - Y(1_I p)) \tag{15}$$

Операторное уравнение (11) описывающие кинетику процесса диффузии в пространстве изображений является (по переменной η) линейным неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Общее решение уравнения (11) можно представить в виде:

$$x(\eta_I p) = C_1 e^{-\sqrt{p\eta}} + C_2 e^{\sqrt{p\eta}} + \frac{c_0}{p} \tag{16}$$

Граничное условие (15) позволяет выявить связь произвольных постоянных C_1 и C_2 и преобразовать общее решение (16) к виду:

$$Y(\eta_I p) = Ach(\sqrt{P\eta}) + \frac{C_0}{p}, \tag{17}$$

где $C_1 = C_2 = 2A$

Значение произвольной постоянной А определяется уравнениями (9) и (15). Выразить функцию Z(P) через Y(η, ρ) с помощью уравнения (15) и подставив полученное выражение в граничное условие (15) получим, после стандартных алгебраических преобразований:

$$Z(p) = \frac{\frac{1}{p}C_0 + (\frac{q}{p} + \partial\ell)C_p - \int_0^1 Y(\eta_I p)d\eta}{(gp+q)}, \tag{18}$$

$$Y(\eta_I p) - \frac{C_0}{p} = \frac{(C_p - C_0)qBi_m ch(\sqrt{p\eta})}{\sqrt{p}\left[(qp + Bi_m)gh\sqrt{p} + \sqrt{p}qBi_m ch\sqrt{p}\right]} \tag{19}$$

Изображение целевой функции С (η, F_0) после разложения гиперболических функций в степенные ряды представляет собой дробно-рациональную функцию. Тем самым восстановление оригинала целевой функции связано с разложением выражения (18) на простые дроби. Последнее вызывает необходимость решения трансцендентного уравнения:

$$th\sqrt{p} = \frac{\sqrt{p}qBi_m}{(gp+q)P + Bi_m} \tag{20}$$

Уравнение (20) имеет бесконечное множество корней $P_к$.

В соответствии с теорией операционного исчисления [3] функция – оригинал С (η, F_0) имеет вид:

$$C(\eta_I F_0) - C_0 = (C_p - C_0)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{P_m(P_k)}{Q_n^1(P_k)}\exp(P_k F_0) \tag{21}$$

В естественных переменных решение рассматриваемой задачи аппроксимируется рядом:

$$\frac{C_p - C(x_I\tau)}{C_U - C_p} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos\mu_k \frac{x}{\delta} * \exp(-\mu^2\frac{\varpi}{\delta^2}\tau) \tag{22}$$

Коэффициенты ряда вычисляются по формуле:

$$A_k = \frac{p_m(P_k)}{Q_n{}^I(PC_2)} \tag{23}$$

Комплексные параметры $P_к$ и $\mu_к$ связаны с соотношением:

$$\iota\sqrt{P} = \mu \tag{24}$$

Полученные расчетные соотношения (18), (21), (22) позволяют получить не только количественную оценку эффективности процесса экстракции, т.е. конечную концентрацию извлечённого из пластины компонента, но также исследовать влияние расхода экстратента, соотношение расходов взаимодействующих фаз, толщины пластины и других параметров процесса на распределение концентрации целевого компонента по толщине пластины. Интегрирование уравнения (22) по пространственной координате позволяет получить оценку средней концентрации целевого компонента в любой момент времени. Именно этот показатель используется для контроля процесса. Наличие соотношения (18) для изображения функции, определяющей временную зависимость концентрации распределяемого компонента в экстрагенте, позволяет проводить оценку экологической чистоты используемого оборудования. Результаты работы, учитывая представление их в виде зависимостей между обобщенными переменными, могут быть использованы при анализе и расчете процессов экстракции в различных отраслях промышленного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошелева М.К., Булеков А.П. Интенсификация процессов промывки // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2012, №2, с.113-117
2. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: Колос, 2010
3. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению/ М.: Высшая школа, 1965

УДК 677.017.

ТЕПЛОВОЙ ПЕРЕНОС В ЛЕГКИХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ
HEAT TRANSFER IN LIGHTWEIGHT HEAT-PROTECTION MATERIALS

Евгений Юрьевич Шампаров, Инна Николаевна Жагрина, Сергей Витальевич Родэ
Eugene Yu. Shamparov, Inna N. Jagrina, Sergey V. Rode

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Москва
A. N. Kosygin Russian state University, Moscow
(e-mail: shamparov@bk.ru, jagrina@mail.ru)

Аннотация: Проведены экспериментальные исследования радиационно-кондуктивного переноса тепла в нетканом утепляющем материале. Получены значения и доли кондукционной и лучистой составляющей тепловой проводимости материала в зависимости от толщины, до которой он сжат.

Abstract: Experimental studies of radiative-conductive heat transfer of nonwoven warming fabrics are performed. Values and parts of radiative and conductive components of heat conductivity of material depending on the thickness to which it is compressed are obtained.

Ключевые слова: теплопроводность, тепловое излучение, нетканые утепляющие материалы.

Keywords: the heat conductivity, thermal radiation, nonwoven fabrics warming materials.

Исследованию свойств утепляющих материалов посвящено большое количество работ. Казалось бы, о них уже должны были сложиться единые представления. Однако до сих пор это не так. Нам представляется, что для такого состояния дел есть, по крайней мере, сразу три причины: сложность и многогранность наблюдаемых явлений, катастрофически слабая экспериментальная база и отсутствие системного подхода. С последними двумя в этой работе мы постарались справиться.

Есть три механизма тепловой передачи: теплопроводность, тепловое излучение и конвекция. Первые два часто рассматривают как единое целое, что для исследуемого класса материалов в корне неверно. Перенос тепла посредством макроскопического движения вещества, именуемый конвекцией, непосредственно связан с геометрией системы и определяется не теплозащитными характеристиками, а механической вязкостью среды. Наличие конвекции сильно усложняет протекание процессов теплопередачи, но мало что говорит о теплозащитных свойствах материалов. Поэтому для получения базовых собственных характеристик материалов мы постарались исключить конвективный перенос из процесса тепловой передачи. Нами сконструирована установка для бесконвекционных измерений тепловой проницаемости материалов [1] и проведен ряд исследований [2, 3]. В этой работе тоже пойдет речь о радиационно-кондуктивной передаче тепла.

Современный утепляющий материал представляет собой некоторую структуру, которая занимает всего около 1% от объема материала, а остальные 99% занимает воздух. Поэтому понимание свойств материалов начинается с представлений о свойствах воздуха. Он обладает малой теплопроводностью (0.0272 Вт/(м·К) при средней температуре наших измерений 313 К), которая корневым образом слабо зависит от температуры. В то же время

для наших задач воздух можно считать совершенно прозрачным для теплового излучения. Глубины проникновения излучения в воздух в соответствующем диапазоне составляют единицы и десятки метров, и на толщинах образцов материалов (~1см) поглощением воздуха заведомо можно пренебречь. Поэтому можно считать, что передача тепла от излучения воздуху или наоборот происходит только через вещество утепляющего материала. При отсутствии материала температура воздуха определяется только его теплопроводностью и не зависит от температуры излучения. Доминирующим механизмом передачи тепла через воздух (без конвекции) служит тепловое излучение. И только при малых толщинах слоев воздуха (меньше 1 см) существенную роль играет теплопроводность, для которой поток тепла обратно пропорционален толщине слоя.

Для понимания свойств утепляющих материалов важен тот факт, что, уменьшая долю твердого вещества в полном объеме, делая материал все прозрачнее и прозрачнее, мы увеличиваем проницаемость материала для теплового излучения, и, наоборот, увеличивая долю твердого вещества, мы повышаем теплопроводность материала, так как теплопроводности соответствующих веществ в десятки раз выше теплопроводности воздуха. Существует оптимум, определяемый одновременно и теплопроводностью используемых веществ, и прозрачностью этих веществ и сформированной из них структуры. Только знания о величине и того, и другого вклада дают достаточные представления о свойствах материала, о плюсах и минусах его структуры. И если данные о теплопроводности веществ более или менее есть, то о прозрачности материалов для теплового излучения в абсолютном большинстве случаев абсолютно ничего не известно. Но эти знания важны ничуть не меньше. Поэтому в этой работе мы сосредоточили внимание на формировании правильных представлений о радиационном распространении тепла и об измерении вклада, обусловленного излучением.

Абсолютное большинство утепляющих материалов имеет либо волокнистую, либо вспененную случайную структуру. На масштабах, существенно превышающих среднее расстояние между волокнами или размер пузырька, структуры можно считать однородными и изотропными. Распространение излучения в структуре со случайными неоднородностями характеризуют коэффициентом рассеяния ν и коэффициентом поглощения χ. Глубина проникновения излучения в материал определяется этими двумя параметрами [4], как

$$a = (\nu + \chi)^{-1}. \quad (1)$$

Коэффициент поглощения пропорционален доле пространства, занятой веществом. Сами вещества обычно органические полимеры, которые слабо поглощают инфракрасное излучение. Например, в полиэтилене тепловое излучение затухает на толщине ~ 1 мм [5]. Во вспененном полиэтилене с долей занятого пространства 1% без рассеяния излучение должно было бы затухать на толщине 10 см. Коэффициент рассеяния обусловлен масштабом, на котором излучение встречает неоднородности. В современных утепляющих материалах размеры элементов структуры достаточно малы. По визуальным характеристикам материалы прозрачны на толщине порядка нескольких миллиметров. Поэтому, как правило, $\nu \gg \chi$, и глубина проникновения определяется рассеянием излучения в структуре материала.

Распространение излучения в утепляющих материалах носит диффузный характер. При этом для среды, находящейся в состоянии локального температурного равновесия (при стационарной температуре каждого элемента), выполняется закон Кирхгофа, согласно которому мощность, поглощаемая каждым элементом среды, равна мощности, им излучаемой. Поэтому в такой среде процесс переноса тепла излучением описывается лучистой теплопроводностью согласно уравнению Фурье [4, 6]

$$\Phi_и = - L\mathrm{d}T/\mathrm{d}l, \quad (2)$$

где $\Phi_и$ – плотность потока энергии излучения, направленная навстречу градиенту температуры $\mathrm{d}T/\mathrm{d}l$, L – коэффициент лучистой теплопроводности, равный

$$L = 16\sigma T^3 a/3 \quad (3)$$

и σ – постоянная Стефана-Больцмана. При малом градиенте зависимостью лучистой теплопроводности от температуры можно пренебречь, тогда полная плотность потока энергии

$$\Phi = \Phi_и + \Phi_т = -(L + D)\mathrm{d}T/\mathrm{d}l, \quad (4)$$

где D – кондуктивная теплопроводность среды и $\Phi_т$ – обусловленная ею доля плотности потока энергии. При этом надо отметить, что поток энергии, обусловленный теплопроводностью, формируется на ничтожно малом расстоянии порядка длины свободного пробега молекул. В отличие от него поток энергии излучения формируется на расстоянии порядка глубины проникновения излучения в среду a. Поэтому вблизи границ среды возможно проявление нелинейных по градиенту температуры эффектов, причем, чем меньше энергетическая светимость внешних объектов, тем сильнее должны быть проявления. Для уменьшения граничных эффектов в нашей экспериментальной установке рабочие поверхности нагревателя и холодильника выполнены из прозрачного для теплового излучения монокристаллического кремния, за которым расположены материалы с очень высокой светимостью.

В этой работе были проведены исследования зависимостей тепловой проводимости образцов нетканого объемного полотна «холлофайбер» (с поверхностной плотностью 140 г/м^2, исходной толщиной 25 мм, занятой при этом полиэфиром долей пространства 0.74%, толщиной волокон 10 мкм) от толщины, до которой они были сжаты. Выбор такого типа зависимостей обусловлен тем, что более или менее понятно, каким должен быть характер получаемых результатов. При малой доле пространства, занятой твердым веществом, кондуктивный вклад должен практически полностью определяться теплопроводностью воздуха. Соответственно кондуктивный вклад почти не должен зависеть от толщины. В то же время, при сжатии материала оптическая плотность среды в первом приближении растет обратно пропорционально толщине. Соответственно глубина проникновения и лучистая теплопроводность пропорциональна толщине $L = \alpha d$. Тогда из уравнения (4) тепловая проводимость образца должна примерно соответствовать зависимости

$$G = \Phi/\Delta T = -\alpha - D/d, \quad (5)$$

Результаты измерений зависимости $G(1/d)$ (с точностью до знака) для образцов, сложенных в 1, 2 и 3 слоя, представлены на рис.1.

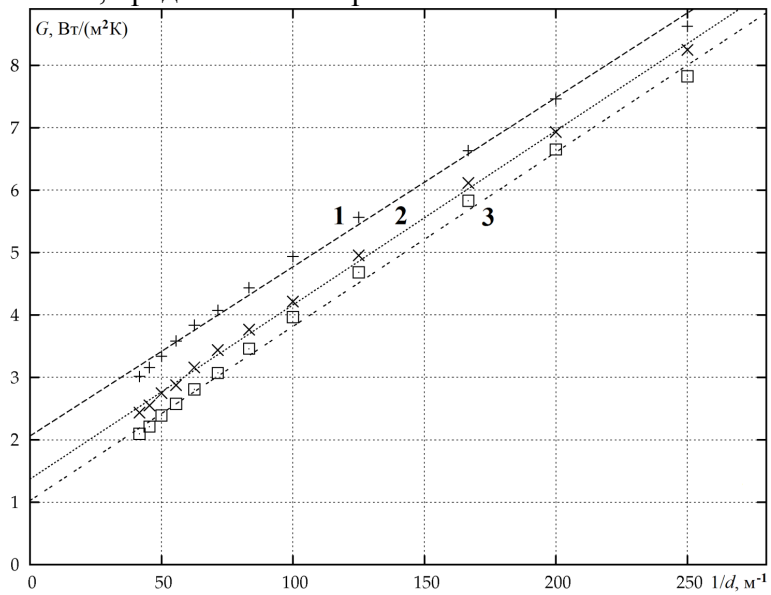


Рис.1. Зависимости G от $1/d$ для образцов 1 – в один, 2 – в два и 3 – в три слоя

Данные действительно с неплохой точностью соответствуют линейным зависимостям. Полученные коэффициенты наклона $D_1 = 0.0271$, $D_2 = 0.0279$, $D_3 = 0.0279$ Вт/(м·К) и свободные члены $\alpha_1 = 2.06$, $\alpha_2 = 1.37$, $\alpha_3 = 1.025$ Вт/(м^2·К) можно использовать в качестве

показателей свойств материала для вычисления его тепловой проницаемости в различных условиях эксплуатации.

Однако для всех зависимостей заметно систематическое отклонение от прямолинейности, что говорит о необходимости еще более подробного анализа. Нелинейность могла бы быть связана с изменением кондуктивной составляющей вследствие увеличения занятой веществом доли объема. Но тогда при увеличении числа слоев тепловая проводимость должна была бы быть выше, а зависимости должны были бы быть выгнутыми вверх. Но мы наблюдаем совершенно противоположное. Значит, нелинейности обусловлены изменением радиационной составляющей. С нашей точки зрения, нелинейности связаны с тем, что при сжатии не только растет плотность среды, но изменяется и расположение рассеивающих излучение волокон. Они становятся более параллельными сжимающим пластинам и перпендикулярными направлению излучения. Соответственно одновременно растет сечение рассеяния. Поэтому лучистая теплопроводность меняется быстрее, чем просто пропорционально толщине.

Полагая, что нелинейности обусловлены изменением только радиационной составляющей, которая сама по себе меняется не очень быстро, попробуем оценить их вклад. Тогда в первом приближении возле некоторой точки $x_0 = 1/d_0$ зависимости $\alpha(x)$

$$\alpha = \alpha(x_0) + (x - x_0)\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}x, \qquad (6)$$

У нас есть три кусочка наших трех зависимостей (рис.2), на которых средняя толщина слоя одинакова (d_0 = 6 мм), в конце верхней кривой, в середине средней и в начале нижней.

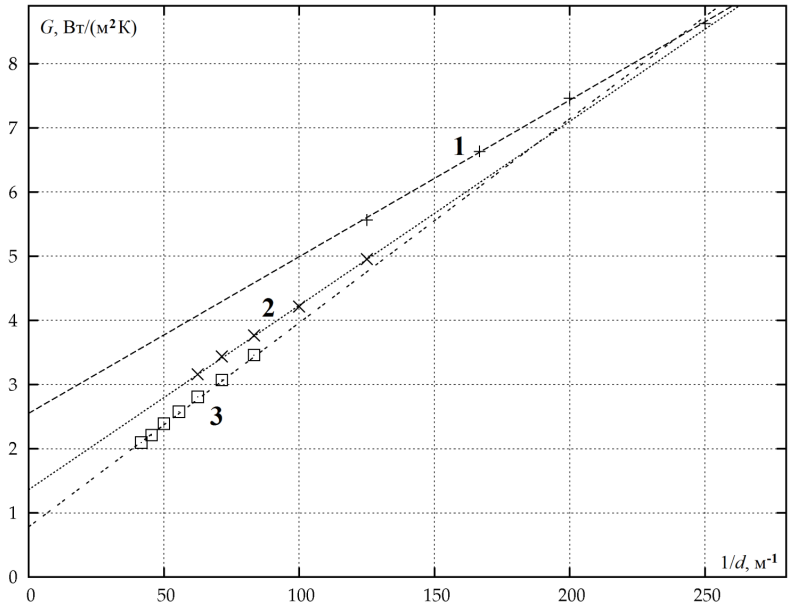


Рис.2. Части зависимостей при $d_0 \approx 6$ мм для образцов 1 – в один, 2 – в два, 3 – в три слоя

Тепловое сопротивление каждого слоя одинаково. Поэтому вклад радиационной составляющей в тепловую проводимость во втором случае должен быть вдвое, а в третьем случае втрое меньше, чем в первом

$$G_1 = \alpha + Dx = \alpha(x_0) - x_0\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}x + (\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}x + D)x, \qquad (7)$$

$$G_2 = \alpha/2 + Dx = (\alpha(x_0) - x_0\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}x)/2 + (1/2\ \mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}x + D)x, \qquad (8)$$

$$G_3 = \alpha/3 + Dx = (\alpha(x_0) - x_0\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}x)/3 + (1/3\ \mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}x + D)x. \qquad (9)$$

Поэтому аппроксимировали эти кусочки линейными зависимостями и получили для первой, второй и третьей прямой значения коэффициентов наклона 0.0244, 0.0297 и 0.0318 Вт/(м·К) и свободных членов 2.55, 1.36 и 0.78 Вт/(м^2·К) соответственно. При этом в соответствии с (7, 8, 9) ожидаемо получили, что свободный член в первом случае примерно вдвое больше, чем во втором и втрое, чем в третьем. По известным коэффициентам наклона были найдены значения скорости убывания (при d_0 = 6 мм) $\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}x$ = 0.011±0.001 Вт/(м·К) и кондуктивной теплопроводности D = 0.036±0.001 Вт/(м·К). Затем, используя найденное

значение $d\alpha/dx$, было рассчитано значение коэффициента пропорциональности $\alpha(d_0)$ = 0.7±0.2 Вт/(м^2·К) и коэффициента лучистой теплопроводности L = 0.0042±0.0012 Вт/(м^2·К). Не трудно заметить, что при этой толщине доля радиационной составляющей около 10%.

Зная полученные значения D и α, легко оценить, что в несмятом материале (d = 24 мм) приходящаяся на излучение доля уже чуть больше половины. Даже в спрессованном в 18 раз она составляет целых 2.5%. При толщине, измеренной согласно ГОСТ (d = 12.3 мм), на излучение приходится четверть пропускаемого тепла, что многократно больше доли, обусловленной теплопроводностью волокон. Поэтому можно сказать, что будущее будет за технологиями, которые смогут минимизировать вклад радиационной составляющей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шампаров Е.Ю., Жагрина И.Н.* Установка для прецизионных бесконвекционных измерений тепловой проницаемости материалов при температурах, близких к комнатной. Патент на полезную модель № 166709 РФ 17.11.2016.

2. *Шампаров Е.Ю., Жагрина И.Н., Бессонова Н.Г.* Сравнительный анализ теплоизолирующей способности высокообъемных нетканых материалов для одежды // Дизайн и технологии. – М: 2016 г. №52(94). С. 80-87.

3. *Шампаров Е.Ю., Жагрина И.Н., Родэ С.В.* Измерение вкладов теплопроводности и теплового излучения в перенос тепла в среде // Дизайн и технологии. – М: 2017 г. №57. С. 79-85

4. *Зигель Р., Хауэлл Дж.* Теплообмен излучением. пер. с англ. М.: Мир, 1975. 934 с.

5. Кристаллические полиолефины. / Под ред. Раффа Р. и Дака К. Т.2. М.: Химия, 1970. 469 с.

6. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. – Изд. 5-е – М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

УДК 66.081 : 54-71

ИОНООБМЕННЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИКАПРОАМИДНОГО ВОЛОКНА
ION EXCHANGE PROPERTIES OF MODIFIED POLYCAPROAMIDE FIBER

Дмитрий Евгеньевич Захаров, Роман Евгеньевич Голяков, Алексей Александрович Сироткин, Владислав Вячеславович Коротков, Сергей Валентинович Натареев
Dmitriy E. Zakharov, Roman E. Golyakov, Aleksey A. Sirotkin, Vladislav V. Korotkov, Sergey V. Natareev

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail:dimazah16@ya.ru, maschi75222@gmail.com, komradquad@rambler.ru, vlad_man2015@mail.ru, natoret@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности процесса ионообменной сорбции ионов тяжелых металлов на модифицированном поликапроамидном волокне, приведены результаты экспериментального исследования кинетики ионного обмена в лабораторных условиях.

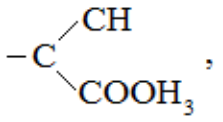
Abstract: Some features of the process of ion-exchange sorption of ions of heavy metals on the modified polycaproamide fiber were researched, the results of experimental studies of the kinetics of ion exchange in the laboratory conditions were shown.

Ключевые слова: модификация поликапроамидного волокна, ионный обмен.

Keywords: modification polycaproamide fiber, ion exchange.

Ионообменные свойства поликапроамидного волокна могут быть получены методом химической модификации, с помощью которого вводят новые функциональные группы в исходное уже сформированное волокно. Благодаря высокоразвитой удельной поверхности и большой внутримолекулярной пористости ионообменные волокна обладают по сравнению с традиционными зернистыми и гранулированными ионитами лучшими сорбционными и кинетическими свойствами [1, 2].

Целью работы являлось установление закономерностей процессов ионообменной сорбции ионов тяжелых металлов волокнистым сорбентом на основе поликапроамидного волокна. Модификацию поликапроамидного волокна осуществляли за счет химически инициированной привитой сополимеризации на его поверхности метакриловой кислоты. Полученный ионит являлся слабокислотным катионитом, имеющим функциональные группы



способные обменивать катион H^+ на катион металла из раствора.

Изучение процесса сорбции ионов тяжелых металлов из водных растворов сульфата меди проводили методом ограниченного объема [3] при перемешивании и термостатировании. Были выбраны концентрации растворов сульфата меди 0,005, 0,007 и 0,02 моль/л. Его температура составляла 20 и 60 °С. Для определения содержания ионов меди в растворах использовали фотометрический метод [4].

Основные свойства МПКА волокна приведены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства ионита на основе поликапроамидного волокна

Показатель	Значение показателя
Полная статическая обменная емкость ионита a_0, ммоль/мл	1,4
Линейная плотность (толщина), текс	95-100
Разрывная нагрузка (прочность), Н/текс	0,11-0,14
Объемное набухание в воде при 25 °С, %	10-13
Равновесная (фактическая) влажность, %	4-5

На рис. 1 приведены кинетические кривые ионообменной сорбции меди на ионообменном волокне. Из полученных кинетических данных видно, что на скорость ионного обмена значительное влияние оказывает концентрация раствора. С увеличением концентрации раствора скорость процесса возрастает. Установлено, что повешение температуры раствора оказывает незначительное влияние на скорость ионного обмена.

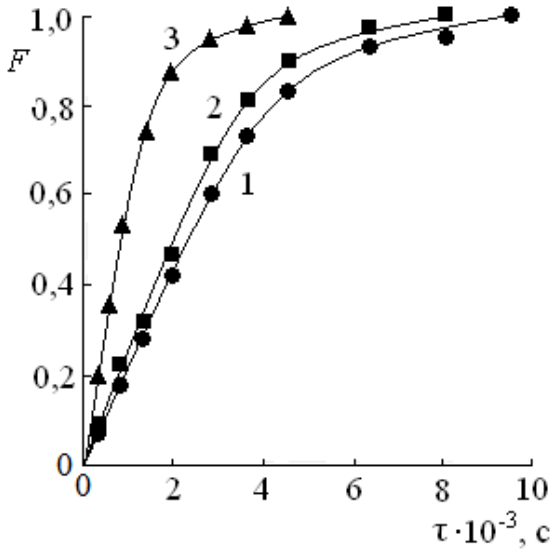


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции ионов Cu^{2+} на МПКА волокне: T_1 = 20 °С; C_0, моль/л: 1 – 0,005; 2 – 0,007; 3 – 0,02; тоже для рис. 2 и 3

С целью определения кинетического механизма ионного обмена экспериментальные данные были обработаны методом интерпретации кинетических данных в виде $-ln(1-F)$ от τ и F от $\tau^{0,5}$ [5]. Нелинейный характер зависимостей $-ln(1-F)$ от τ показывает, что скорость процесса ионного обмена контролируется как внешней, так и внутренней диффузией. При степени завершенности процесса F в более 0,65 происходит постепенный переход во внутридиффузионную область. Обработка экспериментальных данных в координатах F от $\tau^{0,5}$ также указывает на этот факт.

Для нахождения коэффициентов внутренней диффузии ионов меди в волокне был использован зональный метод, в соответствии с которым время всего процесса ионного обмена разбивается на ряд небольших временных интервалов [6]. Для i-ого участка кинетической кривой величина коэффициента диффузии находится по формуле:

$$\overline{D}_i = \frac{r_0^2}{\mu_1 \tau_i} \ln \frac{4Bi_i^2}{\mu_1^2 \left(Bi_i^2 + \mu_1^2\right) F_i}, \quad (1)$$

где $\overline{D_i}$ – коэффициент внутренней диффузии, м^2/с; r_0 – радиус волокна, м; τ_i – временной интервал i–го участка кинетической кривой, с; Bi_i – число Био; $F_i = \left(\overline{C}_i - \overline{C}_{0i}\right) / \left(\overline{C}_p - \overline{C}_{0i}\right)$ – средняя относительная концентрация; $\overline{C}_i$, $\overline{C}_{0i}$ и $\overline{C}_p$ – текущая, начальная и равновесная концентрации сорбируемого иона в ионите соответственно, моль/л; μ_1 – наименьший не равный нулю корень характеристического уравнения:

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \mu Bi_i. \quad (2)$$

Установлено, что коэффициент диффузии в ионите не является величиной постоянной, а возрастает по мере протекания процесса (рис. 2). Этот факт можно объяснить, если обратиться к уравнению для расчета коэффициента взаимодиффузии [5]:

$$\overline{D}_{AB} = \frac{\overline{D}_A \overline{D}_B \left(z_A^2 \overline{C}_A + z_B^2 \overline{C}_B\right)}{z_A^2 \overline{C}_A \overline{D}_A + z_B^2 \overline{C}_B \overline{D}_B}, \quad (3)$$

где $\overline{C}_A$ и $\overline{C}_B$ – концентрации обменивающихся ионов A и B в ионите, моль/м^3; $\overline{D}_A$ и $\overline{D}_B$ – коэффициенты самодиффузии ионов A и B в ионите, м^2/с; z_A и z_B – заряды ионов A и B.

Как видно из уравнения (3), скорость процесса ионного обмена определяется в большей степени теми ионами, концентрация которых меньше в фазе ионита.

Расчет энергии активации процесса диффузии ионов Cu^{2+} проводили по формуле [7]:

$$E = \frac{2.3R\left(\ln \overline{D}_2 - \ln \overline{D}_1\right) T_1 T_2}{T_2 - T_1}, \quad (4)$$

где E – энергия активации процесса диффузии, Дж/моль; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T_1 и T_2 – абсолютная температура раствора в первом и втором процессах ионного обмена, К.

Результаты расчета энергии активации в зависимости от содержания ионов меди в ионите показаны на рис. 3.

Установлено, что энергия активации изменяется по мере насыщения ионита, что можно объяснить сменой кинетического механизма ионного обмена. На первых стадиях процесса энергия активации соответствует энергии активации диффузии ионов металла в пленке жидкости, окружающей частицу, а на последних стадиях – энергией активации ионов водорода внутри ионообменного волокна.

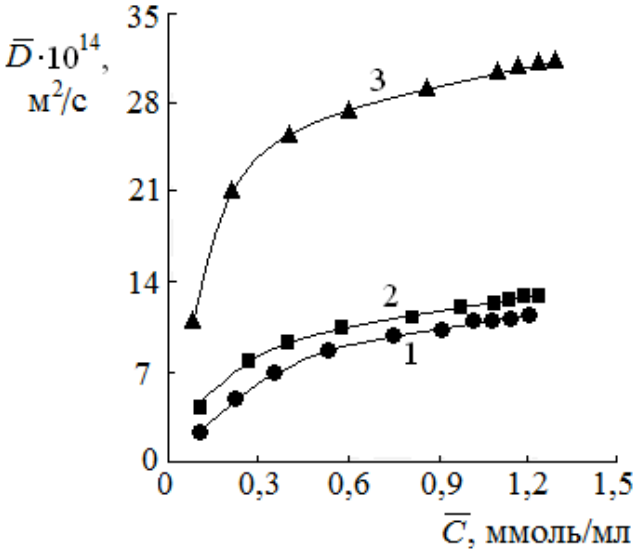


Рис. 2. Зависимости коэффициента внутренней диффузии от концентрации ионов меди в ионите

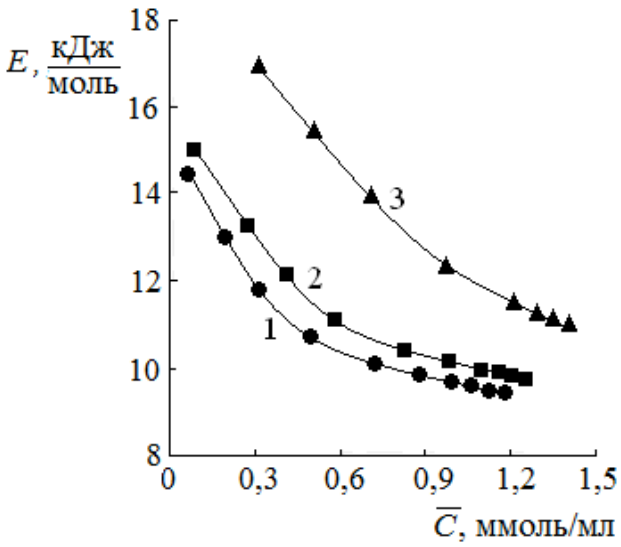


Рис. 3. Зависимости энергия активации внутренней диффузии от концентрации ионов меди в ионите

Таким образом, проведенные исследования позволили определить основные кинетические характеристики процесса ионообменной сорбции ионов меди на МПКА волокне, которые могут быть использованы при моделировании и расчете процесса ионного обмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев М.П., Абдулхакова З.З. Волокнистые хемосорбенты. М.: Народный учитель, 2001. 176 с.

2. Буринский С. В. Окислительно-восстановительные и ионообменные волокна, материалы на их основе. СПб.: СПГУТД, 2009. 198 с.

3. Полянский Н.Г. Горбунов Г.В., Полянская Н.Л. Методы исследования ионитов. М.: Химия, 1976. 208 с.

4. Валова (Копылова) В.Д., Абесадзе Л.Т. Физико-химические методы анализа: Практикум. М: Дашков и К., 2016. 224 с.

5. Кокотов Ю.А., Золотарев П.П., Елькин Г.Э. Теоретические основы ионного обмена: Сложные ионообменные системы. Л.: Химия, 1986. 280 с.

6. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: КолосС, 2010. 478 с.

7. Борнацкий И. И. Основы физической химии. М.: Металлургия, 1989. 319 с.

УДК 677.017

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ НЕТКАНЫХ УТЕПЛЯЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ
CHARACTERISTICS OF THERMAL PROPERTIES OF NONWOVEN WARMING MATERIALS

Инна Николаевна Жагрина, Евгений Юрьевич Шампаров, Сергей Витальевич Родэ
Inna N. Jagrina, Eugene Yu. Shamparov, Sergey V. Rode

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

Аннотация: Проведены измерения радиационно-кондуктивного переноса тепла в образцах нетканых утепляющих материалов. Получены значения характеристик теплозащитных свойств материалов.

Abstract: Measurements of radiative-conductive heat transfer of nonwoven warming fabrics samples are performed. Values of characteristics of materials thermal properties are obtained.

Ключевые слова: теплопроводность, тепловое излучение, нетканые утепляющие материалы.

Keywords: the heat conductivity, thermal radiation, nonwoven fabrics warming materials.

В настоящее время большим успехом на рынке теплозащитной одежды пользуются высокообъёмные утеплители разных производителей, известные под торговыми марками «*Fibertec*», «*Hollowfiber*», «*Isosoft*», «*Polarquard*», «*Polartec*», «*Primaloft*», «*Termolite*», «*Thinsulate*», «*Шерстипон*», «*Шерстикрон*» и др. Основой состава этих материалов служат тонкие полые полиэфирные волокна, покрытые слоем силикона. Такая высокая популярность этой основы обусловлена возможностью скрепления холста термическим способом.

Широкий ассортимент делает задачу выбора материала для конкретного изделия затруднительной. Возникают вопросы: «В чем и существенны ли различия материалов?», «Все они одинаково хороши или все одинаково плохи?». Анализ свойств материалов по внешнему виду, волокнистому составу, характеристикам холста и т.д. даёт множество противоречивой информации. Поэтому мы решили провести исследования их теплозащитных свойств, используя созданное нами оборудование [1] и построенные методики измерений [2].

В этой работе были проведены исследования девяти образцов нетканых объемных полотен, выпускаемых предприятиями «Термопол»(Т*), «Эверест»(Э*) и «Нафта-Хим»(Н*). Образцы либо состоят только из полиэфирных волокон («холлофайбер» Т*), либо содержат по 15% добавок, которыми в разных образцах служат хлопок, лён, бамбуковые и эвкалиптовые волокна, овечья шерсть и шерсть яка. Все холсты имеют одинаковую поверхностную плотность – 300 г/м^2 (по информации производителей). Были измерены зависимости тепловой проводимости образцов от толщины, до которой они были сжаты (рис.1).

Такой тип измерений позволяет оценить вклад радиационной и кондуктивной составляющих тепловой проводимости материала. Действительно, при малой доле пространства, занятой твердым веществом, кондуктивный вклад практически полностью определяется теплопроводностью воздуха и от толщины не зависит. При сжатии материала оптическая плотность среды с хорошей точностью растет обратно пропорционально толщине. Поэтому глубина проникновения излучения a и лучистая теплопроводность [3], при температуре T равная

$$L = 16\sigma T^3 a/3 \qquad (1)$$

(σ – постоянная Стефана-Больцмана), пропорциональна толщине d

$$L = \alpha d. \quad (2)$$

Тогда из уравнения Фурье тепловая проводимость образца G должна выражаться как

$$G = \Phi/\Delta T = -\alpha - D/d, \quad (3)$$

где Φ – плотность потока тепловой энергии при разности температур ΔT, и D – кондуктивная теплопроводность материала.

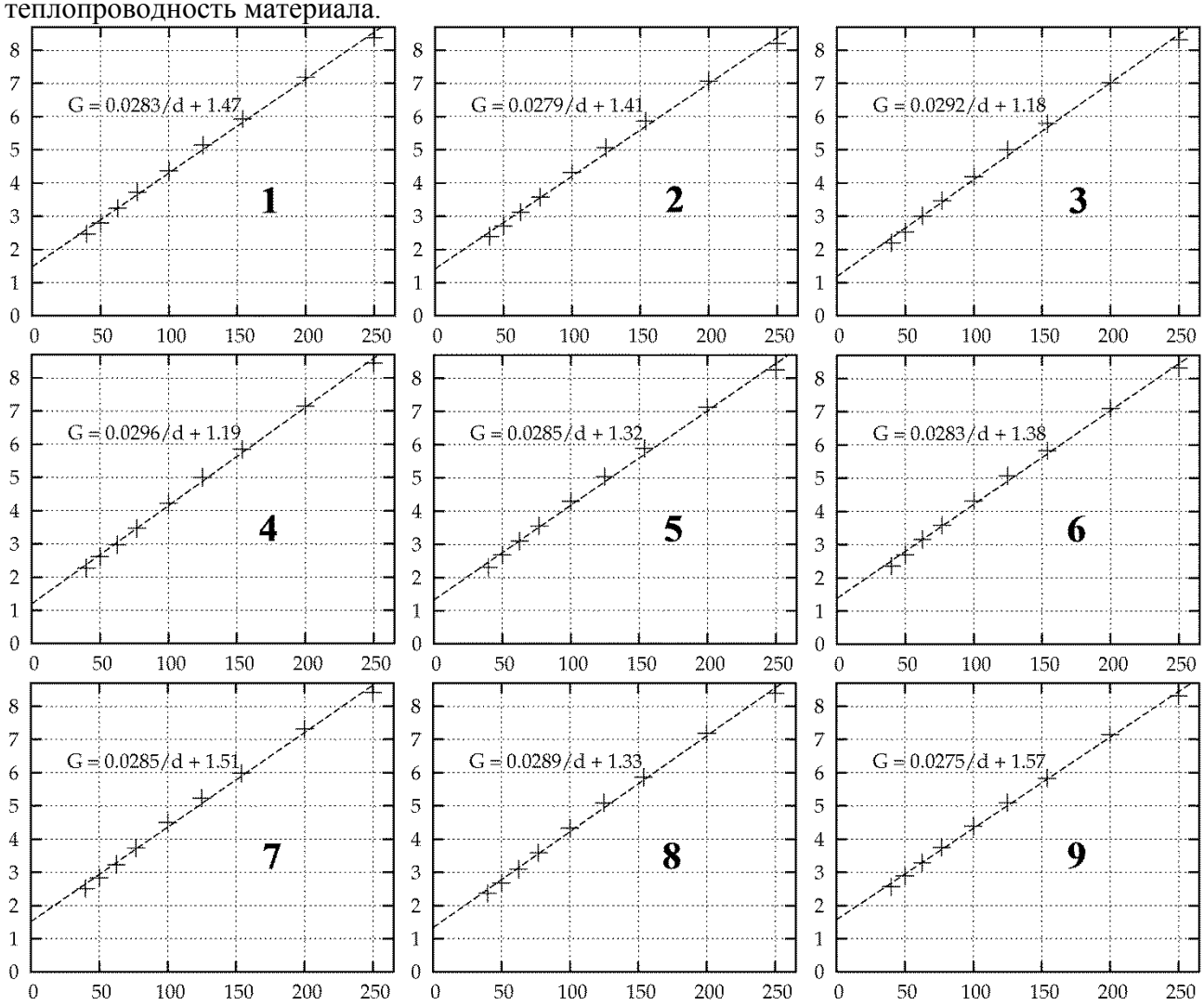


Рис.1. Зависимости G (Вт/(м·К)) от $1/d$ (м$^{-1}$) материалов: 1 – шерстипласт Э*, 2 – honcon-шерсть Н*, 3 – бамбук Н*, 4 – cotton Э*, 5 – бамбук Э*, 6 – шерсть яка Э*, 7 – лен-пласт Э*, 8 – эвкалипт Э*, 9 – холлофайбер Т*

Поэтому, учитывая (3), мы построили зависимости тепловой проводимости образцов от обратной толщины, которые, как не трудно заметить, хорошо легли на ожидаемые прямые линии. Параметры аппроксимирующих прямых – коэффициенты наклона D и свободные члены α представлены в таблице 1. Дополнительно мы учли тот факт, что поверхностная плотность существенно колеблется в разных местах материала, и при вырезании образцов вносится существенная ошибка. Поэтому мы взвесили все образцы и рассчитали фактические значения поверхностной плотности γ. Так как оптическая плотность среды пропорциональна массе, то правильнее сравнивать не просто коэффициенты пропорциональности α, а произведения α·γ. Кроме этого, в соответствии с ГОСТ при прижимающем давлении 1 г/см^2 мы измерили толщину холстов $d_г$ и рассчитали тепловую проводимость материала при этой толщине $G_г$.

Таблица 1. Характеристики утепляющих материалов

№	Название материала, вид волокон, производитель	D, Вт/(м·К)	α, Вт/(м^2·К)	П. плотность γ, г/м^2	α·γ, Вт·г/(м^4·К)	Толщина по ГОСТ $d_г$, мм	Т. проводимость $G_г$, Вт/(м^2·К)
1	Шерстипласт (ВПэф+шерсть), «Эверест»	0.0283	1.47	283	416	19.8	2.90
2	Honcon (ВПэф+шерсть), Нафта-Хим	0.0279	1.41	312	440	18.4	2.92
3	Бамбук (ВПэф+бамбук), Нафта-Хим	0.0292	1.18	330	389	17.9	2.81
4	Файберпласт (ВПэф+хлопок), «Эверест»	0.0296	1.19	293	349	16.6	2.97
5	Файберпласт (ВПэф+бамбук), «Эверест»	0.0285	1.32	339	447	22.4	2.59
6	Ф.пл. (ВПэф+шерсть яка), «Эверест»	0.0283	1.38	300	416	16.3	3.12
7	Лён-пласт (ВПэф+лён), «Эверест»	0.0285	1.51	340	513	18.7	3.03
8	Файберпласт (ВПэф+эвкалипт), «Эверест»	0.0289	1.33	349	464	18.6	2.88
9	Холлофайбер (ВПэф), «Термопол»	0.0275	1.57	268	421	16.2	3.27
Примечание: ВПэф – волокно полиэфирное.							

Кондуктивные составляющие теплопроводности материалов различаются очень мало. Разброс всего ± 3.5%. Кроме этого, они лишь слегка превосходят теплопроводность воздуха, которая при нашей средней температуре измерений равна 0.0272 Вт/(м·К). Все это подтверждает тот факт, что вклад проницаемости твердого вещества материалов в кондуктивную теплопроводность очень мал. Индивидуальные свойства материалов определяются, в первую очередь, их разной прозрачностью для теплового излучения. Объективным параметром, характеризующим прозрачность волокнистых составов, является произведение α·γ. Разброс по этому параметру достаточно велик ± 20%. В середине диапазона находятся полиэфирные волокна (см. табл.1 для холлофайбера), которые составляют основу всех приведенных материалов. Поэтому логично будет сравнивать прозрачности остальных волокнистых составов с полиэфиром. Можно сказать, что добавка вместо полиэфира овечьей шерсти или шерсти яка заметных изменений прозрачности не дает. Добавка бамбуковых волокон тоже не сопровождается большими изменениями, но разброс результатов у разных производителей достаточно велик. Видимо они используют волокна разного качества, или разной толщины, или разной очистки. Вероятно «Эверест» использует более толстые бамбуковые волокна, так как они дают меньшее рассеяние и более высокую прозрачность, но при этом материал лучше держит форму. Эвкалиптовые волокна слегка увеличивают прозрачность материала. Однозначно положительный эффект дает добавление хлопка, очевидно потому, что толщина волокон хлопка (7 мкм) существенно меньше чем у остальных типов волокон. Соответственно рассеяние излучения выше и прозрачность меньше. Самый худший результат дал образец с добавлением льна. Однако мы полагаем, что это не такие плохие свойства льна, а такое негодное качество обработки сырья. В образце использованы технические волокна льна. Встречаются даже неразбитые куски стеблей. Поэтому однозначно судить о свойствах льняных волокон не представляется возможным.

Теперь проанализируем свойства материалов при одинаковой сдавливающей нагрузке. Нетрудно заметить, что аутсайдерами с самой высокой тепловой проводимостью $G_г$ являются образцы с наименьшей толщиной. Наоборот, самый лучший показатель у самого толстого

образца. Это, конечно же, связано с тем, что чем больше толщина, тем меньше вклад кондуктивной составляющей. То есть в этих легких утепляющих материалах на первый план выходит не малая теплопроводность вещества волокон, а их способность держать форму. Механическая изгибная жесткость волокна пропорциональна четвертой степени диаметра. Поэтому более толстые волокна обеспечивают больший объем и меньшую тепловую проводимость. Но они же дают меньшее рассеяние излучения. Хотя все же способность держать объем обеспечивает лучший результат. Образец с добавлением хлопка при наилучших показателях по излучению ввиду неспособности держать форму в итоге показал посредственный результат. А наихудшие показатели у материалов, которые и форму слабо держат, и излучение плохо рассеивают. В частности, у холлофайбера. Все виды добавок привели к улучшению его теплозащитных характеристик.

В итоге из всего сказанного можно сделать весьма неутешительные выводы. Производители движутся старыми давно разведанными путями без глубокого понимания свойств материалов, и очевидно, что ищут не там, где стоило бы искать. Путь к построению материала с существенно лучшими теплозащитными характеристиками очевиден. Должна быть сведена на нет радиационная компонента и максимально минимизирована кондукционная. Для этого материал должен быть композитным и содержать две компоненты. Одна – редкий каркас из толстых жестких волокон, который мог бы держать форму. Вторая – наполнитель из очень тонких волокон, который должен предотвратить передачу теплового излучения. Надо искать возможности для модификации свойств волокон наполнителя для достижения высокого отражения или поглощения инфракрасного излучения. Тогда прозрачность материала будет значительно меньше. Заметим, что такими исследованиями практически никто еще не занимался.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шампаров Е.Ю., Жагрина И.Н.* Установка для прецизионных бесконвекционных измерений тепловой проницаемости материалов при температурах, близких к комнатной. Патент на полезную модель № 166709 РФ 17.11.2016.

2. *Шампаров Е.Ю., Жагрина И.Н., Родэ С.В.* Измерение вкладов теплопроводности и теплового излучения в перенос тепла в среде // Дизайн и технологии. – М: 2017 г. №57. С.79 – 85

3. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. – Изд. 5-е – М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

УДК 536.71

КОРРЕЛЯЦИЯ ДАННЫХ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ И ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ В ОБОБЩЕННОЙ БЕЗРАЗМЕРНОЙ ФОРМЕ ДЛЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

CORRELATION OF VAPORIZATION HEAT AND SURFACE TENSION HYDROCARBONS DATAS IN A GENERALIZED UNIVERSAL FORM

Борис Ашотович Арутюнов, Елена Вячеславовна Рытова, Гайса Пернебекулы Калымбет
Boris A. Arutyunov, Elena V. Rytova, Gaisa P. Kalymbet

Московский технологический университет, Россия, Москва
Moscow Technological University, Russia, Moscow
(e-mail: erytova@gmail.com)

Аннотация: Исследования в области фазовых переходов жидкость-пар позволили определить термодинамически обоснованные масштабы для построения обобщенной зависимости теплот парообразования от приведенной плотности и поверхностного натяжения для индивидуальных углеводородов.

Abstract: Investigations in the field of liquid-vapor phase transitions have made it possible to determine thermodynamically valid scales for constructing a generalized dependence of the heat of vaporization on the reduced density and surface tension for individual hydrocarbons.

Ключевые слова: фазовый переход жидкость-пар, минимум свободной энергии, масштабы, обобщенные зависимости, свойства веществ, теплота парообразования, поверхностное натяжение.

Keywords: liquid-vapor phase transition, minimum of free energy, scales, generalized dependencies, properties of substances, heat of vaporization, surface tension.

Оптимальная разработка процессов химической технологии и аппаратуры для их проведения возможна лишь при наличии надежной информации о теплофизических свойствах химических соединений. Значения физико-химических величин можно найти в справочной литературе, однако в ней содержатся не все данные, необходимые для технологического расчета. В большинстве случаев интересующие нас величины приведены для условий, отличающихся от тех, при которых осуществляется процесс. Вследствие этого справочные данные приходится интерполировать или экстраполировать, а это всегда ведет к большим погрешностям расчета процесса.

Для практики особенно надежными и предпочтительными являются экспериментальные данные, однако их определение в широких интервалах параметров состояния и составов бывает затруднительным, а иногда и просто невозможным. В значительном числе случаев инженеру приходится обращаться к расчету.

Одним из важнейших теплофизических свойств и часто используемых в технологических расчетах является теплота парообразования, как для чистых компонентов, так и их смесей. Те литературные источники, которые существуют на данный момент, дают нам возможность рассчитать теплоты парообразования чистых компонентов с погрешностью около 5%. Следует отметить, что погрешности расчета любых процессов, в том числе и в химической технологии, находятся в прямой связи с погрешностью используемых физико-химических свойств, они всегда больше чем последние, что в свою очередь приводит к лишним энергозатратам. Поэтому, в данной ситуации, существует необходимость в разработке метода для расчета теплоты парообразования углеводородов с более высокой точностью.

В данной работе объясняется метод определения теплоты парообразования и поверхностного натяжения через зависимость безразмерной плотности.

Ранее в нашей работе [1] была показана связь термодинамических свойств, основанная на уравнении состояния. При построении обобщенных зависимостей в приведенной форме в качестве безразмерной величины был выбран свойства при температуре фазового перехода T_m, соответствующей максимальной работе расширения при фазовом переходе жидкость-пар [2]. Зависимость между этой температурой и критической показала, что $T_m = 0.76T_k$.

Тогда обобщенная формула для расчета разности термодинамических свойств веществ на пограничных линиях насыщения можно представить в виде:

$$\frac{\Delta\chi}{\Delta\chi_m} = f\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_m}\right), \tag{1}$$

где $\Delta\chi = \chi'' - \chi'$ - разность исследуемого термодинамического свойства при температуре T; $\Delta\chi_m = \chi_m'' - \chi_m'$ - разность исследуемого термодинамического свойства при температуре T_m; $\Delta\rho = \rho'' - \rho'$- разность плотности при температуре T; $\Delta\rho_m = \rho_m'' - \rho_m'$- разность плотности при температуре T_m.

Следовательно, для теплоты парообразования и для поверхностного натяжения [3] обобщенные уравнения можно записать в виде:

$$\frac{\Delta H}{\Delta H_m} = f\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_m}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_m} = f\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_m}\right) \tag{3}$$

Обработка экспериментальных данных [4] показала, что функции (2) и (3) можно представить в виде простых степенных функций:

$$\frac{\Delta H}{\Delta H_m} = 1.003\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_m}\right)^{1.25}, \tag{4}$$

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_m} = 1.019\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_m}\right)^{4.09} \tag{5}$$

Погрешность расчетных и экспериментальных для уравнения (4) не превышает 3%, а для (5) – 2% на концах кривых.

Поскольку для исследуемых свойств аппроксимационные кривые имеют степенную зависимость, смеем предположить связь между теплотой парообразования и поверхностным натяжением углеводородов. Следовательно, основываясь и на предложенной теории [1], можем провести обработку вида:

$$\frac{\Delta H}{\Delta H_m} = f\left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right). \tag{6}$$

При обработке данных использовались данные [4] для алкенов, алкинов и изомеров простых углеводородов.

После аппроксимации получаем следующее уравнение:

$$\frac{\Delta H}{\Delta H_m} = 0.9934\left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^{0.248} \tag{7}$$

Погрешность расчетных и экспериментальных данных для уравнения (7) не превышает 2%. Результаты расчета представлены в таблицах 1 и 2.

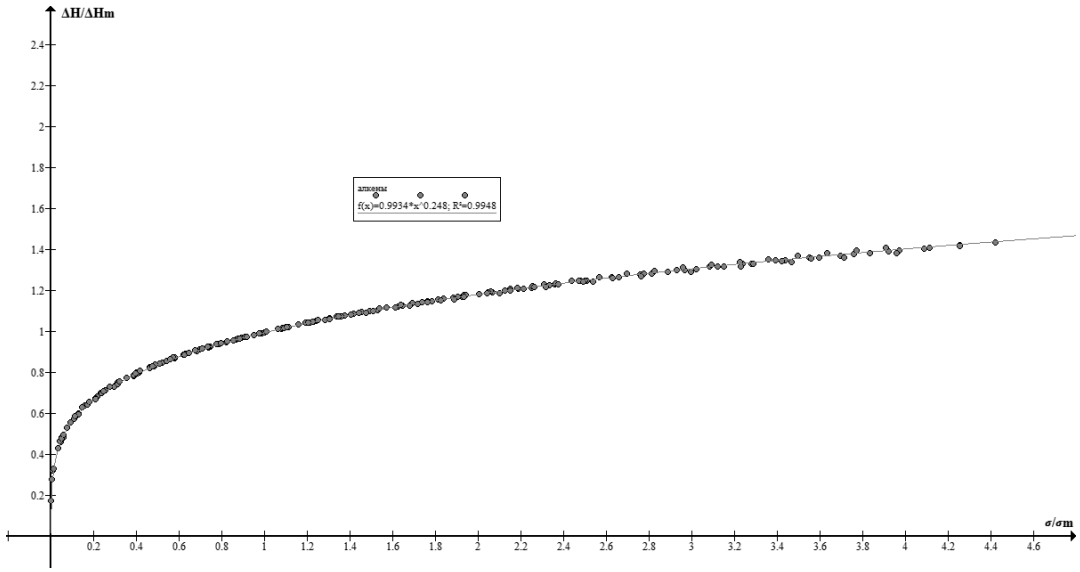


Рис. 1. Результаты обработки экспериментальных данных о теплоте парообразования индивидуальных веществ по формуле (6)

Таблица 1. Погрешности расчета приведенной теплоты парообразования пропилена при разных значениях температуры

T_k=364.21 T_m=276.81 σ_m=9.28	$\left(\frac{\Delta H}{\Delta H_m}\right)_{эксп}$	$\left(\frac{\Delta H}{\Delta H_m}\right)_{расч}$	**δ, %**
Температура, K			
100	1.43	1.51	1.89
140	1.36	1.42	0.71
180	1.26	1.33	1.62
220	1.14	1.21	1.31
260	1.00	1.07	0.42
300	0.84	0.89	0.55
340	0.65	0.60	1.33

Таблица 2. Погрешности расчета приведенной теплоты парообразования бутена при разных значениях температуры

T_k =364,21 T_m=276,81 σ_m=9,28	$\left(\frac{\Delta H}{\Delta H_m}\right)_{эксп}$	$\left(\frac{\Delta H}{\Delta H_m}\right)_{расч}$	**δ, %**
Температура, K			
160	1.33	1.42	1.91
190	1.28	1.36	0.59
230	1.21	1.27	0.28
270	1.12	1.16	0.42
310	1.02	1.03	0.11
350	0.89	0.87	0.43
390	0.68	0.61	1.08

Таким образом, полученное уравнение (7) можно использовать при расчете теплоты парообразования чистых углеводородов, зная поверхностное натяжение и наоборот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнов Б.А. Исследование термодинамических свойств веществ при фазовых переходах жидкость-пар // Вестник МИТХТ. 2010. Т. 5. №2. С. 37.
2. Арутюнов Б.А., Арутюнов А.Б. Новый термодинамический метод подобия // Изд-во Энергия. Наука.-2014.-Т. 11. – С. 42-51.
3. Арутюнов Б.А., Рытова Е.В. Метод расчета поверхностного натяжения углеводородов // Вестник МИТХТ. 2013.-Т. 8.-№6. С. 59-62.
4. Lindstrom, P.J. & Mallard, W.G. (Eds.), 2001, NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database No. 69, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (http://webbook.nist.gov)

УДК 664.8/.9.034

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА КОПЧЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ
PECULIARITIES OF PROCESS OF SMOKING DISPERSED PRODUCTS IN ELECTROSTATIC FIELD

Сергей Васильевич Шахов, Сергей Юрьевич Шубкин, Игорь Николаевич Сухарев
Sergey V. Shakhov, Sergey Yu. Shubkin, Igor N. Sukharev

Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, Воронеж
Voronezh State University of Technical Technologies, Russia, Voronezh
(e-mail: s_shahov@mail.ru, shubkin.92@mail.ru, i.suxarev@yandex.ru)

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности процесса копчения дисперсных продуктов в электростатическом поле, приведены кинетические закономерности процесса насыщения ароматом дыма дисперсных продуктов в лабораторных условиях.

Abstract: Some peculiarities of the process of smoking of disperse products in the electrostatic field are considered, kinetic regularities of the process of saturation of smoke dispersed products with dispersed products in laboratory conditions.

Ключевые слова: дисперсные продукты, электростатическое поле, фенол, кинетика копчения.

Keywords: disperse products, electrostatic field, phenol, smoking kinetics.

Дисперсные продукты, полученные на базе сырья животного и растительного происхождения, являются источником высококачественных легкоусвояемых белков, а также основой продуктов лечебно-профилактического питания различных технологических форм. При этом весьма актуальна задача разработки всё новых видов оригинальных дисперсных продуктов. Одним из перспективных направлений в этой области является расширение ассортимента дисперсных продуктов путем изменения их вкуса и аромата натуральным дымным копчением, что обеспечивает увеличение сроков хранения [2, 3, 9].

Одним из методов интенсификации дымного копчения является использование электростатического поля, которое в значительной мере позволяет существенно интенсифицировать осаждение компонентов дыма на поверхность продукта в процессе копчения. Основной электрической характеристикой процесса электростатического копчения являются сила тока коронного разряда, а интенсивность процесса характеризуется таким параметром, как степень осаждения коптильных компонентов на продукте [1, 7, 10].

Электрическое притяжение, в некоторых случаях прохождения дымовоздушной смеси через продукт, может увеличить эффект осаждения (особенно в начальной стадии) на несколько порядков. Эффективность кулоновского взаимодействия очень велика и практически не зависит от поля скоростей в слое продукта. Это служит объяснением тому, что осаждение происходит по всей поверхности слоя дисперсного продукта [2, 3, 9, 10].

В процессе прохождения через слой дисперсного продукта частицы осаждаются как по всей глубине слоя, так и на входе в результате образования автослоя. По мере накопления частиц в порах слоя эффективность осаждения возрастает. Течение дымовоздушной смеси в слое весьма сложно. Размеры каналов резко меняются, потоки меняют направление, дробятся, сливаются. Это вызывает рост инерционного осаждения. Образование застойных зон в результате флуктуации пористости слоя способствует диффузионному и седиментационному осаждению [3, 9, 10].

Наиболее проникающие частицы имеют размер 0,4…0,9 мкм. Увеличение скорости дымовоздушной смеси сдвигает значение наиболее проникающих частиц в область меньших размеров. Инерционный эффект преобладает при скоростях фильтрации 0,5…0,7 м/с. При более высоких скоростях осаждение в слое ухудшается [3, 9].

В качестве модельного продукта в экспериментах использовались амарантовые хлебцы со следующим составом: мука амаранта крупного помола, крупа кукурузная, крупа рисовая, вода, соль. Исследования свойств дисперсного продукта как объекта копчения проводились в лабораторных условиях на экспериментальной установке для насыщения продуктов ароматом дыма [6].

Одним из веществ, характеризующих процесс копчения, является фенол в готовом дисперсном продукте, анализ содержания которого выполнялся флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02-3М» [4, 7].

В результате экспериментальных исследований кинетики насыщения фенолами дисперсных продуктов при различном уровне остаточного давления, были получены кривые, представленные на рис. 1 - 2. Определение концентрации фенолов проводились в пробах со стороны перфорированного дна контейнера, что позволяет оценить качество проникновения коптильных компонентов через толщу продукта в результате фильтрации дымовоздушной смеси через слой дисперсного продукта.

Анализ представленных кривых (рис. 1) позволяет сделать вывод об интенсификации процесса насыщения фенолами при меньшем уровне остаточного давления. Однако при давлении ниже 20 кПа происходит образование на поверхности слоя дисперсного продукта скопление коптильных компонентов, препятствующего их проникновению внутрь слоя продукта, что отражается на снижении скорости осаждения и концентрации фенолов в дисперсном продукте.

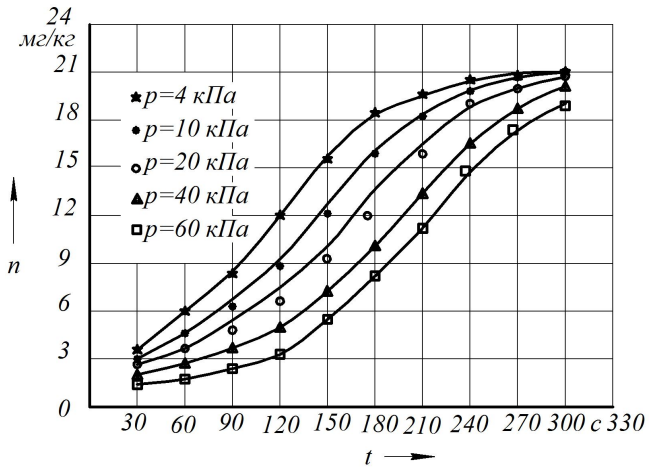


Рис. 1. Зависимости содержания фенолов от времени процесса копчения при различном уровне остаточного давления

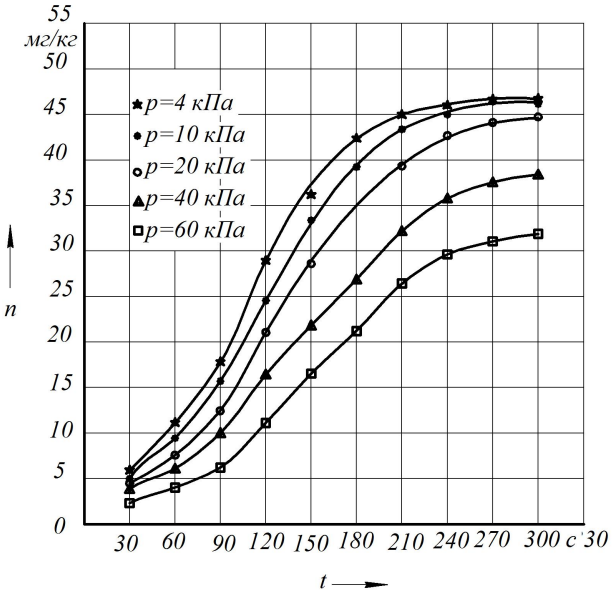


Рис. 2. Зависимости содержания фенолов от времени процесса копчения при различных значениях уровня остаточного давления с использованием электростатического поля

При использовании электростатического поля (рис. 2) увеличивается содержание фенолов в пробах продуктов, но при этом также наблюдается большее и определяющее влияние уровня остаточного давления на накопление фенолов в продукте. Т.е. давление обеспечивает основную функцию (движущую силу) - прохождение дымовоздушной смеси через слой дисперсного продукта для обеспечения насыщения его ароматом дыма, а электростатическое поле играет вспомогательную роль – способствует осаждению коптильных компонентов на поверхность продукта.

Исходя из этого (второстепенной роли электростатического поля), а также из анализа полученных кривых (рис. 3) следует отметить, что увеличение напряженности электростатического поля не дает значительного увеличения концентрации фенолов в продукте. При этом видно, что рациональным диапазоном величины напряженности является 40…60 кВ/м, что свидетельствует о том, что именно в данном диапазоне напряженности происходит возникновение устойчивого коронного разряда на электродах.

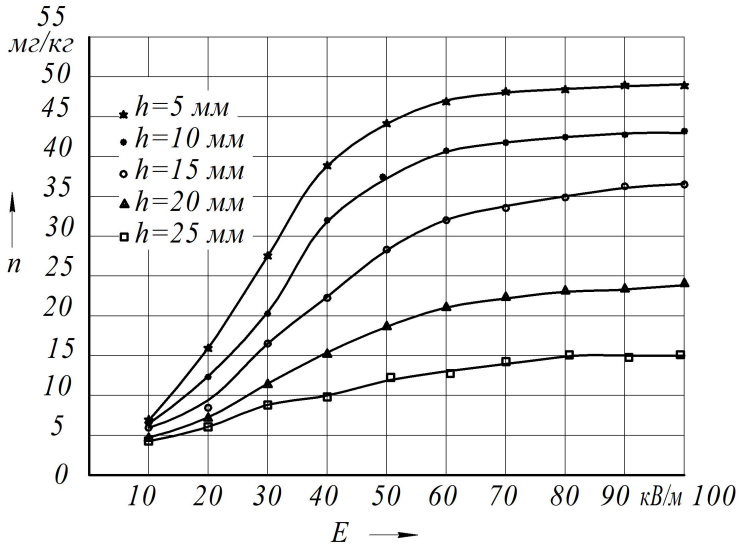


Рис. 3. Зависимости содержания фенолов от напряженности электростатического поля при различных значениях толщины слоя дисперсного продукта

Увеличение влажности дымовоздушной смеси приводит к тому, что коронный заряд начинает возникать при меньших значениях напряженности электрического поля [6].

Увеличение напряженности электростатического поля интенсифицирует осаждение коптильных компонентов, а при увеличении толщины слоя дисперсного продукта происходит снижение интенсивности и концентрации коптильных компонентов дыма и практически прекращается при толщине 25 мм (рис. 3).

Построенные на основе результатов проведенных экспериментов кривые, позволяют определить то, как основные параметры ведения процесса электростатического копчения влияют на его интенсивность, а также оптимальные интервалы регулирования входных факторов для статистического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мезенова О. Я.* Научные основы и технология производства копченых продуктов. О.Я. Мезенова. Калининград: КГТУ, 1997. С. 132.

2. *Шахов С. В.* Установка с внутренней подачей дыма для получения копченых экструдированных продуктов / С. В. Шахов, И. Н. Сухарев, С. Ю. Шубкин, О. В. Мальцева, А. А. Ракитянский // М: Мясная индустрия. 2015. № 5. С. 44-46.

3. *Борисова С. В.* Производство снеков с использованием комплексных пищевых смесей / С.В. Борисова, М.М. Гизатуллина, З.Ш. Мингалеева, О.А. Решетник // Вестник Казанского технологического университета. - 2013. - №14. - С.162-163.

4. *Белоусов В. В.* Теоретические основы процессов газоочистки / В. В. Белоусов; М.. 1988. 256 с.

5. *Горяев, М. И.* Фенолы коптильной жидкости, полученные из лигнина / М. И. Горяев, Л. Н. Быкова, Л. А. Игнатова // Рыбное хозяйство. 1976. № 10. С. 66-67.

6. *Кольцов И. С.* Разработка лабораторной установки для насыщения продуктов ароматом дыма в осцилирующих режимах / И. С. Кольцов, О. А. Ткачев, С. В. Шахов, И. Н. Сухарев, С. Ю. Шубкин // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5 (1). С. 163-164.

7. *Шахов С. В.* Анализ характеристик различных видов копчения / С. В. Шахов, С. Ю. Шубкин, И. Н. Сухарев // Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационное развитие техники пищевых технологий». Воронеж, гос. ун-т инжен. технолог. Воронеж, 2015. С. 182-183.

8. *Камалова Т. Д.* Роль фенолов, кислот и карбонильных соединений в образовании аромата копчения / Т. Д. Камалова, Т. Г. Родина, Ю. И. Чумаков // Сб. науч. тр. МИНХ им. Г.В. Плеханова. Вып. II Товароведение пищевых продуктов. М., 1980. С. 63-68.

9. *Шахов С. В.* Перспективы получения копченых крупнодисперсных продуктов в пересыпающемся слое с использованием электростатического поля / С.В. Шахов, И.Н. Сухарев, С.Ю. Шубкин // Материалы II Международной научно-практической конференции «Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств». Воронеж, гос. ун-т инжен. технолог. Воронеж, 2016. С. 109-111.

10. *Антипов С.Т.* Установка для получения копченых продуктов с развитой структурой и внутренней подачей дыма. Патент на изобретение. / Антипов С.Т., Шахов С.В., Шубкин С.Ю., Ткачев О.А., Сухарев И.Н., Кретов В.В. // № 2551566. Кл. МПК-A23B4/044. 27.05.2015.

УДК 544.722

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОПТИЧЕСКОГО ОТБЕЛИВАТЕЛЯ ТЕТРА-СУЛЬФО-ТИПА

STUDY OF THE KINETIC CHARACTERISTICS THE REVERSE OSMOSIS CONCENTRATION OF AQUEOUS SOLUTIONS OF THE OPTICAL BLEACH TETRA-SULPHO-TYPE

Сергей Александрович Вязовов
Sergey A. Viazovov

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
e-mail: kvsa@mail.ru

Аннотация: Разработана экспериментальная установка и методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая изучить влияние пульсаций давления на кинетические характеристики процесса обратноосмотического концентрирования. Впервые получены экспериментальные данные и изучены зависимости коэффициента задержания от давления и концентрации раствора при обратноосмотическом концентрировании водных растворов белофоров на обратноосмотических мембранах.

Abstrac:. An experimental setup and a technique for carrying out experimental studies have been developed, which makes it possible to study the influence of pressure pulsations on the kinetic characteristics of the reverse osmosis concentrating process. Experimental data were obtained for the first time and the dependences of the retention factor on the pressure and concentration of the solution in the reverse osmosis concentration of aqueous solutions of white bleaching agents on reverse osmosis membranes were studied.

Ключевые слова: обратный осмос, мембрана, коэффициента задержания, пульсации давления.

Keywords: reverse osmosis, membrane, retention factor, pressure pulsation.

Во всем мире происходит интенсивное развитие мембранной технологии. Она широко применяется для концентрирования и разделения водных растворов солей в различных отраслях промышленности [1, 2].

В химической промышленности, при производстве оптических отбеливателей, образуется большое количество промышленных белофоросодержащих растворов, которые для дальнейшего использования необходимо сконцентрировать. Для решения данной задачи на промышленных предприятиях применяется фильтрование [3, 4]. Недостатком этой технологии очистки являются большой расход сбросных вод при отсутствие систем по их повторному использованию. Обратноосмотическое концентрирование промышленных растворов позволит минимизировать потери целевого продукта через стоки и использовать очищенную воду в производстве.

Для исследования кинетических характеристик процесса обратноосмотического концентрирования водных белофоросодержащих растворов использовались различные типы промышленных мембран: обратноосмотические композитные мембраны ОПМ-КМ, обратноосмотические ацетатцеллюлозные мембраны МГА-95П (ОАО «Владипор» г. Владимир), обратноосмотические композиционные полиамидные мембраны ESPA 1 (Hydranautics, компания «Nitto Denko» Япония).

В качестве объектов исследования использовались модельные растворы, а также промышленные растворы, получаемые в процессах синтеза полупродуктов оптических отбеливателей на линиях ОАО «Пигмент» (г. Тамбов). В качестве модельных растворов использовались растворы веществ, входящие в состав промышленных стоков. Исследования коэффициента задержания мембран проводились на установке, представленной на рис. 1.

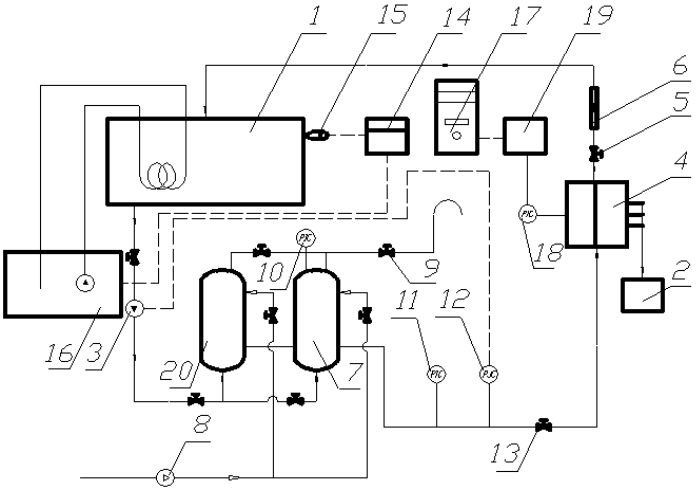


Рис. 1. Схема экспериментальной обратноосмотической установки

Основным разделительным элементом установки является рабочая ячейка 4, в которой непосредственно происходит процесс обратноосмотического концентрирования. Из расходной емкости 1 через систему вентилей раствор нагнетался в камеру концентрирования плунжерным насосом НД 100/63 3. Пройдя дроссель 13, рабочую ячейку 4, дроссель 5 и ротаметр 6, частично разделенный раствор возвращался обратно в расходную емкость 1. Для контроля давления в установке предусмотрены образцовые манометры 10 и 11, электроконтактный манометр 12. Для исследования влияния пульсирующего потока на процесс концентрирования ячейка 4 была оснащена пьезоэлектрическим датчиком ЛХ-409 18, который подключен к крейтовой системе LTC-002/25 19. Это модульная система сбора данных с датчиков и управления в задачах промышленной и лабораторной автоматизации. Крейтовая система LTC-002/25, в свою очередь, подключена по коаксиальному кабелю к ПЭВМ 17. Температура раствора в системе поддерживалась водяным термостатом 16 и измерялась потенциометром 14 посредством термопары 15. Жидкость, прошедшая в процессе разделения через мембрану, собиралась в емкость 2. Регулировка давления в

системе осуществлялась игольчатым вентилем 5. Аварийный сброс давления в системе осуществляется игольчатым вентилем 9. В установке предусмотрена система ресиверов 7 и 20, которые представляют собой цилиндрические сосуды объемом 3,5 · 10–3 м3, предварительно заполненные сжатым воздухом компрессором 8, до давления, составляющего 10…40 % от рабочего.

Значение коэффициента задержания *K* определяли по формуле

$$K = 1 - \left(C_{\text{пер}} / C_{\text{исх}}\right). \quad (1)$$

где $C_{пер}$ – концентрация белофора в пермеате, кг/м^3; $C_{пер}$ – концентрация белофора в исходном растворе, кг/м^3.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ. Коэффициент задержания исследовался при наложении внешних факторов (давления, концентрации) на процесс концентрирования. Влияние различных параметров (давления, концентрации) изучали на мембранах ESPA 1, МГА-95П, ОПМ-КМ и на растворах белофоров ОБ-жидкого, концентрации 20,9…65,8 кг/м^3. Результаты экспериментов представлены на рис. 2-4.

Проведенные эксперименты выявили следующие закономерности. На всех типах мембран с увеличением величины давления наблюдается увеличение коэффициента задержания мембран. Вероятно, это связано с увеличением конвективной составляющей процесса обратноосмотического концентрирования [5]. Также исследовалось влияние на коэффициент задерживания мембран поля давлений при различных исходных концентрациях раствора белофоров ОБ-жидкого. Концентрация растворенных веществ в разделяемом растворе является одним из основных факторов, определяющих не только характеристики процессов обратного осмоса, но и саму возможность использования этих методов разделения. При увеличении концентрации белофора ОБ-жидкого коэффициент задержания для мембран МГА-95П, ESPA 1, ОПМ-КМ уменьшается. Это объясняется тем, что увеличение концентрации растворенных веществ приводит к повышению осмотического давления раствора, что снижает эффективную движущую силу процесса, а также к возрастанию вязкости раствора [6].

При расчете коэффициента задержания мембран использовалась модифицированная формула на основе предложенной Б.В. Дерягиным, Н.В. Чураевым, Г.А. Мартыновым, В.М. Старовым [7], которая для наших исследований после преобразований имеет вид:

$$k = 1 - \frac{\Delta\mu}{1 + \left(\frac{1}{k_{\text{р}} k_1} - 1\right)\left[1 - \exp\left(-\frac{Ghk_{\text{р}}k_2}{P_{\text{д}}}\right)\right]\exp\left(-\frac{G0{,}0002\,1k_3}{P\sqrt{w}}\right)}. \quad (2)$$

где k_p – коэффициент распределения; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, зависящие от типа исследуемого раствора и мембраны; $\Delta\mu$ – коэффициент, учитывающий влияние поля пульсаций давления на коэффициент задержания мембраны.

$$\Delta\mu = m^{A_p b}, \quad (3)$$

где – A_p амплитуда пульсации, МПа; *m* и *b* – эмпирические коэффициенты.

После обработки экспериментальных данных были получены конкретные значения коэффициентов k_1, k_2, k_3, *m*, *b* для исследованных растворов белофоров ОБ-жидкого, мембран МГА-95П, ОПМ-КМ, ESPA 1 (таблицы 1, 2).

Таблица 1. Значения коэффициентов k_1, k_2, k_3

Мембрана	k_1	k_2	k_3
МГА-95П	$0{,}68\cdot10^{-3}$	0,058289	1,111142
ESPA 1	$9{,}64\cdot10^{-6}$	$1{,}3969\cdot10^{-5}$	0,539192
ОПМ-КМ	$6{,}09\cdot10^{-3}$	0,008975·	0,488309

Таблица 2 Значения коэффициентов *m, b*

Мембрана	*m*	*b*
ESPA	0,672	0,973
МГА-95П	0,816	0,941
ОПМ-КМ	0,761	0,965

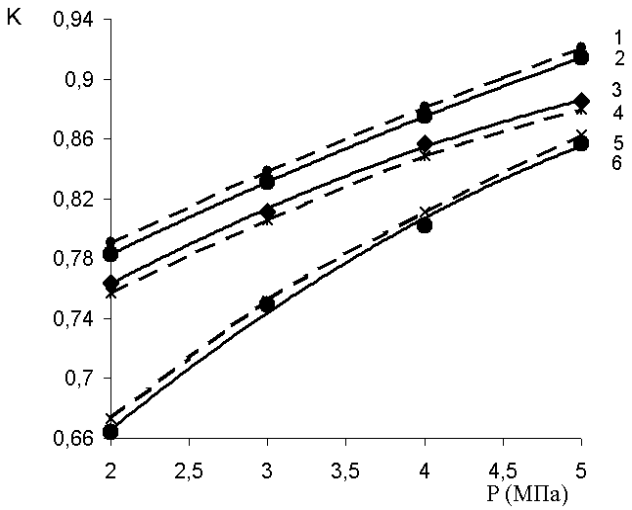


Рис. 2. Зависимость коэффициента задержания *K* мембраны МГА-95П от давления *P* при исходной концентрации *C*: 20,9; 45; 65,8 кг/м^3.
—— – эксперимент, – – – – расчет
1, 2 – $C_{исх}$ = 20,9 кг/м^3; 3, 4 – $C_{исх}$ = 45 кг/м^3; 5, 6 – $C_{исх}$ = 65,8 кг/м^3

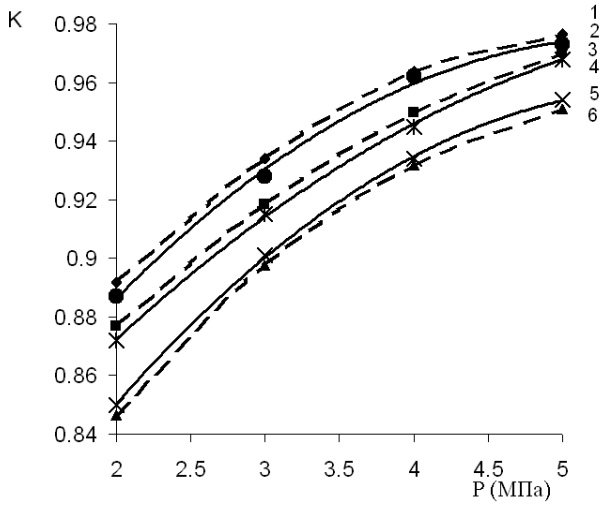


Рис. 3. Зависимость коэффициента задержания *K* мембраны ESPA 1 от давления *P* при исходной концентрации *C*: 20,9; 45; 65,8 кг/м^3.
—— – эксперимент, – – – – расчет
1, 2 – $C_{исх}$ = 20,9 кг/м^3; 3, 4 – $C_{исх}$ = 45 кг/м^3; 5, 6 – $C_{исх}$ = 65,8 кг/м^3.

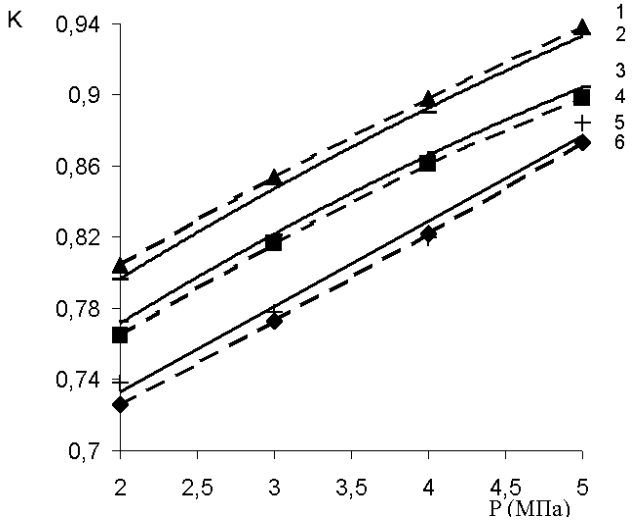


Рис. 4. Зависимость коэффициента задержания *K* мембраны ОПМ-КМ от давления *P* при разной исходной концентрации *C*: 20,9; 45; 65,8 кг/м^3.
—— – эксперимент, – – – – расчет
1, 2 – $C_{исх}$ = 20,9 кг/м^3; 3, 4 – $C_{исх}$ = 45 кг/м^3; 5, 6 – $C_{исх}$ = 65,8 кг/м^3.

При одних и тех же параметрах процесса коэффициент задержания для мембраны ESPA несколько выше, чем для мембраны ОПМ-К и значительно выше для мембраны МГА-95К. Это связано с различной пористостью активного слоя мембраны, знаком заряда поверхности мембран, с различным распределением пор по радиусам в активном слое, а также с различием в природе материалов и структурных характеристик [8]. При

исследовании закономерностей влияния различных параметров на процесс обратноосмотического концентрирования водных растворов белофоров ОБ-жидкого установлено влияние пульсирующего потока раствора, наложенного на систему мембрана-раствор, на коэффициент задержания мембран. При этом происходит отклонение данных значений от значений этих характеристик при проведении процесса без наложения пульсирующего потока на всех исследуемых типах мембран. Значения отклонения в данном случае характеризуются типом растворенного вещества, концентрацией и величиной пульсаций давления A_p. Проведенные эксперименты выявили следующие закономерности. На всех типах мембран с увеличением величины пульсации давления A_p наблюдается увеличение коэффициента задержания. Вероятно, это связано с увеличением интенсивности турбулизации прилегающей к поверхности мембран слоя жидкости, а соответственно уменьшением вредного влияния концентрационной поляризации, что, в свою очередь, влияет на ускорение переноса растворенного вещества в ядро разделяемого раствора [9, 10].

Сравнение экспериментальных значений с расчетными данными показало удовлетворительное совпадение с погрешностью не превышающей ±5-10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baker R.W. Membrane technology and applications. H.: WILEY, 2004, 538 p
2. Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет. М.: Химия, 1986, 272 с.
3. Пат. № 2544696 РФ, МПК C09B67/54; B01D43/00; B82B1/00. Способ удаления водорастворимых примесей из суспензий органических продуктов / Орехов В.С., Леонтьева А.И., Субочева М.Ю., Труфанов Д.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ТГТУ. - № 2012146964/05; заявл. 02.11.2012.
4. Леонтьева А.И., Орехов В.С., Субочева М.Ю., Колмакова М.А. Исследование кинетики процесса удаления водорастворимых примесей из плотных осадков на фильтровальной перегородке Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2013. Т. 56. № 8. С. 122-126.
5. Hsieh H.P. Inorganic Membranes for Separation and Reaction. H.: Elsevier, 1996, 591 p.
6. Дытнерский Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация. М.: Химия,1978, 352с.
7. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Мартынов Г.А., Старов В.М - М.: Химия и технол. воды. 1981. Т. 3, № 2. С. 99-104.
8. Дубицкая Н.И., Перлов С.А. Применение метода обратного осмоса для очистки сточных вод//Бумажная пром-ть. 1987. № 6. С. 5-6
9. Лейси Р.Е., Леба С. Технологические процессы с применением мембран/пер. с англ. Л.А. Мазитова и Т.М. Мноцаканян. М. Мир, 1976. 370 с
10. Хванг С.-Т., Каммермейер К. Мембранные процессы разделения/пер. с англ.; под ред. Ю.И. Дытнерского. М.: Химия, 1981. 464 с

УДК 66-096.2; 662.8

СВЕРХКРИТИЧЕСКАЯ ФЛЮИДНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ
THE SUPERCRITECAL FLUID EXTRACTION OF SOLID FOSSILS

Денис Геннадьевич Филенко, Ренат Фархадович Джафаров, Мирали Нуралиевич Дадашев, Владимир Арнольдович Винокуров
Denis Gennadyevich Filenko, Renat Farhadovich Djafarov, Mirali Nuralievich Dadashev, Vladimir Arnoldovich Vinokurov

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Россия, Москва
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)», Russia, Moscow
(e-mail: denfile@yandex.ru, rdjafarov@yandex.ru, jnus@mail.ru, vinok_ac@mail.ru)

Аннотация: Показана область применения сверхкритической флюидной экстракции. Авторами создана экспериментальная установка и предложен оригинальный способ достижения сверхкритического состояния диоксида углерода в реакторе цилиндрического типа, в который предварительно поместили один из материалов для его обработки.

Abstract: The field of application of supercritical fluid extraction is shown. The authors created an experimental setup and proposed an original method for achieving the supercritical state of carbon dioxide in a cylindrical type reactor in which one of the materials for its processing was previously placed.

Ключевые слова: критическая точка, сверхкритический флюид, термодинамические параметры, термодинамика, сверхкритическая экстракция, горючие сланцы, углеводороды.

Keywords: critical point, supercritical fluid, thermodynamic parameters, thermodynamics, supercritical extraction, combustible shales, hydrocarbons.

Сверхкритическая флюидная экстракция (СКФЭ) – процесс экстракции с использованием сверхкритического флюида в качестве растворителя. Сверхкритическая экстракция – относительно новое направление; изучение и исследования в этой области активно проводятся с начала 1970-х гг. Процесс осуществляется при контактировании смеси с газообразным экстрагентом при температуре и давлении выше критической точки. Критическая точка – это сочетание значений температуры и давления, при которых исчезает различие в свойствах жидкой и газообразной фаз вещества [1]. В настоящее время наибольшее распространение в качестве экстрагентов получили углекислый газ, этан, этилен, вода, пропан и др.

Использование в качестве экстрагента флюидов в сверхкритическом состоянии позволяет производить углубленную переработку исходного сырья в различных отраслях промышленности: нефтехимической, пищевой, фармацевтической и др.

Большое число работ посвящено извлечению различных веществ с использованием сверхкритического CO_2 из-за его высокой растворяющей способности, дешевизны, доступности, нетоксичности и невысоких критических параметров (критическая температура – 31,1 °С, критическое давление – 7,36 МПа) [2]. Для сравнения, у воды критические параметры следующие: критическая температура – 374,2 К, критическое давление – 22,13 МПа. Невысокие критические параметры делают CO_2 наиболее доступным экстрагентом.

В настоящий момент область применения сверхкритической флюидной экстракции довольно широка. Сверхкритической флюидной экстракции нашлось место в процессах добычи и переработки нефти и газа. Повышение нефтеотдачи пласта – одна из актуальных и сложных задач. Аномально высокая растворяющая способность экстрагентов в сверхкритическом состоянии способствует максимальному извлечению нефти из пластов. Известно, что в нефтяные пласты для третичного извлечения нефти обычно вводят легкие

углеводороды: метан, пропан, смесь метана, этана, пропана и бутана. Диоксид углерода в сверхкритическом состоянии может быть хорошей заменой в качестве растворителя дорогим углеводородам [4].

Для получения ультратонких порошковых материалов также возможно применение сверхкритической экстракции. Одна из основных стадий приготовления порошковых материалов – осушка, в ходе которой вода и растворитель должны удаляться с поверхности порошка. В процессе осушки неизбежно их агрегирование, связанное с наличием границы раздела фаз газ–жидкость (при испарении растворителя) и большого поверхностного натяжения. Чтобы избежать этого эффекта, можно использовать технологию сверхкритической экстракции. Для этого используют диоксид углерода, т.к. в сверхкритическом состоянии он имеет высокую плотность и способен хорошо растворять воду [4].

Авторами настоящей работы предложен оригинальный способ достижения сверхкритического состояния диоксида углерода в реакторе цилиндрического типа, в который предварительно поместили один из материалов для его обработки веществом, имеющим сверхкритические параметры. Оригинальность способа позволила разработать технологическую схему экстракции твердых горючих ископаемых диоксидом углерода.

Реактор представляет собой толстостенный полый цилиндр с фланцевыми соединениями с обеих сторон. Фланцевое соединение выполнено в соответствии с ГОСТ 12815-80 [5]. К фланцам приварены штуцеры с регулирующими вентилями. Перед началом заправки реактора диоксидом углерода оба вентиля открыты для предварительной продувки (вытеснения воздуха) полости реактора, в котором находится гранулированный углеродосодержащий материал. Продувка осуществляется из углекислотного баллона. После продувки концевой вентиль закрывается, а со стороны баллона остается открытым. Схема установки приведена на рисунке.

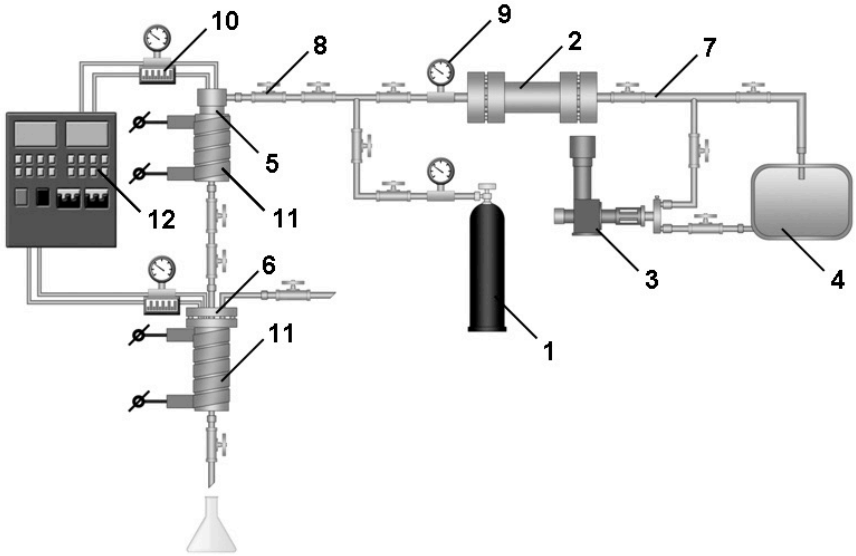


Рис. 1 Принципиальная схема установки сверхкритической флюидной экстракции.
1 – емкость с газом; 2 – цилиндр высокого давления с поршнем; 3 – водяной насос высокого давления; 4 – емкость для воды; 5 – экстрактор; 6 – сепаратор; 7 – трубопроводная арматура; 8 – запорная арматура; 9 – датчик давления; 10 – датчик температуры; 11 – нагреватель; 12 – блок автоматики.

Затем реактор помещается в холодильную камеру и выдерживается до охлаждения содержимого реактора до заданной температуры. Редуктором баллона создается необходимое давление для получения в реакторе парожидкостной смеси диоксида углерода. В холодильном аппарате имеется возможность достижения температуры до минус 45 °С. Давление, создаваемое в реакторе, зависит от давления в баллоне. При достижении требуемых параметров, вентиль со стороны баллона закрывается и отсоединяется от

баллона. Далее реактор помещается в климатическую камеру, где подвергается нагреву до необходимых термодинамических параметров, соответствующих сверхкритическому состоянию CO_2. Процесс нагрева осуществляется при изохорном процессе. При заданных параметрах реактор находится в течение не менее 2 часов. После этого один из вентилей подсоединяется к сепаратору-отделителю. При открытии подключенного вентиля происходит выход растворенных веществ ТГИ и CO_2. Давление в реакторе снижается до атмосферного. Жидкие углеводороды направляются на анализ. Оставшийся в реакторе твердый остаток также подвергают исследованию.

В настоящее время проводится анализ твердого остатка и жидких углеводородов, результаты которого позволят составить программу дальнейших исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-01749 «а».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анисимов М.А., Рабинович В.А., Сычев В.В.* Термодинамика критического состояния индивидуальных веществ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 190 с.

2. Сверхкритическая экстракция // [http://www.terraaromatica.ru/sverhkriticheskaya-so2-ekstraktsiya-i-17.html]

3. *Павлуша Е.С., Патраков Ю.Ф., Фѐдорова Н.И.* Лабораторная полупроточная установка высокотемпературной сверхкритической флюидной экстракции твердых горючих ископаемых // Вестник КузГТУ. 2001. № 1. С. 118-119.

4. *Филенко Д.Г., Дадашев М.Н., Винокуров В.А., Григорьев Е.Б.* Сверхкритическая флюидная технология в нефтепереработке и нефтехимии // [http://cyberleninka.ru/article/n/issledovanievliyaniya-termobaricheskih-usloviy-na-vytesnenie-nefti-dioksidomugleroda-v-sverhkriticheskom-sostoyanii]

5. ГОСТ 12815-80 Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов.

УДК 536.24

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕХОДНОГО И СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ СУШКЕ ТКАНЕЙ
CHARACTERISTICS OF TRANSITION AND STATIONARY MODE OF HEAT AND MASS TRANSFER IN DRYING FABRIC

Ольга Роальдовна Дорняк*, Мария Константиновна Кошелева,**
Татьяна Александровна Новикова **
Olga Roaldovna Dornyak*, Maria Konstantinovna Kosheleva,**
Tatyana Aleksandrovna Novikova **

**Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.Морозова, Россия, Воронеж*
**Voronezh state forestry engineering University named after G. F. Morozov, Russia, Voronezh (e-mail: etgvglta@mail.ru)*
*** Российский государственный университет им. А.Н Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва*
***The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow (e-mail: oxtpaxt@yandex.ru)*

Аннотация: Определены диапазоны изменения безразмерных критериев тепломассопереноса при конвективной сушке хлопчатобумажных тканей, позволяющие выделить возможные предельные режимы процесса сушки.

Abstract: The ranges of change of the dimensionless criteria of a heatmass transfer at convective drying of cottons allowing to allocate a possible limiting process conditions of drying are determined.

Ключевые слова: тепло- и массоперенос, капиллярно-пористые материалы, многофазные системы, сушка, ткани.

Keywords: heat and mass transfer, capillary and porous materials, multiphase systems, drying, fabric.

Для описания процессов тепло- и массопреноса при сушке тканей используются различные подходы. Тканые материалы, получаемые из природного сырья, являются гетерогенными системами, имеют сложную неоднородную структуру. При их термо- и влагообработке происходят различные взаимосвязанные процессы на микро- и макроуровнях, поэтому математическое моделирование явлений тепло- и массопереноса в тканях с использованием методологии механики гетерофазных систем [1-2] представляется в наибольшей степени отвечающим современным требованиям развития техники и технологий.

В работе [3] сформулирована математическая модель тепло- и массопереноса в тканых материалах при конвективной сушке, учитывающая, в частности, изменение пористой структуры материала и позволяющая описать динамику усадки ткани при ее обезвоживании.

Континуальные уравнения для макроскопических параметров жидкой, твердой и газообразной фаз системы получены методом объемного усреднения соответствующих микроуравнений отдельно для каждой из фаз.

Предполагается, что газовая фаза состоит из двух компонент – неконденсирующегося газа и водяного пара. Давление в парогазовой смеси определяется законом Дальтона для смеси идеальных газов. Для описания движения компонент введены среднемассовая скорость смещений элементарных макрообъемов газовой фазы и диффузионные скорости пара и газа. Относительное движение компонент определяется законом бинарной диффузии Фика. Математическая модель включает уравнения сохранения массы для парогазовой смеси и газовой компоненты, уравнение движения и теплопроводности парогазовой фазы.

Описание поведения жидкой фазы основано на уравнении сохранения массы, уравнении движения вязкой жидкости (без учета конвективного переноса, массовых сил и динамических эффектов фазовых переходов) и уравнении теплопроводности. Характеристики переноса воды зависят от типа ее связи с твердой фазой. При описании гидродинамических процессов в тканях применяется дополнительное усреднение по трем объемам - свободной воды, воды в смачивающих пленках и в тонких прослойках, которые не имеют общих границ с газообразной фазой [4].

Для твердой фазы использовано уравнение теплопроводности.

Уравнения переноса массы, количества движения и внутренней энергии отдельных фаз дополняют уравнения сохранения на межфазных поверхностях, записанные в виде балансовых соотношений. Взаимосвязь между давлением и температурой вдоль линии насыщения определяется уравнением Клапейрона-Клаузиса. В процессе сушки происходит изменение удельных площадей поверхностей контактного взаимодействия трех фаз изучаемой гетерогенной системы. Предложена расчетная схема определения удельной площади поверхности раздела фаз жидкость - парогазовая смесь, жидкость - твердая фаза, парогазовая смесь - твердая фаза. Краевые условия на внешних границах образца для температуры отдельных фаз, концентрации и давления пара записаны в форме условий 3 рода. Объемная концентрация жидкой фазы в поверхностной зоне соответствует равновесной. Начальные условия отражают произвольные распределения усредненных переменных по объему материала.

Как видно, из приведенного выше описания математической модели, представленной в [3], она достаточно сложна для анализа. В данной работе выполнены оценки, цель которых возможное упрощение математической модели в определенных режимах сушки [3].

Характерное время распространения «температурной волны» в газообразной, жидкой и твердой фазах хлопковой ткани $t_{Ti}=H^2/a_i$ (i=1,2,3), где a – коэффициент температуропроводности, $a=\lambda/\rho c_p$. Для толщины материала из диапазона $H=0.25\cdot10^{-3}\div1\cdot10^{-3}$ м

получаем t_{T1}=0.003÷0.04 с, t_{T2}=0.4÷6.4 с, t_{T3}=2.8÷44.85 с. Учитывая, что, время конвективной сушки хлопчатобумажных тканей имеет порядок t_{dr}~10^3 с, можно сделать вывод о том, что длительность переходного температурного процесса во всех фазах существенно меньше, чем длительность всего процесса сушки t_{T1}<<t_{dr}, t_{T2}<<t_{dr}, t_{T3}<<t_{dr}. Числа Фурье Fo_i= $a_i \cdot t_{dr}/H^2$, i=1,2,3, рассчитанные для газообразной, жидкой и твердой фаз имеют значения: Fo_1=$0.22\cdot10^5$÷$0.35\cdot10^6$, Fo_2=$0.15\cdot10^3$÷$0.25\cdot10^4$, Fo_3=$0.22\cdot10^2$÷$0.35\cdot10^3$. Таким образом, Fo_1>>1 и Fo_2>>1 для жидкой и газообразной фазы во всем рассмотренном диапазоне параметров и инерционным членом в уравнении теплопроводности этих фаз можно пренебречь. Для твердой фазы число Фурье велико только для тонких тканей, имеющих толщину H<1 мм. Для более толстых тканей переходный процесс развития температурного поля в твердой фазе может быть сравним в интенсивных режимах сушки с длительностью процесса. Отметим, что в парогазовой фазе температура в поперечном сечении ткани устанавливается за наименьшее время, в твердой фазе, наоборот, для установления температурного профиля требуется наибольшее время: t_{T1}<t_{T2}<t_{T3}.

Важна оценка чисел Пекле, характеризующих соотношение конвективного и кондуктивного потоков тепла: $Pe_i=v_iH/a_i$, i=1,2, v – скорость потока,.

Число Пекле зависит от скорости течения газа и жидкости в пористой системе ткани при сушке. Этот параметр – можно отнести к зависимым переменным, определяемым в результате решения задачи. Воспользуемся результатами численного решения задачи в полной постановке [3], которые позволяют взять для оценочных расчетов следующие значения скорости пара и жидкости: v_1=$1.1\cdot10^{-4}$÷$9.7\cdot10^{-5}$ м/с, v_2=$3.2\cdot10^{-6}$÷$1.7\cdot10^{-5}$ м/с. Минимум и максимум этих диапазонов скоростей относится к режимам сушки с температурой сушильного агента T_c=19.5°C и T_c=42°C соответственно. В этих режимах относительная влажность воздуха составляла φ_c=80%, а его скорость - v_c=2м/с. Отметим, что указанные расчеты дали удовлетворительное количественное совпадение с экспериментами по кинетике сушке хлопчатобумажных тканей [5].

Значения чисел Пекле для этих режимов получены в следующих интервалах: Pe_1= $1.2\cdot10^{-3}$÷$4.3\cdot10^{-3}$, Pe_2=$5.2\cdot10^{-3}$÷$1.1\cdot10^{-1}$, т.е. Pe_1<<1, Pe_2<<1. Как известно, при малых числах Пекле преобладает молекулярная теплопроводность и конвективными слагаемыми в уравнениях теплопроводности парогазовой смеси и жидкости можно пренебречь [6].

Таким образом, тепловой процесс в каждой из фаз является квазистационарным, мгновенно подстраивающимся под изменяющиеся со временем значения объемной концентрации фаз и плотности тепловых источников и определяется, в основном, механизмом молекулярного теплопереноса.

Оценки чисел Рейнольдса для газообразной и жидкой фаз $Re_i=v_iH\rho_i/\mu_i$, i=1,2, дают значения существенно меньше, чем 1: Re_1=$3.3\cdot10^{-2}$÷$1.2\cdot10^{-1}$, Re_2=$8.0\cdot10^{-4}$÷$1.7\cdot10^{-2}$. Это позволяет не учитывать силы вязкого сопротивления течению в обеих фазах, по сравнению с силами инерции и силами сопротивления фильтрационному переносу. Поскольку вклад конвективных членов в изменение скорости жидкой и газовой компонент мал, как видно из оценок для значений скоростей, то уравнения движения в первой и второй фазах можно использовать в форме уравнения Дарси.

Для уравнения сохранения массы газовой компоненты в парогазовой смеси выполнены оценки диффузионного числа Фурье $Fo_D=H^2/(D\cdot t_{хар})$ и диффузионного числа Пекле Pe_D= vH/D, где D – коэффициент бинарной диффузии: $Fo_D = 0.22 \cdot 10^5 \div 0.35 \cdot 10^6$, $Pe_D = 1.3 \cdot 10^{-3} \div 4.5 \cdot 10^{-3}$. Т.е. данные критерии имеют малые значения. Вследствие этого уравнение параболического типа для концентрации пара преобразуется в стационарное. Вкладом конвективных членов в этом уравнении также можно пренебречь.

В условиях квазистационарного приближения, которое справедливо в достаточно широком диапазоне изменения параметров задачи, профили температуры в отдельных фазах определяются условиями внешнего теплообмена [6], которые характеризуются числами Нуссельта для 1 и 2 фазы – $Nu_i=\alpha_i^{\Gamma}H/\lambda_i$ (i=1,2) и числом Био для третьей фазы – $Bi_3=\alpha_3^{\Gamma}H/\lambda_3$.

Для концентрации газовой компоненты определяющим критерием является массообменное число Нуссельта.

Для оценок примем коэффициенты теплопередачи, соответствующие следующим значениям: $\alpha_1^{Г}$=25 Вт/(м^2·К), $\alpha_3^{Г}$=12 Вт/(м^2·К), $\alpha_3^{Г}$=1.4 Вт/(м^2·К).

Число Био Bi_3=0,009375÷0,0375. Следовательно, после переходного процесса в твердой фазе устанавливается равномерный по толщине ткани профиль температуры. Ту же особенность следует ожидать для профиля температуры в жидкой фазе, поскольку Nu_2<<1 (Nu_2=0,0046÷0,019). Значение теплообменного числа Нуссельта для парогазовой фазы Nu_1 имеет порядок 1 (Nu_1=0,25÷1) и внешнее термосопротивление невелико. Скорость нагревания паровоздушной смеси будет зависеть от интенсивности внутренних тепловых источников, которые определяются в данном случае значениями коэффициентов теплообмена между фазами на внутренних межфазных границах, кроме того некоторый вклад может внести поглощение или выделение тепла при фазовых переходах.

Характер стационарных профилей концентрации паровой компоненты в парогазовой смеси определяется критерием $Nu_{1D}^{Г}=H\gamma_\chi/D$, где γ_χ – эмпирический коэффициент, м/с.

При значениях $Nu_{1D}^{Г}$<<1 сопротивление диффузионному переносу пара во внешнюю среду весьма велико. В этом случае процесс сушки малоэффективен, т.к. концентрация пара в образце не может снижаться вследствие диффузионного механизма выравнивания концентраций пара в материале и в окружающей среде. При числах $Nu_{1D}^{Г}$>>1 концентрация пара практически мгновенно подстраивается под изменяющиеся условия взаимодействия материала с окружающей средой. Если $Nu_{1D}^{Г}$~1, на формирование профиля концентраций паровой компоненты влияют другие теплофизические переменные.

Выполненный анализ тепловых и гидродинамических режимов конвективной сушки тканей показал, что при моделировании связанных процессов тепло- и массопереноса возможно применение квазистационарных уравнений для большей части теплофизических переменных. Характеристики стационарных решений зависят от критериев внешнего тепло- и массообмена и не отличаются от известных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нигматулин Р.И.* Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.

2. *Whitaker S.* Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying. Advances in Heat Transfer. 1977, Т. 13. P. 119–203.

3. *Дорняк О. Р., Кошелева М. К.* Математическая модель сушки тканных материалов // Тезисы докладов и сообщений : 15 Минский международный форум по тепло- и массообмену, 23-26 мая 2016 г. / Нац. АН Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова. - Минск : Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, 2016. - С. 120-125.

4. *Дорняк О.Р.* Тепломассоперенос в ненасыщенных коллоидных капиллярно-пористых анизотропных материалах. Автореф. дис... докт. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 2007. 32 с.

5. *Сажин Б.С, Кошелева М.К., Сажина М.Б.* Процессы сушки и промывки текстильных материалов. М.: ФГБОУ ВПО “ МГУДТ”, 2013. 301 с.

6. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.

УДК 674.04

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЭКСТРАКЦИИ В ПРОЦЕССАХ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДРЕВЕСНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
MODERN METHODS OF EXTRACTION IN PROCESSES OF IMPROVING THE QUALITY OF WOOD COMPOSITE MATERIALS

Фарида Василовна Назипова, Радис Решидович Зиатдинов, Руслан Рушанович Сафин
Farida V. Nazipova, Radis R. Ziatdinov, Ruslan R. Safin

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань
Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan
(e-mail: faridaN13@mail.ru)

Аннотация. Рассмотрены некоторые способы обработки древесного наполнителя в производстве композиционных материалов, приведены результаты экспериментального исследования в лабораторных условиях.

Abstract. Some methods of treating wood filler in the production of composite materials are considered, and the results of experimental studies in laboratory conditions are presented.

Ключевые слова: древесно-композиционные материалы, щелочная обработка, ультразвук.

Keywords: wood-composite materials, alkaline treatment, ultrasound.

В настоящее время широкое распространение по всему миру получили цементно-стружечные плиты (ЦСП), представляющие собой листовой материал, получаемый прессованием смеси, состоящей из цемента, древесного наполнителя, минеральных вяжущих веществ, химических добавок, ускоряющих твердение цемента и улучшающих свойства древесно-минерального материала, и воды. По сравнению с традиционными древесными материалами, применяемыми в строительстве, ЦСП имеет ряд преимуществ: они негорючи, нетоксичны, био- и атмосферостойки [1-3].

В этом исследовании особое внимание уделяется утилизации отходов деревообрабатывающей промышленности [4-7]. Эти материалы могут быть преобразованы посредством разнообразных физико-химических обработок в различные потоки продуктов, которые затем могут быть переработаны в конечные продукты, такие как полимерные композиты или ЦСП [8, 9].

Древесный наполнитель обладает рядом уникальных свойств: малая плотность, хорошая смачиваемость, легкость обработки. Однако некоторые свойства древесины отрицательно сказываются на процессе структурообразования, прочности и стойкости цементно-стружечных плит к влаге. Частицы древесного наполнителя обладают упругостью, что сказывается на уплотнении материала. Химический состав древесины также изменяется под влиянием сильной щелочной среды, которая создается минеральными вяжущими веществами. В таких условиях в первую очередь деструктируются легкогидролизуемые углеводы, что отрицательно влияет на твердение цементного теста. Поэтому древесина лиственных пород, содержащая большее, чем хвойная древесина, количество легкогидролизуемых гемицеллюлоз, в меньшей степени пригодна для получения высококачественных материалов. В настоящее время существует несколько методов борьбы с «цементными ядами» (веществами, задерживающими твердение): варка древесины, выдержка древесины на воздухе с целью окисления сахаров и перехода их в нерастворимое состояние, обработка древесных частиц растворами хлорида кальция, жидкого стекла, извести, сернокислого глинозема и т.д.

В работе Аминова Л.И. [10] представлены результаты исследований основных свойств композиционного материала, созданного на основе термически модифицированной древесины и портландцемента марки 400 в качестве минерального вяжущего. Установлено, что термическое воздействие на наполнитель снижает водоцементное соотношение, что

может быть объяснено существенным снижением содержания гемицеллюлоз и снижением водопоглощения термомодифицированными древесными частицами по сравнению с необработанными. Исследования на морозостойкость данных видов образцов позволили установить повышение данного показателя с повышением температуры обработки.

Основным процессом извлечения экстрактивных веществ из растительного сырья является процесс экстрагирования в системе «твердое тело–жидкость». Ультразвук ускоряет процесс экстрагирования и обеспечивает более полное извлечение нужных веществ [11]. Воздействие ультразвука создает кавитацию и турбулентные потоки в жидком экстрагенте, в результате происходит быстрое набухание материала и растворение содержимого клетки, увеличивается скорость обтекания частиц сырья, в пограничном диффузионном слое возникают турбулентные и вихревые потоки. Молекулярная диффузия внутри частиц материала и в пограничном диффузионном слое практически заменяется конвективной, что приводит к интенсификации массообмена. В результате кавитации происходит разрушение клеточных структур, что ускоряет процесс перехода растворимых веществ в экстрагент за счет их вымывания. Сильные турбулентные течения, гидродинамические потоки способствуют переносу масс, растворению веществ, происходит интенсивное перемешивание содержимого даже внутри клетки, чего невозможно достичь другими способами экстракции. Кроме того, изменение давления при сжатии и разрежении при прохождении волны ультразвука, может вызывать эффект губки, при котором улучшается проникновение экстрагента в материал. На выход действующих веществ влияют интенсивность и продолжительность ультразвукового облучения, температура экстрагента, соотношение сырья и экстрагента.

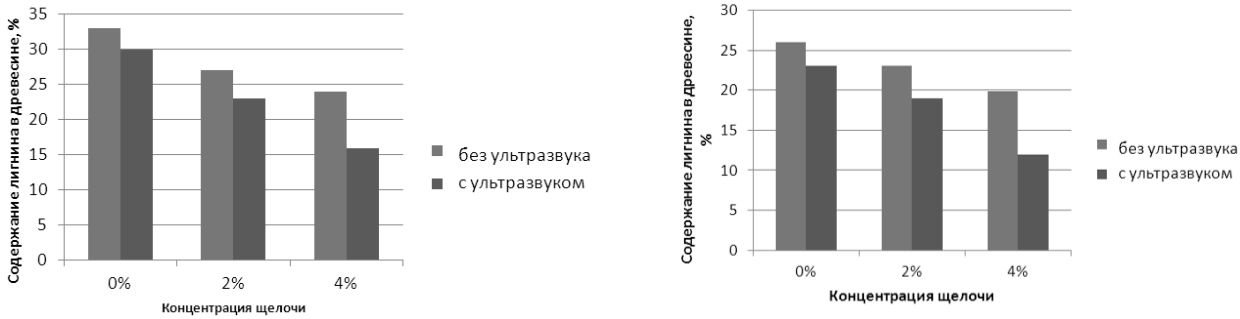
В свете вышеизложенного проведены экспериментальные исследования обработки древесного наполнителя в воде и в слабом растворе щелочи. Этот процесс интенсифицируется с помощью ультразвука [12].

Для исследований использовали древесную муку, полученную из древесины сосны, размером частиц около 125 мкм. В качестве реагента использовался водный 2% и 4% раствор гидроксида натрия (NaOH).

Обработка древесной муки производилась в универсальной ультразвуковой установке частотой 40 кГц в течение 15, 30 и 45 минут при температурах 20 °С, 50 °С и 80 °С. После древесную муку фильтровали и промывали от гидроксида натрия. Затем муку высушивали при 80 °С в течение 12 ч.

Массовая доля веществ, выделенных из древесины, рассчитывалась в процентах как отношение изменения массы древесных частиц в абсолютно сухом состоянии к массе абсолютно сухой древесины.

На рисунке 1 представлены данные, полученные в процессе экстрагирования веществ методом варки древесных частиц в растворе щелочи с применением и без применения ультразвукового воздействия. Как видно из рисунков, при обработке древесного наполнителя 4% раствором NaOH, удаляется более 36% лигнина и гемицеллюлозы, и при помощи ультразвука может быть удалено в общей сложности до 45% этих компонентов.



а) б)

Рис. 1. Содержание а) лигнина и б) гемицеллюлозы в древесине после щелочной и ультразвуковой обработок.

На рисунке 2 представлены данные, полученные в процессе экстрагирования веществ методом варки древесной щепы в дистиллированной воде и в щелочной среде с применением и без применения ультразвукового воздействия. Как видно из рисунков, массовая доля экстрагированных веществ увеличивается с увеличением температуры и продолжительности обработки в среднем на 43% при обработке с ультразвуком.

По результатам исследований был сделан вывод, что процесс экстракции ультразвуком позволяет значительно ускорить и увеличить выход экстрагируемого вещества.

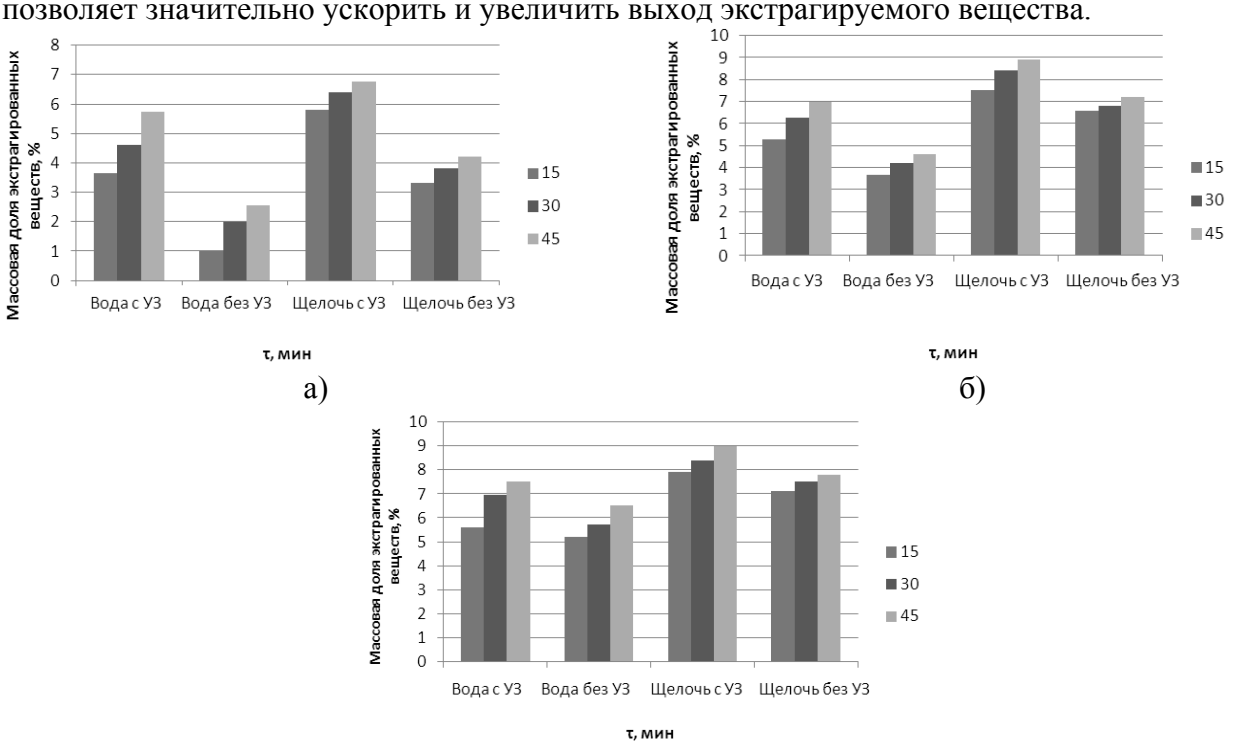


Рис. 2. Массовая доля экстрагированных веществ:
а) при $t_{реаг}$=20 °С; б) при $t_{реаг}$=50 °С; в) при $t_{реаг}$=80 °С.

В заключение статьи стоит отметить, что основой получения качественного древесно-композиционного материала является прочное соединение древесного заполнителя и связующего. Обработка щелочью помогает извлечь из древесины гемицеллюлозы и лигнин. Этому процессу способствует ультразвуковая обработка. Ультразвук вызывает в жидких средах кавитацию, приводящую к нарушению диффузионного слоя и быстрому проникновению жидкой среды в структуру частицы, экстрагированию растворимых компонентов и качественному перемешиванию компонентов среды. Этот эффект был использован для интенсификации процесса экстракции водорастворимых веществ из древесной массы. Полученные результаты окончательно подтверждают, что комбинация химической обработки древесины и ультразвукового воздействия является более эффективным инструментом в улучшении механических свойств композитов.

Представленная работа выполнялась при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (МД-5596.2016.8).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Pereira C., Caldeira Jorge F., Ferreira J. M. F.* Adsorption of cations from a cement suspension onto lignocellulosic substrates and its influence on cement setting // Journal of Wood Chemistry and Technology. 2005. V. 25. P. 231–244.

2. *Nazerian M., Ghalehno M. D., Gozali E.* Effects of wood species, particle sizes and dimensions of residue obtained from trimming of wood–cement composites on physical and mechanical properties of cement-bonded particleboard // Wood Material Science & Engineering. 2011. V. 6. P. 196-206.

3. *Klyosov A. A.* Wood–Plastic Composites, Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2007.

4. *Yoon S.-H., van Heiningen A.* Green liquor extraction of hemicelluloses from southern pine in an integrated forest biorefinery // J. Ind. Eng. Chem. 2010. V. 16. P. 74–80.

5. *Huang H.-J., Ramaswamy S., Al-Dajani W.W., Tschirner U.* Process modeling and analysis of pulp mill-based integrated biorefinery with hemicellulose pre-extraction for ethanol production: A comparative study // Biores. Technol. 2010. V. 101. P. 624–631.

6. *Mendes C.V.T., Carvalho M.G.V.S., Baptista C.M.S.G., Rocha J.M.S., Soares B.I.G., Sousa G.D.A.* Valorisation of hardwood hemicelluloses in the kraft pulping process by using an integrated biorefinery concept // Food Bioprod. Proc. 2009. V. 87. P. 197–207.

7. *Sj¨ostr¨om E.* Wood Chemistry—Fundamentals and Applications, 2nd ed.; Academic Press: San Diego, CA, USA, 1993. 239.

8. *Al´en R.* Basic chemistry of wood delignification // In Forest Products Chemistry. 2000. P. 58–104.

9. *Sj¨ostr¨om E., Westermark U.* Chemical composition of wood and pulps: Basic constituents and their distribution // In Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping and Papermaking. 1999. P. 1–19.

10. *Razumov E.Y., Safin R.R., Barcík S.Š., Kvietková M., Romelevich K.R.* Studies on mechanical properties of composite materials based on thermo modified timber // Drvna Industrija. 2013. T. 64. V. 1. P. 3-8.

11. *Sowbhagya H. B., Chitra V. N.* Enzyme-Assisted Extraction of Flavorings and Colorants from Plant Materials // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2010. V. 50. P. 146–161.

12. *Safin R.R., Barcík Š., Nazipova F.V., Ziatdinov R.R., Shaikhutdinova A.R., Beliakova E.A., Kainov P.A.* The effect of ultrasonic extraction of soluble sugars from the wood filler on the strength properties of the composite based on mineral binder // Key Engineering Materials. 2016. V. 688. P. 138-144.

УДК: 641.78:664

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА СУШКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДИЕТИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ «НУТРИО-ГЕМ»
JUSTIFICATION A RATIONAL DRYING REGIME IN THE PRODUCTION OF A DIETARY SUPPLEMENT "NUTRIO-GEM"

Владимир Алексеевич Потапов*, Виктория Владленовна Евлаш*,
Николай Михайлович Цуркан**
Vladimir A. Potapov*, Victoria V. Evlash*, Nikolai M. Tsurkan**

**Харьковский государственный университет питания и торговли, г. Харьков*
**Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkiv, Ukraine*
(e-mail:potapov@bigmir.net)
***ООО «Научно-производственное предприятие «ГЕМО-ПРОЕКТ», г Киев*
***LLC "Scientific and Production Enterprise" HEMO-PROEKT ", Kiev*
(e-mail: drummer_nick@mail.ru)

Аннотация: Описаны результаты экспериментального процесса получения диетической добавки «Нутрио-гем» в конвективно-кондуктивном вакуумном аппарате. Разработанный аппарат позволяет совмещать тепло-массообменные операции концентрирования, сушки и предварительного измельчения. Проведено сравнение трех способов тепло-массообменной обработки: вакуумное концентрирование - вакуумная сушка, вакуумное концентрирование - конвективная сушка, вакуумное концентрирование - конвективно-кондуктивная сушка. Показано, что использование конвективно-кондуктивной сушки позволяет в два раза сократить продолжительность обезвоживания по сравнению с другими двумя способами тепло-массообменной обработки.

Abstract: The results of the experimental process of obtaining a in the convective-conductive vacuum device is presented. The developed device allows to combine heat and mass transfer operations of concentration, and pre-crushing. Comparison of three methods of heat and mass transfer processing: vacuum concentration - vacuum drying, vacuum concentration - convective drying, vacuum concentration - convective-conductive drying were done. It is shown that the use convective-conductive drying allows to reduce two times duration of dewatering as compared with the other two methods of heat-mass-exchange treatment.

Ключевые слова: сушка; вакуум, теплоподвод; диетические добавки, тепло-массообменная обработка

Keywords: drying; vacuum, heat transfer; dietary supplements, heat and mass transfer treatment

Проблема выбора рационального способа проведения сушки при производстве концентрированных пищевых продуктов является достаточно актуальной, что обусловлено высокими удельными энергозатратами на удаление влаги. В мировой практике на получение концентрированных продуктов затрачивается до 30% энергии потребляемой промышленостью [1,2]. В Украине, несмотря на дефицит собственных источников энергоресурсов, удельные энергозатраты на производство продуктов питания в 2…3 раза выше, чем в среднем по странам ЕС [1]. Поэтому целью данной работы является выбор энергосберегающего способа сушки при производстве диетической добавки «Нутрио-гем».

Раннее разработана технология получения диетической добавки на основе пищевой крови [3], которая включает следующие операции: составление рецептурной смеси, уваривание смеси до влажности 80%, сушка в конвективной сушилке при температуре 80 °С до влажности 6%, измельчение на шаровой мельнице до основного размера частиц 30 мкм. Такая последовательность процесса получения продукта обусловлена тем, что исходная рецептурная смесь представляет собой высоковлажную суспензию, в которой в процессе тепло-массообменных процессов необходимо сохранить гемовый комплекс пищевой крови и получить конечный продукт в виде сухого порошка высокой дисперсности. Использование двух тепло-массообменных аппаратов в такой технологической схеме удорожает процесс, увеличивает трудоемкость за счет операций загрузки-разгрузки котла, загрузки-разгрузки продукта в сушилку, требует дополнительной санитарной обработки оборудования, инвентаря и, как результат, увеличивает общую продолжительность процесса.

Нами была разработана новая многофункциональная диетическая добавка «Нутрио-гем» на основе крови крупного рогатого скота и натуральных ингредиентов. Она содержит стабилизированное гемовое железо в двухвалентном состоянии (Fe2+) и полноценный белок. Это функциональная добавка для широкого спектра лечебно-профилактических продуктов и продуктов специального назначения, белково-минеральных добавок к кормам для животных и рыб [4,5].

Исходное сырье для производства диетической добавки представляет собой суспензию из пищевой крови с рецептурными ингредиентами влажностью 85 %. Для осуществления тепло-массообменного процесса в одном аппарате нами предложено использовать конвективно-кондуктивную вакуумную сушилку с мешалкой скребкового типа. Схема экспериментальной сушилки представлена на рис. 1.

Преимущество данного аппарата заключается в возможности совмещать тепло-массообменные операции концентрирования, сушки и предварительного измельчения. Аппарат может работать как вакуумно-выпарной аппарат, вакуумная сушилка или конвективно-кондуктивная сушилка. В режиме вакуумного концентрирования в сушильной камере создается разряжение водно-кольцевым насосом (ВВН-0,75), теплоподвод осуществляется кондуктивно от рубашки заполненной промежуточным теплоносителем (глицерин), линия подачи сушильного агента при этом не используется (подсос в сушильную камеру перекрыт).

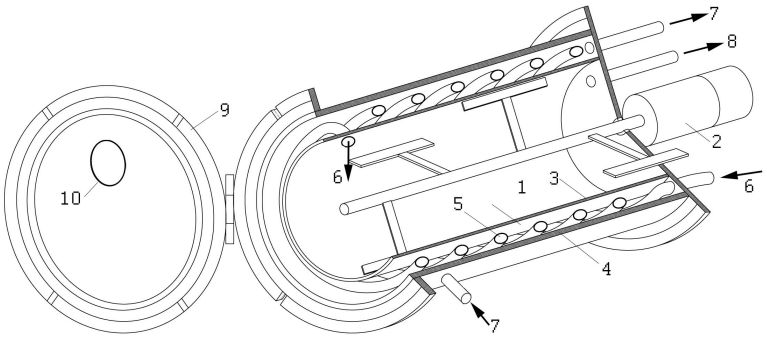


Рис. 1 – Схема конвективно-кондуктивной вакуумной сушилки с мешалкой скребкового типа.

1 – мешалка скребкового типа; 2 – привод мешалки; 3 – сушильная камера; 4 – рубашка промежуточного теплоносителя; 5 – змеевиковый теплообменник; 6 – линия подачи сушильного агента; 7 – линия подачи промежуточного теплоносителя; 8 – вакуумная линия; 9 – дверца сушильной камеры, 10 – загрузочный люк продукта.

В режиме конвективно-кондуктивной атмосферной сушки можно использовать конвективно-кондуктивный теплоподвод или только конвективный. В первом случае воздух под действием воднокольцевого насоса засасывается в змеевиковый теплообменник, подогревается в нем. поступает в сушильную камеру, проходит через продукт и отсасывается насосом. Дополнительно нагрев продукта осуществляется от промежуточного теплоносителя в рубашке.

При конвективном теплоподводе рубашка предварительно вакуумируется и играет роль дополнительной теплоизоляции, воздух при этом нагревается внешним калорифером и засасывается в сушильную камеру водно-кольцевым насосом. Мешалка обеспечивает равномерный нагрев и обезвоживание продукта, а также позволяет измельчать его, тем самым, уменьшая характерный размер частиц и увеличивая скорость процессов внутреннего тепло-массопереноса.

Первые испытания аппарата в режиме только вакуумного концентрирования и сушки показали низкую эффективность такого тепло-массообменного процесса даже при максимальной скорости откачки водно-кольцевого насоса. Максимальная скорость откачки данной вакуумной системы порядка 0,25 $м^3$/мин при давлении насыщенного пара 0,07 МПа (вакуум -0,03 МПа), что соответствует температуре кипения воды 90 С. Данный режим соответствует технологическим требованиям при производстве диетической добавки «Нутрио-гем». При этом концентрирование суспензии проходит в режиме кипения, образующиеся пузырьки пара формируют дисперсную структуру, и продукт постепенно сгущается. В результате образуются конгломераты продукта с характерным размером несколько сантиметров, пространство между такими частицами заполнено паром низкого давления (скорость откачки превышает скорость испарения влаги из продукта). В результате резко ухудшаются условия для кондуктивной теплопередачи от нагретой стенки к продукту, поскольку эффективная теплопроводность такой системы определяется суммой термических сопротивлений. Это приводит к тому, что процесс вакуумной сушки резко тормозится из-за уменьшения эффективной теплопроводности продукта. Это эффект иллюстрирует рис. 2, на котором представлена кинетика вакуумного концентрирования и вакуумной сушки диетической добавки «Нутрио-гем».

Хорошо видно, что при влагосодержании продукта порядка 2,5 кг/кг (влажность 70 %) сушка фактически прекращается, что вызвано описанными выше причинами. Приблизительно через 60 мин продукт начинает снова отдавать влагу. Причина этого явления вызвана уменьшением термического сопротивления, поскольку в процессе работы мешалки происходит постепенное измельчение конгломератов концентрированного

продукта, а следовательно, уменьшение характерных размеров продукта, что приводит со временем к увеличению эффективной теплопроводности.

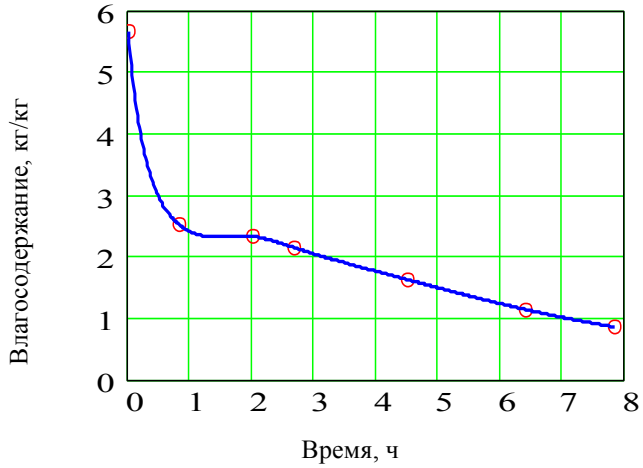


Рис. 2 – Кинетика вакуумного концентрирования и вакуумной сушки диетической добавки «Нутрио-гем». Вакуум -0,03 МПа. Температура промежуточного теплоносителя 80 С.

Таким образом, вакуумная сушка при производстве данного продукта имеет существенное ограничение, вызванное низкой эффективностью кондуктивного теплоподвода в вакууме. Для решения указанной проблемы нами были проведены эксперименты с целью определения эффективности конвективной и конвективно-кондуктивной сушки на втором этапе процесса получения диетической добавки. В этих экспериментах на первом этапе осуществлялось вакуумное концентрирование от начального влагосодержания 5,5 кг/кг до влагосодержания 4 кг/кг (влажность 80 %), а затем на втором этапе проводилась конвективная или конвективно-кондуктивная сушка. Причем, как уже указывалась, разработанный аппарат позволяет осуществлять все три режима без извлечения продукта из него.

На рис. 3 приведена кинетика сушки для трех режимов: вакуумная сушка, конвективная сушка, конвективно-кондуктивная сушка.

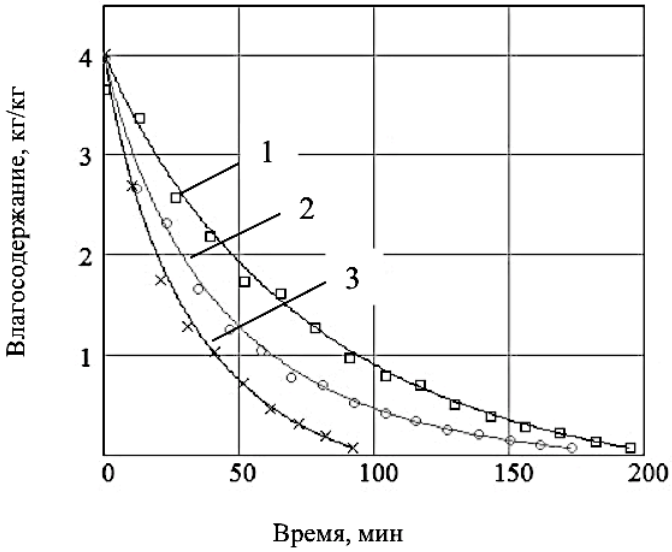


Рис. 3 – Кинетика второго этапа тепло-массообменной обработки диетической добавки «Нутрио-гем».

1 – конвективная сушка (температура сушильного агента 85 °С); 2 – вакуумная сушка (вакуум -0,03 МПа, температура промежуточного теплоносителя 85 °С); 3 – конвективно-кондуктивная сушка (температура промежуточного теплоносителя 85 °С; температура сушильного агента 85 °С)

Выводы.

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что применение конвективно-кондуктивной сушки на втором этапе тепло-массообменной обработки продукта «Нутрио-гем» позволяет практически в два раза сократить продолжительность обезвоживания по сравнению с конвективной и вакуумной сушкой. Это объясняется, прежде всего, большей эффективной теплопроводностью продукта при нормальном атмосферном давлении в сушильной камере, а также большей площадью теплопередачи, поскольку в режиме конвективно-кондуктивной сушки теплоподвод осуществляется как от стенок сушильной камеры, так и от циркулирующего воздуха в условиях активного перемешивания мешалки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бурдо О.Г.* Энергетический мониторинг пищевых производств. Одесса, Полиграф, 2008. 294 с.

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

3. *Евлаш В.В., Горбань В.Г., Коваленко В.А. Розанова Е.Д.* Обоснование и разработка новой биологически активной пищевой добавки из крови убойных животных // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка / Харк. держ. техн. ун-т сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. Харків. 2003. № 22. С. 232–236.

4. *Potapov V., Yevlash V., Parzhanov Zh., Tastanbekova G., Khamzayeva S.,* Use of food production waste in fodder products. Overview of problems and solutions// Industrial Technology and Engineering.. 2017, V. 1 (22). PP. 73- 83

5. «Нутрио-гем". 2017// http://hemo-proekt.com.ua/produkcziya.html

УДК 66-911.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕН РАСТВОРОВ АЛКИЛБЕНЗОЛСУЛЬФОНАТА КАК ОБЪЕКТОВ СУШКИ
INVESTIGATION OF THE PANOSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF SOLUTIONS OF ALKYL BENZENL SULFONATE SOLUTIONS AS OBJECTS OF DRYING

Николай Павлович Дяченко*, Эдуард Павлович Дяченко,**
Игорь Юрьевич Алексанян*
Nikolay P. Dyachenko*, Eduard P. Dyachenko**

** Астраханский государственный технический университет, Россия, Астрахань*
** Astrakhan State Technical University, Russia, Astrakhan*
*** Научно-консалтинговая корпорация Концептуальных исследований и развития социально-экономических и информационных систем МетаСинтез, Россия, Москва*
*** Scientific and consulting corporation of Conceptual research and development of socio-economic and information systems MetaSintez, Russia, Moscow*
(e-mail: dyachenko-nik@mail; ruamed-nauka@yandex.ru)

Аннотация: Исследованы пеноструктурные характеристики вспененных растворов алкилбензолсульфоната с различными концентрациями сухих веществ как объектов сушки. Наиболее рациональными для сушки являются пены растворов алкилбензолсульфоната с концентрацией сухих веществ растворе не менее 40%.

Abstract: The foam-structural characteristics of foamed solutions of alkyl benzene sulfonate with various concentrations of dry substances as drying objects are investigated. The most rational for drying are foam solutions of alkyl benzene sulfonate with a concentration of solids solution of not less than 40%.

Ключевые слова: алкилбензолсульфонат, пена, дисперсный состав, сушка.

Keywords: akyl benzene sulfonate, foam, dispersion, drying.

Пеноструктурные характеристики пенослоя определяют скорость и характер протекания процесса сушки и необходимы для определения рациональных режимов сушки, а также создания математических моделей тепломассопереноса и анализа массообмена при пеносушке. При сушке продукта во вспененном состоянии имеет место объемное испарение влаги, т.е. с внутренней поверхности пузырьков [1], при этом пригодной для сушки принято считать пену, средний диаметр пузырьков которой не превышает 100 мкм [2].

Для исследования дисперсности пен использовали наиболее распространенный метод микрофотографирования [2]. Фотографии получали посредством светового микроскопа, при увеличении порядка 200^x, с подключаемым к персональному компьютеру визуализатором. Для исследования использовались растворы АБС различных концентраций, предварительно вспененные до получения пены максимальной кратности. Пена раствора АБС наносилась тонким (0,3…0,5 мм) ровным слоем на предметное стекло. Для уменьшения погрешности исследований микрофотосъемка производилась для трех участков пенослоя, каждый опыт для повышения точности измерений повторялся три раза. В качестве примера на рисунке 1 представлены наиболее типичные микрофотографии пен при различной концентрации сухих веществ C, % в растворе.

Размер пузырьков определялся масштабированием. Все пузырьки разбивались по фракциям, каждую фракцию характеризовали средним диаметром d_i, подсчитывали среднее число пузырьков в каждой фракции по всем снимкам [1]. В таблице 1 приведены значения относительной концентрации пузырьков N по средним диаметрам, рассчитанные по формуле $N_i = n_i/Z_n$, где n_i – число пузырьков фракции с диаметром d_i; Z_n – общее число пузырьков всех фракций.

Таблица 1. Относительная концентрация пузырьков пены по средним диаметрам

Концентрация C, %	Распределение пузырьков по диаметрам d_i, мкм									
	5	10	15	20	30	50	70	100	150	200
50	0,218	0,436	0,164	0,145	0,036	-	-	-	-	-
40	0,056	0,323	0,242	0,202	0,153	0,024	-	-	-	-
30	-	-	-	0,044	0,114	0,263	0,254	0,237	0,088	-
20	-	-	-	-	-	0,127	0,145	0,291	0,327	0,109

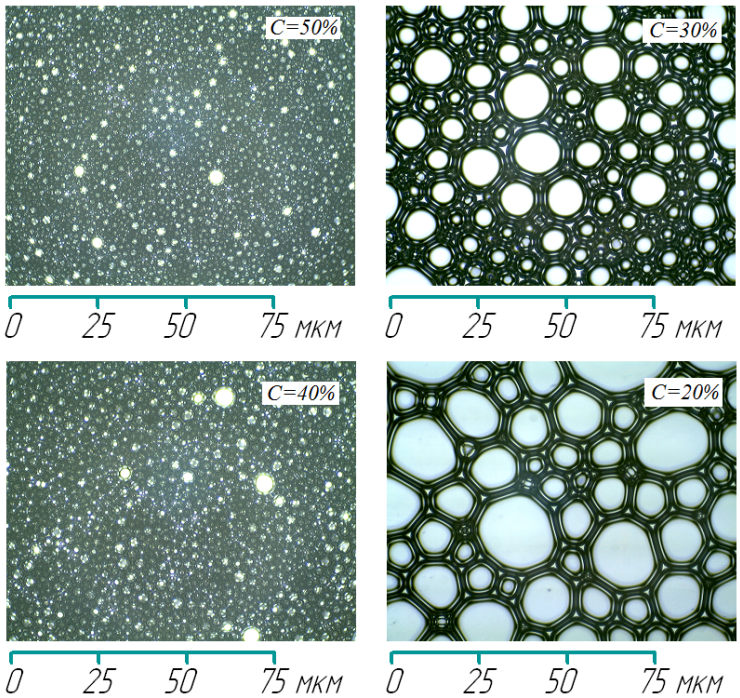


Рис. 1. Микрофотографии пен растворов АБС при различной концентрации сухих веществ и 200-кратном увеличении микроскопа.

На рисунках 2 и 3 представлены интегральные и дифференциальные кривые распределения числа пузырьков по размерам, построение интегральной кривой выполнено в координатах $N(\%)$-d, в данном случае каждая точка на кривой указывает процентное содержание фракции с пузырьками диаметром от d_{min} до данного диаметра d [3, 4].

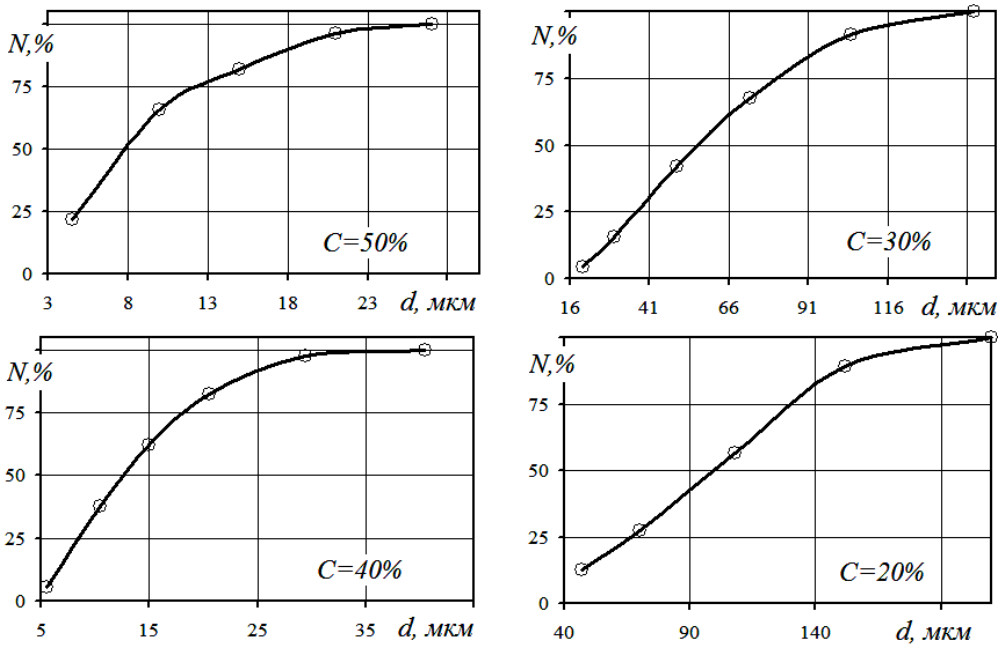


Рис. 2. Интегральные кривые распределения пузырьков вспененных растворов АБС по размерам.

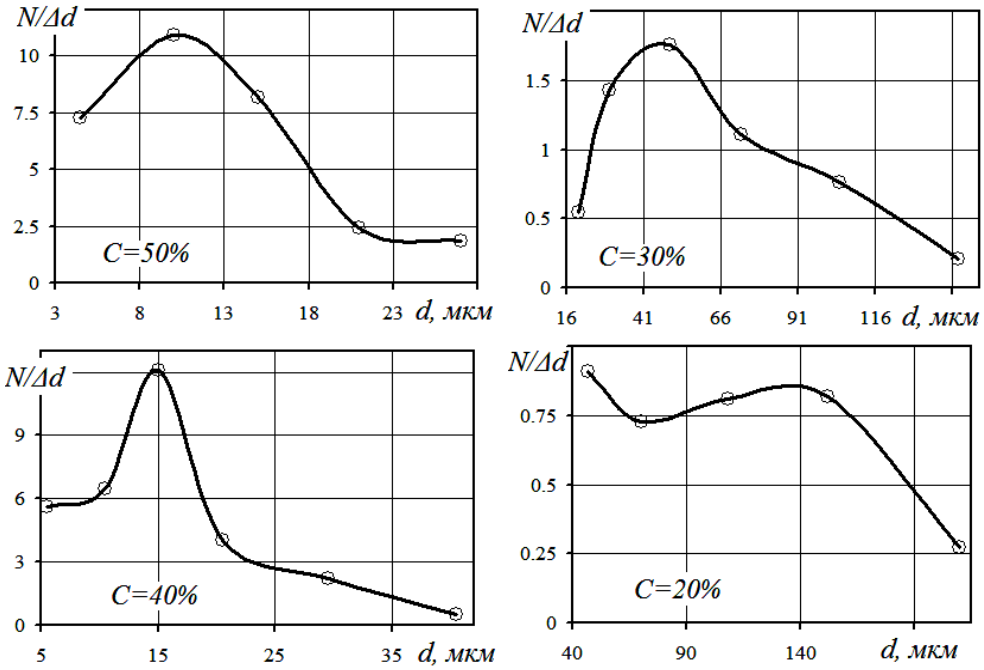


Рис. 3. Дифференциальные кривые распределения пузырьков вспененных растворов АБС по размерам.

Дифференциальная кривая построена в координатах $N/\Delta d$ - d, где параметр Δd определяет диапазон диаметров пузырьков, который соответствует этой фракции. Также функция плотности распределения может быть рассчитана путем графического дифференцирования кумулятивной кривой. Координаты $N/\Delta d$ - d позволяют определить доли

пузырьков в интервале от некоторого значения *di* до *di+1* путем использования табулированного интеграла вероятности [1, 4].

С использованием данных таблицы 1 вычислены пеноструктурные характеристики вспененных растворов АБС [5, 2]: средний диаметр пузырьков, $d_{ср}$, мкм; средний объем пузырьков, $V_{ср}$, мкм^3; среднюю поверхность пузырька $S_{ср}$, мкм^2; среднюю удельную поверхность раздела жидкость-газ, приходящуюся на единицу объема жидкости в пене, имеющей пузырьки одинакового диаметра, $S_{удср}$, 1/мкм; истинную удельную поверхность раздела жидкость-газ в пене на единицу объема пены, $S_{уд}$, мкм^2/мкм^3. Результаты вычислений приведены в таблице 2.

Таблица 2. Пеноструктурные характеристики вспененных растворов АБС при различной концентрации сухих веществ

№ п/п	*C*, кг/кг	$d_{ср}$, мкм	$V_{ср}$, мкм^3	$S_{ср}$, мкм^2	$S_{удср}$, 1/мкм	$S_{уд}$, мкм^2/мкм^3
1	0,5	11,909	1654,447	555,209	2,234	1,488
2	0,4	16,976	5191,657	1152,810	1,642	1,032
3	0,3	72,105	343554,561	19991,330	0,416	0,291
4	0,2	116,545	1221450,485	49195,240	0,299	0,234

По результатам анализа полученных данных установлено существенное влияние концентрации сухих веществ в растворе АБС на дисперсность пен. При снижении концентрации вязкость раствора также снижается, уменьшается толщина пленок между пузырьками, что приводит к образованию крупных фракций пузырьков и, соответственно, увеличению среднего диаметра. При этом максимальный диаметр пузырьков существенно выше среднего диаметра. Следует отметить, что при концентрациях не менее 40% и 50% в пене наблюдаются отдельные крупные пузырьки воздуха, соответственно, увеличивается средний объем пузырьков пены, в тоже время происходит уменьшение истинной удельной поверхности раздела фаз [1].

Наиболее рациональными для сушки являются пены растворов с концентрацией сухих веществ не менее 40%, так как пены указанных растворов обладают наибольшей поверхностью раздела жидкость-газ, которой соответствует минимальный средний диаметр пузырьков [5]. С повышением температуры наблюдается расширение газа внутри пузырьков, в результате происходит объемное увеличение пенослоя в процессе сушки, и, соответственно, занимаемой продуктом рабочей поверхности сушильного аппарата, что необходимо учитывать в инженерных расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Высш. школа, 1985. 544 с.

3. Алексанян И.Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения. Автореф. дис. … доктора техн. наук. М.: МГУПБ, 2001. 52 с.

4. Титова Л.М. Разработка и научное обоснование способа сушки пищевых волокон. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Астрахань: АГТУ, 2009. 21 с.

5. Алексанян И.Ю. Совершенствование процессов сушки сухих рыбных гидролизатов в технологии белковых концентратов. Автореф. дис. … кандидата техн. наук. М: ВНИКИМП, 1988. 26 с.

УДК 62-685

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОТИ ТЕПЛООБМЕННИКА В СИСТЕМЕ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХА БАССЕЙНА
THE RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF THE HEAT EXCHANGER IN THE UTILISE SYSTEM OF HEAT OF EXHAUST AIR OF THE POOL

Игорь Васильевич Яковлев, Ирина Владимировна Парёхина, Артём Владимирович Ханин
Igor V. Yakovlev, Irina V. Parehina, Artem V. Khanin

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Россия, Москва
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, Moscow
(e-mail: YakovlevIV@mpei.ru, parehina_iv@mail.ru, khanin_av@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности теплопереноса в теплообменнике – утилизаторе теплоты вентиляционного вытяжного воздуха при условии выпадения влаги. Экспериментально получены зависимости приращения тепловой мощности теплообменника в зависимости от относительной влажности вытяжного воздуха и коэффициента влаговыпадения.

Abstract: Some features of the heat transfer of heat utiliser of moist air under condition of moisture precipitation are considered. The dependence of the increment of the heat capacity of the heat exchanger as a function of the relative humidity of exhaust air and coefficient of moisture precipitation obtained experimentally.

Ключевые слова: утилизация теплоты влажного воздуха, коэффициент влаговыпадения.
Keywords: heat utilization of moist air, coefficient of moisture precipitation.

Вопросам утилизации теплоты вторичных энергетических ресурсов уделяется достаточное внимание. В качестве такого ресурса несомненно может рассматриваться вытяжной вентиляционный воздух производственных и общественных зданий. Особое внимание при этом уделяется зданиям с повышенной влажностью, поскольку глубокая утилизация теплоты влажного воздуха позволяет извлечь максимальное количество теплоты из удаляемого воздуха [1].

Одновременно с процессами глубокой утилизации ВЭР часто рассматриваются процессы повышения потенциала утилизируемой теплоты, например, с применением теплонасосных установок. Одним из перспективных направлений применения утилизации теплоты вытяжного вентиляционного воздуха с использованием возможностей тепловых насосов представляется применение подобных инженерных решений в системах поддержания микроклимата зданий [2-7], например плавательных бассейнов [4-7]. При этом использование получаемой теплоты возможно в как любых теплопотребляющих системах, так и в процессах многоступенчатой подготовки воздуха, включающей охлаждение, осушку и нагрев.

В качестве примера подобной установки, в которой применяется глубокая утилизации теплоты влажного вытяжного воздуха бассейна и повышение потенциала теплоты с использованием теплового насоса с целью обеспечения горячего водоснабжения можно привести установку, применяемую в бассейне МЭИ [7]. Функциональная схема установки для исследования процессов утилизации теплоты вентиляционных выбросов на основе ТНУ приведена на рис. 1.

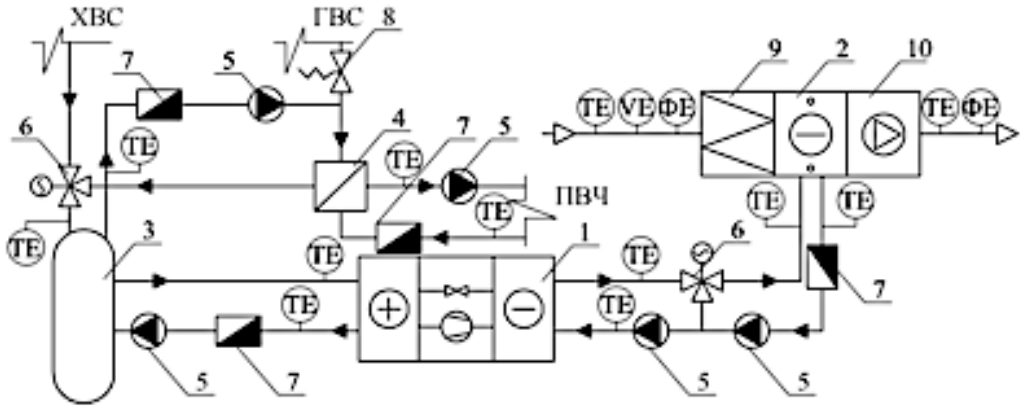


Рис. 1. Функциональная схема установки для исследования процессов утилизации теплоты вентиляционных выбросов на основе ТНУ в бассейне НИУ «МЭИ» [7]:
1 – теплонасосная установка; 2 – воздухоохладитель (трубчатый оребренный теплообменник); 3 – буферный бак накопитель; 4 – промежуточный теплообменник (пластинчатый теплообменник); 5 – циркуляционный насос; 6 – смешивающий клапан с электроприводом; 7 – электромагнитный расходомер; 8 – соленоидный клапан; 9 – фильтр карманный; 10 – вентилятор. ТЕ - термометр сопротивления платиновый (аналоговый датчик); VE – преобразователь скорости потока (аналоговый датчик); ФЕ - ёмкостный датчик относительной влажности воздуха (аналоговый датчик).

Теплота влажного вытяжного воздуха передавалась промежуточному теплоносителю в теплообменнике – утилизаторе 2, а от промежуточного теплоносителя – к испарителю теплонасосной установки 1. Теплота конденсации ТНУ посредством аккумуляторного бака 3 передается потребителям - установке подготовки горячей воды или воде в чаше бассейна. Установка оснащена приборами измерения температур, расходов теплоносителей и относительной влажности воздуха в рабочих контурах.

Эффективность теплонасосной установки определяется значением коэффициента трансформации энергии - отношением полученного полезного количества теплоты (в конденсаторе) и переданного потребителям к затраченному количеству электрической энергии на привод компрессора ТНУ и электрических насосов промежуточных контуров установки. Вопросы энергетической эффективности теплонасосной установки и её экономической целесообразности подробно рассмотрены в работе [7].

С другой стороны, абсолютное значение количества теплоты. передаваемой потребителю от вытяжного воздуха, зависит от эффективности теплообменника – утилизатора. Особенностью применяемого в данной установке теплообменника – утилизатора является поддержание в расчетном режиме температуры теплопередающей поверхности ниже температуры точки росы вытяжного воздуха, то есть процесс передачи теплоты от вытяжного воздуха к промежуточному теплоносителю происходит с выпадением влаги из воздуха. Такой процесс обеспечивает, так называемую, глубокую утилизацию теплоты вытяжного воздуха [1]. При этом передаваемая в теплообменнике тепловая мощность может существенно превышать мощность, передаваемую в режиме без конденсации влаги, что несомненно повышает энергоэффективность установки в целом. На передаваемую в теплообменнике - утилизаторе тепловую мощность влияют параметры вытяжного воздуха (температура и относительная влажность) и средняя температура теплопередающей поверхности (опосредованно это влияние можно проследить через коэффициент выпадения влаги). Исследованию влияния перечисленных факторов на приращение передаваемой тепловой мощности в теплообменнике –утилизаторе в режиме выпадения влаги посвящена приводимая часть работы.

С этой целью в процессе испытаний установки измерялись следующие параметры воздуха при прохождении тракта теплообменника – утилизатора: температура t_1 и

относительная влажность воздуха φ_1 на входе в теплообменник, температура t_2 и относительная влажность воздуха φ_2 на выходе из теплообменника, расход воздуха. Измерялись также расход и температуры пропиленгликолевой смеси на входе и выходе из теплообменника – утилизатора. Здесь и в дальнейшем индекс 1 относится к параметрам воздуха на входе в теплообменник, индекс 2 - к параметрам воздуха на выходе из теплообменника.

Порядок расчета параметров воздуха по результатам измерений следующий. Относительное приращение тепловой мощности:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_c} = \frac{G(H_1 - H_2)}{G(H_1 - H_c)} \quad (1)$$

G – массовый расход про межуточного теплоносителя, кг/с; H_c – энтальпия влажного воздуха в состоянии насыщения (конечное значение энтальпии воздуха в процессе охлаждения без выпадения влаги), кДж/кг. Влагосодержание d, г/кг с.в., парциальное давление водяного насыщенного водяного пара при температуре воздуха, p_{si}, МПа, энтальпия влажного воздуха, H_i, кДж/кг, вычислялись соответственно по формулам (2-4), температура точки росы – по зависимости (5), а парциальное давление водяного пара – по зависимости (6).

Зависимость влагосодержания (x, кг/кг с.в.) от атмосферного давления ($p_б$), давления насыщения пара при температуре воздуха и его относительной влажности:

$$x_i = 0,622 \frac{p_{si}\varphi_i}{p_б - p_{si}\varphi_i} \quad (2)$$

где $\varphi = p_п/p_s(t)$, а зависимость давления насыщенного водяного пара, МПа, над поверхностью жидкости от температуры может быть представлена в виде:

$$\ln p_{si} = 9,77 - \frac{4054}{236 + t_i}. \quad (3)$$

Зависимость энтальпии влажного воздуха от его влагосодержания и температуры, кДж/кг сухого воздуха:

$$H_i = c_в t_i + x_i \left(r_0 + c_п t_i\right) \quad (4)$$

где $c_в$ и $c_п$ – удельные средние теплоемкости сухого воздуха и пара (кДж/кг К); r_0 – удельная теплота испарения воды (кДж/кг). В диапазоне температур влажного воздуха от –30 до +60°С принимают r_0 = 2500 кДж/кг; $c_в$ = 1,005 кДж/(кг К); $c_п$ = 1,807 кДж/(кг К).

Температура точки росы (°С) при в диапазоне температур воздуха 0…65°С может быть представлена аппроксимирующей зависимостью:

$$t_р = 1,0496(\ln p_п)^2 - 0,073135(\ln p_п) - 42,6021 \quad (5)$$

где $p_п$ - парциальное давление водяного пара, Па. Зависимость парциального давления пара от влагосодержания:

$$p_п = p_б \frac{d}{0,622 + d} \quad (6)$$

Энтальпия H_c – энтальпия влажного воздуха в состоянии насыщения при постоянносм влагосодержании d_1= *const* вычислялась по формуле (7), кДж/кг:

$$H_c = c_в t_р + x_1 \left(r_0 + c_п t_р\right) \quad (7)$$

Отдельные результаты расчетов параметров воздуха по вышеописанной методике приведены в табл. 1. Графики влияния на приращение тепловой мощности теплообменника - утилизатора относительной влажности воздуха на входе в теплообменник приведены на рис. 2, а коэффициента влаговыпадения ($\xi = \frac{H_1 - H_2}{c_p(t_1 - t_2)}$) - на рис.3.

Таблица 1. Параметры воздуха на входе и на выходе из теплообменника - утилизатора.

t_1, °C	φ_1	t_2, °C	φ_2	p_{s1}, МПа	x_1, кг/кг с.в.	$p_п$, МПа	$t_р$, °C	H_1, кДж/кг	H_2, кДж/кг	ΔH, кДж/кг	$H_с$, кДж/кг
26,4	0,48	13,6	0,85	0,0034	0,010	0,0016	14,4	52,9	34,5	18,4	40,7
27,7	0,50	21,1	0,74	0,0037	0,012	0,0018	16,0	57,2	50,9	6,3	45,3
27,6	0,50	20,6	0,87	0,0037	0,012	0,0018	16,0	57,3	54,4	2,9	45,4
27,9	0,47	18,9	0,75	0,0037	0,011	0,0018	15,5	57,0	54,9	2,0	44,9
27,8	0,47	15,4	0,82	0,0037	0,011	0,0018	15,4	56,5	45,1	11,4	43,7
27,8	0,48	14,0	0,87	0,0037	0,011	0,0018	15,5	56,3	38,2	18,2	43,6
27,8	0,47	13,5	0,89	0,0037	0,011	0,0018	15,3	56,3	36,1	20,3	43,7
27,9	0,47	16,6	0,97	0,0037	0,011	0,0017	15,4	56,0	35,2	20,8	43,3

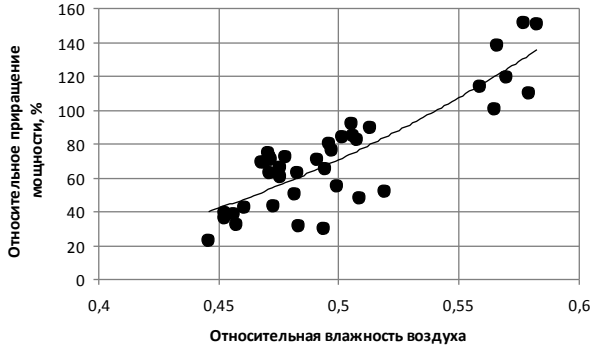


Рис. 2. Влияние относительной влажности вытяжного воздуха на относительное приращение тепловой мощности теплообменника –утилизатора.

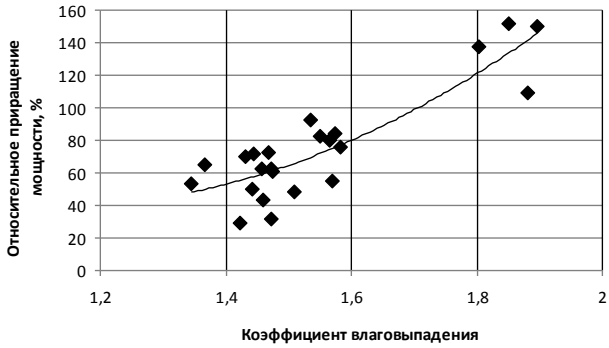


Рис. 3. Влияние значения коэффициента влаговыпадения на относительное приращение тепловой мощности теплообменника –утилизатора.

Глубокая утилизация теплоты влажных газов дает ряд технических преимуществ: при ее осуществлении используется не только физическая теплота, но и теплота конденсации содержащегося в них водяного пара; процесс передачи тепла становится гораздо интенсивнее и для утилизации можно использовать теплообменные аппараты с существенно меньшей поверхностью нагрева. Результаты данного исследования показывают, что на эффективность передачи теплоты в конденсационном теплообменнике влияют параметры влажного воздуха, теплота которого утилизируется. Рост начальной относительной влажности воздуха от 0,45 до 0,6 приводит к росту тепловой мощности теплообменника утилизатора, передаваемой в процессе с влаговыпадением, на 40…50% по сравнению с максимальной мощностью теплопередачи в «сухом» процессе. При этом коэффициент влаговыпадения, который представляет отношение полной передаваемой в теплообменнике теплоты к явной теплоте, передаваемой в процессе без влаговыпадения, изменяется в пределах 1,35…1,9.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гаряев А.Б., Яковлев И.В*. Утилизация теплоты вторичных энергетических ресурсов в конденсационных теплообменниках: учебное пособие.- М.: Издательский дом МЭИ, 2010.- 120 с

2. *Приточно-вытяжная вентиляционная установка с теплонасосной рекуперацией тепла вентиляционных выбросов*/ Васильев Г. П., Тимофеев Н.А., Колесова М.В. и др. // Энергобезопасность и энергосбережение – 2012. - №6 - С. 14 – 21.

3. *Кокорин О.Я.* Современные системы кондиционирования воздуха. - М: Издательство физико-математической литературы, 2003.

4. *Peng Sun, Jing Yi Wu, Ru Zhu Wang, Yu Xiong Xu.* Analysis of indoor environmental conditions and heat pump energy supply systems in indoor swimming pools//Energy and Buildings. – 2011. - №43 - С. 1071 - 1080.

5. *Johansson L., Westerlund L.* Energy savings in indoor swimming-pools: comparison between different heat recovery systems// Applied Energy. – 2001. №70 - С. 281-303.

6. *Chung-Kuan Kung, Wen-Shing Lee*. Optimization of heat pump system in indoor swimming pool using particle swarn algorithm.//Applied Energy. – 2008 - С. 1647-1653.

7. *Яковлев И.В., Гаряев А.Б., Парёхина И.В., Самойленко В.Ю*. Сопоставление теоретической и реальной эффективности теплонасосной установки в системе горячего водоснабжения // Промышленная энергетика, 2015, №5, С. 45-50.

УДК 537.226.4

ТЕПЛО- И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКА GeTe В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ
HEAT AND TEMPERATURE CONDUCTIVITY OF THE SEMICONDUCTOR GETE IN THE SEGNETOELECTRIC STATE

Джурабой Файзалиевич Собиров*, Махмадали Махмадиевич Сафаров**
Djuraboy F. Sobirov*, Mahmadali M. Safarov**

**Курган-Тюбинский государственный университет имени Носира Хусрава, Таджикистан, Курган-Тюбе*
**Kurgan-Tuybe state University after Nosira Khusrava, Tadjikistan, Kurgan-Tuybe (e-mail: s.j.f60@mail.ru)*
***Филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Таджикистан, Душанбе*
***Filial Moscow state University after M.V. Lomonosov, Tajikistan, Dushanbe (e-mail: mahmad1@list.ru)*

Аннотация: В работе приводятся результаты экспериментально-теоретического исследования теплопроводности и температуропроводности полупроводника GeTe в сегнетофазном состоянии в интервале температур 300-700К. Для измерения теплопроводности и температуропроводности исследуемых полупроводников нами использован динамический метод с дифференциальным сканируюшим калориметром (ДТА). Установлено, что с ростом температуры теплопроводность и температуропроводность исследуемых полупроводников уменьшаются по экспоненциальному закону, но вблизи точки Кюри резко уменьшаются.

Abstract: The paper presents the results of an experimental theoretical study of the thermal conductivity and thermal diffusivity of a GeTe semiconductor in a ferroelectric phase in the temperature range 300-700 K. To measure the thermal conductivity and thermal diffusivity of the semiconductor studied, we used the dynamic method from a differential scanning calorimeter (DTA). It is established that as the temperature increases, the thermal conductivity and thermal diffusivity of the semiconductor under investigation decrease exponentially, but near the Curia point sharply decrease.

Ключевые слова: Сегнетоэлектрик, полупроводник GeTe, дифференциальный сканируюший калориметра (ДТА), температура Кюри, теплопроводность и температуропроводность.

Keywords: The ferroelectric, the GeTe semiconductor, the Differential Scanning Calorimeter (DTA), the Curie temperature, the thermal conductivity, and the thermal diffusivity.

При разработке и эксплуатации указанных приборов должны быть учтены в том числе тепловые свойства этих материалов: теплопроводность, теплоемкость,

температуропроводность и т.п., особенно в сегнетофазном и парафазном состоянии, включая аномальные их зависимости вблизи темпе-ратуры Кюри (т.е. в области фазового перехода).Несмотря на большое число публикации, посвященных исследованиям теплофизических характеристик сегнетоэлектрика-полупроводника теллурида германия и твердых растворов на их основе в литературе практически отсутствуют данные, посвященные процессам температуропроводности ***a*** полупроводника GeTe в сегнетоэлектрическом состоянии, включая вблизи температуры Кюри (T_c). В связи с этим в настоящее работе приводятся результаты изучения теплофизических свойства полупроводника GeTe при температуры $T \leq T_c$.

Соединения группы $A^{IV}B^{VI}$ относятся к классу узкощельных сегнетоэлектриков-полупроводников [1]. Исследование удельной теплоемкости полупроводника теллурида германия в широком интервале температур от комнатной до 800К проводилось с помощью дифференциального сканируюшего калориметра (ДСК) динамическим методам. Все экспериментальные данные выполнены на базе специализированного управляющего вычислительного комплекса с использованием ЭВМ. На основе экспериментальных данных, нами вычислена температуропроводность GeTe в сегнетофазном состоянии, т.е. от 300К до вблизи температуры Кюри $T \leq T_C \sim 700К$. Установлено, что с ростом температуры теплопроводность **λ** и температуропроводность ***a*** исследуемых полупроводников уменьшается по экспоненциальному закону, но вблизи точки Кюри резко (таблица 1).

Таблица 1. Вычисленные значение теплопроводности , температуропро-водности по формуле с экспериментальными значениями исследуемых образцов при различных температурах.

Т,К	$\lambda_{экс.}$, Вт/(м·К)	$\lambda_{расч.}$, Вт/(м·К)	Δ, %	$a_{экс} \cdot 10^6$, м^2/с	$a_{расч} \cdot 10^6$, м^2/с	Δ, %
300	8,8167	9,001	2,04	6,6766	6,5721	1,59
400	8,1333	7,801	4,25	5,8707	6,0024	2,19
500	6,640	6,0523	1,79	4,6359	4,8509	4,43
602,96	4,817	5,1255	6,09	2,9461	3,0574	3,6
665,88	4,483	4,231	5,96	1,3273	1,5577	14,79

Значения теплопроводности λ и температуропроводности а теллурида германия для различных температур , что с ростом температуры λ и а GeTe монотонно уменьшается. По результатам измерения теллурида германия построены зависимости температуропроводности *a* от температуры (рисунок 1). Для расчета температурной зависимости температуропроводности теллурида германия использовали уравнение

$$a = -2{,}9089 \cdot 10^{-11} T^2 + 1{,}4665 \cdot 10^{-8} T + 4{,}7906 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с} \quad (1)$$

На рисунке 1 представлены температурные зависимости темпера-туропроводности теллурида германия и их сравнение результатов расчета по уравнению (1) с опытными данными для сегнетоэлектрической фазы. В сегнетоэлектрической фазе вблизи температуры Кюри (T_C) у GeTe наблю-дается значительное (или резкий) уменьшение температуропроводности *a*.

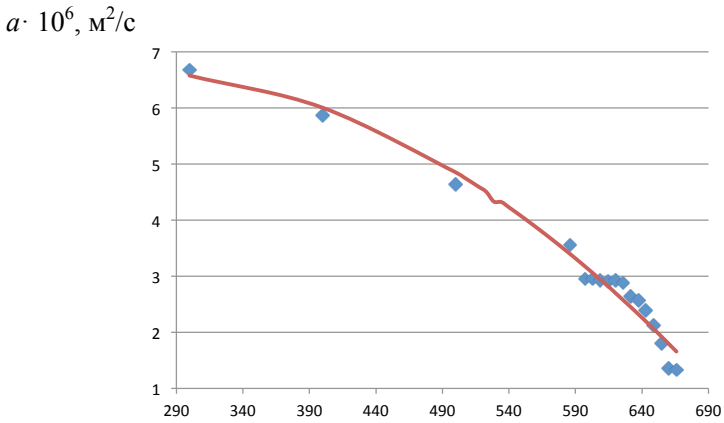


Рисунок 1. Температурная зависимость температуропроводности полупроводника GeTe, *a*=f (T) при различных температурах в сегнетофазном состоянии.

Теллурид германия относится к семейству узкощельных сегнетоэлектриков - полупроводников $A^{1V}B^{V1}$ простой решеткой типа NaCl, которая при фазовом переходе ~670К из кубической переходит в ромбоэдрическую. Относительная простота кристаллической структуры (кубическая решетка типа NaCl, иногда слегка искаженная [2]) делает узкощельный сегнетоэлектрики-полупроводники данной группы удобным модельными материалами для исследований микроскопических механизмов возникновения указанных свойств и явлений, установления связей между ними.

Температуропроводность, как известно, является членом теплофизического тождества [2-4]:

$$a \equiv \lambda /(C_p \cdot \rho). \qquad (2)$$

Обработка экспериментальных данных позволила получить эмпирические уравнения, позволяющие рассчитать теплопроводность и температуропроводность полупроводника теллурида германия в зависимости от температуры не проводя эксперимент.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коржуев М.А. Теллурид германия и его физические свойства. М., : Наука, 1986. 101 с.

2. Собиров Дж.Ф. Влияние носителей на теплоемкость сегнетоэлектрика-полупроводника в окрестности фазового перехода. / Джурабой Файзалиевич Собиров/ Авт……. канд. дис. ЛГПИ им. А.И. Герцена, Ленинград, 1990 г. 12с.

3. Сафаров М.М.,Назаров Х.Х., Давлатов Н.Б., Назруллоев А.С., Зарипова М.А., Тиллоева Т.Р., Гуломов М.М. Ризоев С.Г.,Тауров Э.Ш.,Хакимов Д.Ш. Назирмадов Д.А. Рафиев С.С. Раджабов А.Р. Теплофизические свойства некоторых углеродных материалов. Вестник Таджикского национального университета, (научный журнал), Серия естественных наук, Душанбе, Сино, 2016, 1/4 (216), С.40-45

4. Едалиева З. Н. Теплофизические и термодинамические свойства полупроводниковых порошков и их влияние на изменение свойства диметилгидразина в зависимости от температуры и давления./Зулфия Нуралиевна Едалиева / Авт……. канд. дис. , Казань, 2016 г. 22с.

УДК 631.362.6

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА
METHODOLOGY OF THE INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION ON THE QUALITATIVE INDICATORS OF SUNFLOWER SEEDS

Шамиль Филаридович Файзрахманов, Ильгам Хамбалович Масалимов
Shamil F. Fayzrakhmanov, Ilgam H. Masalimov

Башкирский государственный аграрный университет, Россия, Уфа
Bashkir State Agrarian University, Russia, Ufa
(e-mail: hurmf@yandex.ru, mas_ilgam@mail.ru)

Аннотация: В статье рассматривается методика исследования влияния электромагнитного излучения на качественные показатели семян подсолнечника.

Annotation: In the article the technique of research of influence of electromagnetic radiation on qualitative indicators of sunflower seeds is considered.

Ключевые слова: методика, масличность, содержание жира.

Keywords: technique, oil content, fat content.

При выборе метода сушки семян подсолнечника наряду с энергозатратами на процесс и временем сушки необходимо учитывать качество получаемого продукта, которое во многом определяется химическим составом высушенного материала. Поэтому необходимо, чтобы в процессе сушки были сохранены, а по возможности и улучшены именно эти показатели. К данным показателям относятся содержание жиров и белковых веществ.

Данный эксперимент был предназначен для определения содержания жиров и белковых веществ после сверхвысокочастотной сушки.

Данный метод заключается в том, что сырой жир извлекается из продукта растворителем, далее производится удаление растворителя, высушивание и взвешивание полученного жира по ГОСТ 29033-91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения жира».

Подготовка к испытанию проходила следующим образом.

1. Из имеющейся партии семян подсолнечника отобрали навеску массой (50 ± 1) г, очистили примесей и измельчили на лабораторной мельнице до таких размеров, чтобы перемолотые семена прошли при просеивании через металлическое решето.

2. С целью обезжиривания фильтровальной бумаги в сосуд с плотно подогнанной крышкой налили 100 см2 диэтилового эфира.

3. Добившись достижения растворителя верхнего края сосуда, удалили фильтровальную бумагу. Оставив сосуд в открытом состоянии, дали растворителю испариться и срезали полоску от верхнего края бумаги шириной 4 см.

4. Для приготовления бумажных трубок из фильтровальной бумаги часть бумаги прямоугольной формы прямоугольный кусок накрутили на деревянную форму. В процессе накручивания свободный конец подгибали с целью получения основания трубки. Изготовленная трубка должна быть с дублированными стенками и диаметром на 0,5 см меньше диаметра экстрактора. На дно трубки установили кусок ваты, смоченной в спирте.

Эксперимент проводился следующим образом: измельченные семена подсолнечника массой 10 г., взвешенные с точностью до 0,01 г, разместили в приготовленную трубку из фильтровальной бумаги. Сверху положили кусок смоченной в спирте ваты. Затем трубку переставили в экстрактор аппарата Сокслета.

Колбу аппарата Сокслета высушенную, охлажденную взвешенную до 0,001 г, заполнили на две трети диэтиловым эфиром и присоединили к экстрактору. Запустив воду в

холодильник, нагрели колбу на водяной бане, при этом растворитель, находящийся в колбе, улетучивается и в виде паров проходит через широкую трубу экстрактора в холодильник, где охлаждается и в виде капель поступает в экстрактор с трубкой из фильтровальной бумаги. В течение 1 ч. производили 7-9 сливов растворителя. Экстракция производилась в течение 2 ч.

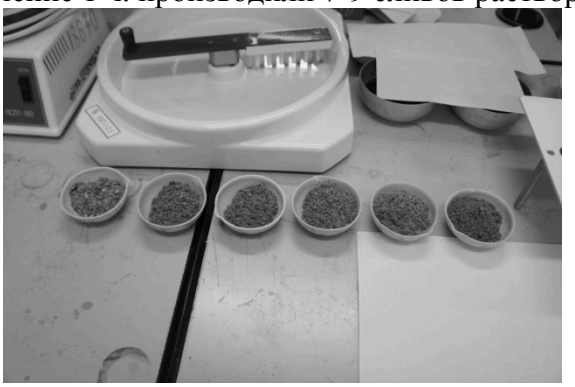
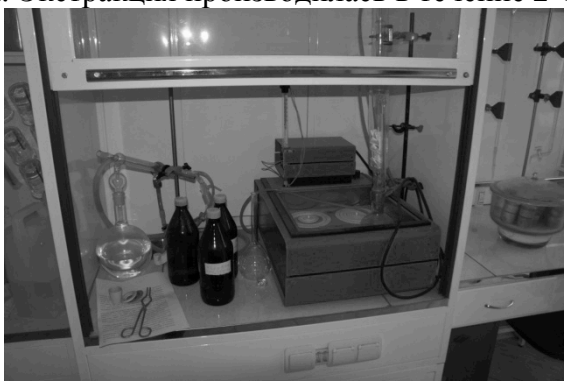



Рис.1 Подготовка образцов и аппарата Сокслета к определению масличности семян подсолнечника

По окончании отгонки растворителя отсоединили экстрактор, колбу выдерживали на водяной бане до испарения растворителя, затем поместили ее в сушильный шкаф для высушивания при температуре (105±5)°С на 60 мин., охладили в эксикаторе и взвесили до тысячных долей грамма.

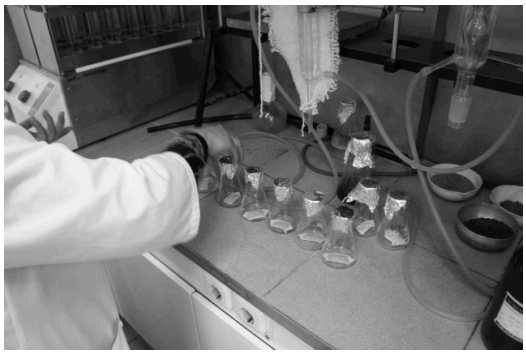



Рис. 2 Отгонка растворителя и взвешивание

Дальнейшее взвешивание производили после последующей сушки в течение 30 мин.

Сушку и определение массы повторяли до тех пор, пока разница между результатами двух последовательных взвешиваний была не более 0,001 г.

В таблице 1 представлены режимы сушки семян подсолнечника для определения содержания жира.

Таблица 1. Режимы сушки семян подсолнечника для определения содержания жира

№ п/п	Мощность СВЧ P, Вт	Температура нагрева семян T, °С
1	2	3
1	контроль	
2	800	20
3	800	40
4	800	60
5	800	80
6	800	100

Обработка результатов. Массовую долю жира в каждой навеске продукта (X) в процентах в пересчете на сухое вещество вычисляют по формуле

$$X = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 100 \cdot 100}{m \cdot (100 - W)}, \quad (1)$$

где m – масса пробы продукта, г.;
m_1 – масса пустой колбы, г.;
m_2 – масса колбы с жиром, г.;
W – влажность продукта, %.

За окончательный результат испытания принимают среднеарифметическое результатов $(\overline{X})$ двух параллельных определений, допускаемое расхождение (d), между которыми при $P = 0{,}95$ не должно превышать в процентах

$$d = -0{,}02 + 0{,}08\overline{X} \quad (2)$$

Допускаемое расхождение (d_1) в процентах между результатами испытаний, выполненных в двух разных лабораториях при $P = 0{,}95$ по отношению к среднеарифметическому значению $(\overline{\overline{X}})$, не должно превышать

$$d = -0{,}02 + 0{,}23\overline{\overline{X}} \quad (3)$$

ЛИТЕРАТУРА

1 Сушильная установка непрерывного действия/ И.Т. Бакиев, И.Х. Масалимов, В.Н. Пермяков // Патент на изобретение RUS 2247910 30.09.2003

2 *Масалимов И.Х.* Как лучше сушить семена/ И.Р. Ганеев, И.Х. Масалимов, В.Н. Пермяков // Сельский механизатор. – 2009. №8. С. 16-17.

3 *Масалимов, И.Х.* Сушка семян рапса в неподвижном слое электромагнитным излучением СВЧ-диапазона/ И.Р. Ганеев, И.Х. Масалимов// Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. – 2009. №4. С. 30-32.

4 *Масалимов, И.Х.* И сушит хорошо, и энергию бережет/ И.Х. Масалимов, В.Н. Пермяков, И.Р. Ганеев // Сельский механизатор. – 2009. №9. С. 14-15.

5 *Ганеев, И.Р.* Влияние СВЧ-сушки на физиологическое состояние клетки в семенах рапса/ И.Р. Ганеев, И.Х. Масалимов // В сборнике: особенности развития агропромышленного комплекса на современном этапе. Материалы Всероссийской научно-практической конференции в рамках XXI Международной специализированной выставки «АгроКомплекс-2011». 2011. С.27-30.

6 *Файзрахманов, Ш.Ф.* Физиологическое и биохимическое состояние семян рапса после сушки с применением электромагнитного излучения / Ганеев И.Р., Масалимов И.Х., Янбаев Ю.А., Файзрахманов Ш.Ф. // Вестник российской академии сельскохозяйственных наук. – 2013. - №2. – с. 86-87.

7 *Файзрахманов, Ш.Ф.* Сушка семян рапса электромагнитным излучением СВЧ-диапазона / И.Р. Ганеев, Ш.Ф. Файзрахманов // Мат. III Всеросс. научн.-практ. конф. «Ремонт. Восстановление. Реновация» - Уфа, Башкирский ГАУ, 2013. – С. 235-237.

8 *Файзрахманов, Ш.Ф.* Разработка многофункциональной установки для микроволновой обработки и сушки сыпучих материалов / Ш.Ф. Файзрахманов, И.Н. Саитов // Мат. V Всеросс. научн.-практ. конф. молодых ученых «Молодежная наука в АПК: проблемы и перспективы» - Уфа: Башкирский ГАУ, 2012. – С. 101-103.

УДК 51-73:621.574

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕКОТОРЫХ РАБОЧИХ АГЕНТОВ ДЛЯ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ
THE ENERGY EFFICIENCY OF SOME WORKING MEDIUM FOR VAPOR-COMPRESSION COOLING SYSTEMS

Дмитрий Леонидович Карелин
Dmitry L. Karelin

Набережночелнинский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет", Россия, Набережные Челны
Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University, Russia, Naberezhnye Chelny
(e-mail: karelindl@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены рабочие агенты: фреон-133a, фреон-132b, фреон-253, фреон-10 и Гексафторбензола, приведены результаты численного исследования их энергетических параметров: затрат энергии на работу адиабатного сжатия и холодопроизводительность. По результату численного исследования даны рекомендации по использованию рабочих агентов в парокомпрессионных системах охлаждения.

Abstract: Considered some of the Working medium: freon-133a, freon-132b, freon-253, freon-10 and Geksaftorbenzola, are given results of numerical research of their power parameters: energy costs of work of adiabatic compression and refrigerating capacity. By result of numerical research recommendations about use of working medium in vapor-compression cooling systems are made.

Ключевые слова: рабочий агент, фреон, адиабатное сжатие, холодопроизводительность. парокомпрессионная система охлаждения.

Keywords: working medium, freon, adiabatic compression, refrigerating capacity. vapor-compression cooling system.

Система охлаждения, является одной из основных составляющих любой энергетической установки. От ее эффективности зависят: удельная мощность, режимы и условия эксплуатации, а также массогабаритные характеристики и КПД самой системы охлаждения. Тенденция к повышению удельной мощности энергетических машин и ведущимися разработками перспективных тяговых систем с комбинированным двигателем (ДВС с электро-трансмиссией) [1], ставит вопрос поиска альтернативных классической системе охлаждения систем, использующих процессы кипении и конденсации рабочего агента, как более эффективные с точки зрения теплоотдачи. Указанные системы и способы охлаждения описаны в работах авторов [2-5]. В таких системах необходимо использовать рабочие агенты с высокой температурой кипения T_0 при нормальных условиях, которая находится в границах от 40°C до 80°C, а сами рабочие агенты которые согласно [6] отнесены к высокотемпературным.

Существующие парокомпрессионные системы: тепловые насосы, кондиционеры и холодильные машины используют рабочие агенты, температура кипения T_0 которых находится значительно ниже 40°C и их энергетическая эффективность, в отличие от высокотемпературных агентов, хорошо изучена.

Таким образом, выбор высокотемпературного рабочего агента для парокомпрессионных систем охлаждения, имеющего наибольшую удельную холодопроизводительность при достаточной экологической безопасности, приобретают особую актуальность.

В качестве высокотемпературных рабочих агентов в настоящей работе выбраны: фреон-132b (T_0 = 46.8°C, критическая температура $T_{КР}$ = 218°C, ODP=0.008-0.05), фреон-253 (T_0 = 45.1°C, критическая температура $T_{КР}$ = 192°C, ODP=0.003-0.03), фреон-10 (T_0 = 76.75°C,

критическая температура $T_{КР}$ = 283.2°C, ODP=0.73) и Гексафторбензол (T_0 = 80.1°C, критическая температура $T_{КР}$ = 242.9°C, ODP=0). Для сравнения энергоэффективности высокотемпературных рабочих агентов и среднетемпературных, использовался фреон-133a (T_0 = 6.1°C, критическая температура $T_{КР}$ = 155°C, ODP=0.02-0.08).

Расчет затрат энергии на работу адиабатного сжатия рабочего агента производился по данным таблиц теплофизических свойств [7], с использованием уравнения:

$$l_{a,i} = \left(P_{interp}(T_1)\right)\cdot\left(\nu_{interp}\left(T_1\right)\right)\cdot\frac{k}{k-1}\cdot\left(\left(\pi_i\right)^{\frac{k-1}{k}}-1\right) \quad (1)$$

где $i \in 1...n$ - диапазон расчета, n - целое число;

$P_{interp}(T_1)$ и $\nu_{interp}\left(T_1\right)$ - соответственно функции для определения значений давления и удельного объема фреона в начале процесса сжатия по значению температуры путем интерполяции данных в таблицах [7];

$\pi_i = \frac{P_{i+1}^{interp}(T_{i+1})}{P^{interp}(T_1)}$ - степень повышения давления в цикле сжатия рабочего агента.

Холодопроизводительность рассчитывалась при сжатии в идеальном компрессоре по отношению:

$$\varepsilon_i = \frac{i_{i+1}^{'interp}(T_{i+1}) - i_1^{''interp}(T_1)}{l_{a,i}} \quad (2)$$

где $i_{i+1}^{'interp}(T_{i+1})$ и $i_1^{''interp}(T_1)$ - соответственно функции для определения значений энтальпии рабочего агента на линии насыщения со стороны жидкости и перегретого пара по значению температуры путем интерполяции данных в таблицах [7].

Результат расчета затрат энергии на работу сжатия по (1) в зависимости от температуры насыщения $l_a = f(T)$ представлен на рис. 1, в зависимости от степени повышения давления $l_a = f(\pi)$ на рис. 2. Результат расчета холодопроизводительности по (2) для каждого из рассматриваемых рабочих агентов представлен на рис. 3, как функция от температуры конденсации $\varepsilon = f(T)$.

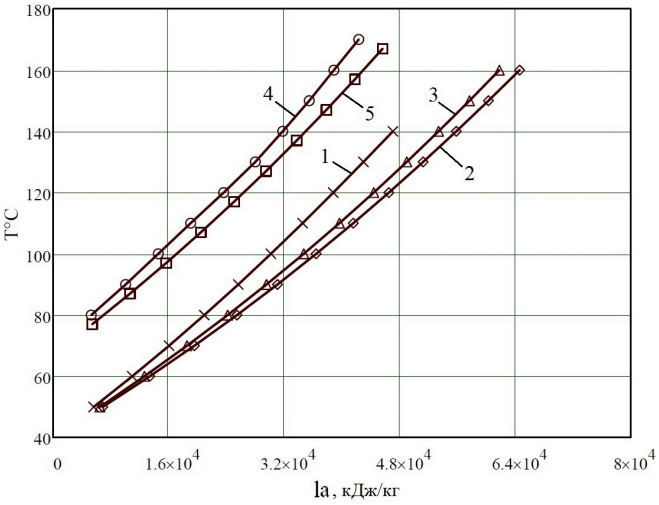


Рис. 1. Затрата энергии на работу сжатия в зависимости от температуры насыщения для рабочих агентов: 1 – фреон-133a, 2 – фреон-253; 3 – фреон-132b; 4 – Гексафторбензол; 5 – фреон-10.

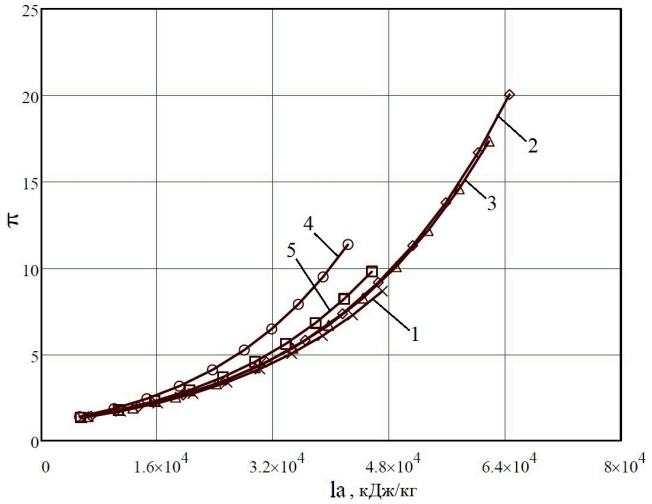


Рис. 2. Затрата энергии на работу сжатия в зависимости от степени повышения давления для рабочих агентов: 1 – фреон-133a, 2 – фреон-253; 3 – фреон-132b; 4 – Гексафторбензол; 5 – фреон-10.

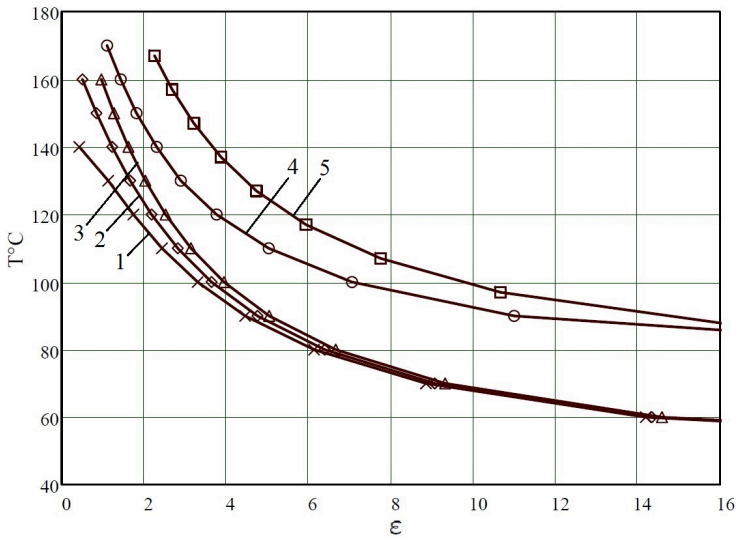


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента в зависимости от температуры насыщения для рабочих агентов: 1 – фреон-133a, 2 – фреон-253; 3 – фреон-132b; 4 – Гексафторбензол; 5 – фреон-10.

Из рисунков 1 и 2 видно, что в первом случае у высокотемпературных рабочих агентов с температурой кипения T_0 близкой к нижней границе (40°C), фреон-132b, при одинаковой температуре насыщения T, имеет меньшую затрату энергии на работу сжатия, чем фреон-253 при фактически одинаковой степени повышения давления π. Во втором случае у рабочих агентов с температурой кипения T_0 близкой к верхней границе (80°C), при одинаковой температуре насыщения T и степени повышения давления π, Гексафторбензол также имеет меньшую затрату энергии на работу сжатия.

Холодильный коэффициент ε (см. рис. 3) в первом случае при одной и той же температуре насыщения T, у фреона-132b больше, чем у фреон-253, а во втором случае, у фреона-10 больше, чем у Гексафторбензола. Поэтому для систем охлаждения, работающих при температуре охлаждения близкой к нижней границе, наиболее предпочтительно использовать фреон-132b, а в верхней границе фреон-10. Однако у фреона-10 достаточно высокий ODP и он не является экологически безопасным, поэтому Гексафторбензол среди представленных рабочих агентов является безальтернативным.

В заключение статьи следует отметить, что среди рассмотренных рабочих агентов, фреон-133a имеет самую низкую энергоэффективность, что связано с уменьшением теплоты парообразования при росте температуры насыщения, поэтому использование рабочих агентов применяемых в холодильной технике и системах кондиционирования и имеющих низкую температуру кипения T_0 при нормальных условиях, в парокомпрессионных системах охлаждения не целесообразно.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Илимбетов Р.Ю., Астапенко А.М.* Разработка компоновочной схемы комбинированной энергетической установки для грузового автомобиля с улучшенными экологическими показателями // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение», 2013, Т 13. № 1. С. 72-78.

2. *Утиленко А. И.* Принципы построения высокоэффективных систем охлаждения электронных приборов. Дис. … докт. техн. наук. Рязань.: РГРТУ, 2009. 419 с.

3. *Склифус Я.К.* Сокращение энергопотребления системы охлаждения дизеля тепловоза изменением функциональной схемы и способа передачи тепла. Дис. … канд. техн. Наук. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2015. 159 с.

4. *Карелин Д.Л.* Моделирование параметров парожидкостной компрессионной системы охлаждения энергетических установок. // Тез. докл. Международная конф. «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы-2016». Казань: АО «КНИАТ»,

2016. Т. 2. С. 79-83.

5. *Карелин Д.Л.* Оценка эффективности системы охлаждения с парожидкостной компрессионной установкой // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 9. С. 408-415.

6. *Морозюк Т.В.* Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса.: Студия «Негоциант», 2006. 712 с.

7. *Максимов Б.Н., Баранов В.Г., Зотиков В.С.* Промышленные фтороорганические продукты. Справ. изд. Л.: Химия, 1990. 464 с.

УДК 621.315.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОРЕГУЛИРУЮЩИХСЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ
STUDY OF TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF SELF-REGULATING HEATING CABLES

Юлия Николаевна Андреева
Julia N. Andreeva

Тюменский индустриальный университет, Россия, Тюмень
Industrial university of Tyumen, Russia, Tyumen
(e-mail: andreeva-julia98@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены нагревательные саморегулирующиеся кабели разных температурных групп, проведен анализ эффективности с помощью относительной жесткостью участка температурной характеристики.

Abstract: Self-regulating heating cables of different temperature groups were considered, the efficiency analysis were conducted by using the relative stiffness plot of the temperature characteristics.

Ключевые слова: саморегулирующиеся нагревательные кабели, температурная характеристика.

Keywords: self-regulating heating cables, temperature characteristic.

Развитие промышленности России тесно связано с продвижением основных нефтегазодобывающих районов в Восточную Сибирь и Арктику, с переходом к добыче высоковязких продуктов, а также с повышением требований к стабильности протекания технологических процессов. Все это способствует более широкому применению промышленного кабельного электрообогрева.

По экспертной оценке на Ванкорском месторождении установленная мощность систем электрообогрева составляет 30% от всей установленной мощности электрооборудования. Такая ситуация характерна для регионов с крайне низкими средними температурами, где электрообогрев уже уверенно стремится занять второе место по установленной мощности после электрического привода и по этой причине требует самого серьезного подхода при проектировании для обеспечения надежной и эффективной эксплуатации.

Системы промышленного кабельного электрообогрева существуют различных типов в зависимости от используемого нагревательного устройства (саморегулирующегося и резистивного кабеля, индукционно-резистивного нагревателя и т.д.), область применения которых зависит от большой степени от размеров обогреваемого объекта. При этом саморегулирующиеся кабели используются для обогрева широкого круга объектов: локальных зон [1], трубопроводов, резервуаров, запорной арматуры и т.д.

Саморегулирующийся нагревательный кабель представляет собой две параллельные проводящие жилы, между которыми размещен полимерный материал с обратнозависимой температурной характеристикой сопротивления. Эффект саморегуляции кабеля заключается в том, что величина тока, протекающего через полимерный материал, и, соответственно,

генерируемая мощность на холодных участках кабеля больше, чем на теплых, так как на холодных участках меньше удельное электрическое сопротивление. Значение этого эффекта предлагается оценивать относительной жесткостью участка температурной характеристики-величиной, равной относительному приращению удельной мощности кабеля на участке характеристики с обратным знаком к приращению температуры в соответствии с формулой(1); данная характеристика определяет скорость снижения удельной мощности кабеля при увеличении температуры обогреваемого объекта: чем ниже значение, тем характеристика жестче, тем меньше проявляется эффект саморегуляции.

$$\beta = \frac{(P_1 - P_2)/P_1}{\Delta T} \quad (1)$$

где β-относительная жесткость участка температурной характеристики нагревательного кабеля, $К^{-1}$;

ΔТ-разница температур на участке температурной характеристики нагревательного кабеля,К;

P_1-удельная мощность в начале участка тепературной характеристики нагревательного кабеля, Вт/м;

P_2-удельная мощность в конце участка температурной характеристики нагревательного кабеля, Вт/м.

Необходимо отметить, что резистивные нагревательные кабели постоянной мощности, нагревательные жилы которых обычно выполняют из меди, также обладают свойства саморегуляции за счет температурного коэффициента сопротивления меди, но эти свойства имеет обратную зависимость, если перегретыми являются отельные участки кабеля, сопротивление которых мало влияет на сопротивление всего контура электрообогрева, так как мощность на этих участках возрастает; но если температура резистивного кабеля повышается на всем его протяжении, то общая мощность контура обогрева падает в соответствии с законом Джоуля-Ленца.

Саморегулирующиеся кабели по максимальной температуре применения делятся на группы: низкотемпературные, на основе полиолефинов, обычно применяемые до температуры 85 С; высокотемпературные, на основе фторполимеров, обычно применяемые до температуры 260 С, что соответствует температуре пропарки. Тип используемого полимерного материала существенно влияет на температурную характеристику кабеля: так у низкотемпературных саморегулирующихся кабелей относительная жесткость температурной характеристики сопротивления сравнительно низкая, а у высокотемпературных-высокая. Также существуют среднетемпературные саморегулирующиеся кабели, основанные на фторполимерах, обычно применяемые до температуры 110..150 С, относительная жесткость характеристик, которых можно отнести к одной из указанных групп.

Широкое применение саморегулирующихся кабелей обусловлено рядом их преимуществ: снижением потребляемой электроэнергии за счет эффекта саморегуляции; простым расчетом параметров контура электрообогрева; саморегулирующийся кабель не перегорает при укладке внахлест и др. Однако как отмечалось выше, эффект саморегуляции зависит от температурной группы кабеля, и для создания энергоэффективных систем электрообогрева эту зависимость необходимо учитывать.

В таблице 1 и на рис.1 приведена относительная жесткость температурных характеристик саморегулирующихся нагревательных кабелей по каталожным данным трех различных производителей, а также резистивного кабеля с температурным коэффициентом сопротивления 0,0043 $К^{-1}$

Таблица 1. Относительная жесткость температурных характеристик

№ п/п	Производитель и тип саморегулирующегося кабеля	Степень жесткости температурной характеристики на участке от 0 С до максимальной температуре поддержания 10^{-3} $К^{-1}$			
1	Thermon, низкотемпературные (BSX)	10-2	8-2	5-2	3-2
		13,2	13,8	13,5	13,3
2	Pentair, низкотемпературные (BTV)	10-2	8-2	5-2	3-2
		14,0	13,3	14,4	15,0
3	eltherm, низкотемпературные (ELSR-LS)	30-2	25-2	15-2	-
		14,0	15,8	16,6	-
4	Thermon, среднетемпературные (KSX)	20-2	15-2	10-2	5-2
		4,2	5,2	7,4	11,0
5	Pentair, среднетемпературные (QTVR)	20-2	15-2	10-2	-
		7,2	8,0	8,3	-
6	eltherm, среднетемпературные	отсутствуют			
7	Thermon, высокотемпературные (HTSX)	20-2	15-2	12-2	9-2
		3,9	5,2	6,0	6,3
8	Pentair, высокотемпературные (XTV)	20-2	15-2	12-2	8-2
		3,8	4,8	4,5	4,9
9	eltherm, высокотемпературные (ELSR-H)	20-2	15-2	10-2	-
		5,0	5,3	6,0	-
10	Медный кабель постоянной мощности при ΔT=10 С	4,1			
11	Медный кабель постоянной мощности при ΔT=65 С	3,4			
12	Медный кабель постоянной мощности при ΔT=120 С	2,8			

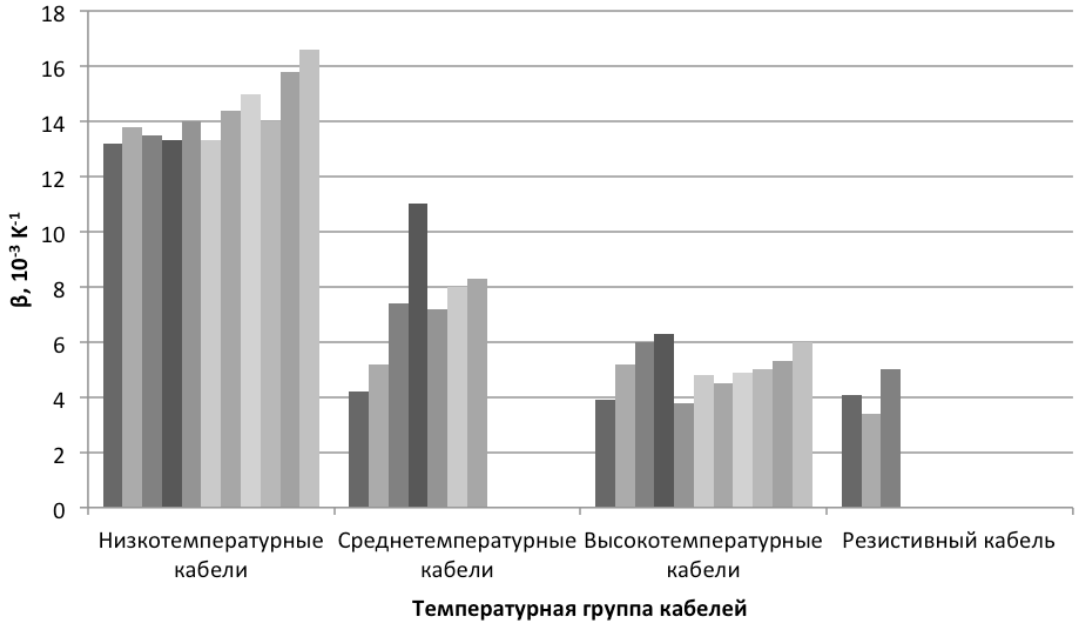


Рис. 1 Относительная жесткость температурных характеристик

Для расчета характеристики низкотемпературных кабелей был взят диапазон температур 0..65 С,для среднетемпературных и высокотемпературных- 0..120 С, кроме кабеля QTVR, для которого использовался диапазон 0..110 С в связи с указанной максимальной температурой поддержания 110 С. Так как относительная жесткость температурной характеристики кабеля постоянной мощности отличается для разных диапазонов температур, то было рассмотрено несколько диапазонов.

Как видно из таблицы 1 и рис.1 относительная жесткость температурных характеристик кабелей разных производителей внутри групп высокотемпературных и низкотемпературных различаются незначительно. Больший разброс значений есть в группе среднетемпературных кабелей. Относительная жесткость температурных характеристик саморегулирующихся кабелей изменяется от 16,6 до 3,8 и имеет большее значение у низкотемпературных кабелей, отличаясь от относительной жесткости температурной характеристики кабеля постоянной мощности в 4..5 раз; для высокотемпературных кабелей соответственно в 2,3..1,4 раза. При этом неоходимо отметить. Что обогреваемые объекты обычно имеют небольшую разницу температур в процессе эксплуатации. Так на участке температурной характеристики ΔT =10 С относительная жесткость температурных характеристик резистивного кабеля и высокотемпературного саморегулирующегося будет отличаться в 1,54..0,95 раза, то есть применение саморегулирующегося кабеля может быть менее эффективным, чем кабеля постоянной мощности. Такая ситуация может встречаться на трубопроводах с пропаркой, когда разница между минимальной и максимальной температурой эксплуатации объекта значительно выше, чем между минимальной и максимальной температурой поддержания.

Выводы:

-наибольший эффект саморегуляции проявляют низкотемпературные саморегулирующиеся кабели;

-высокотемпературные саморегулирующиеся кабели сравнимы по эффекту саморегуляции с резистивными кабелями постоянной мощности и в некоторых случаях могут проявлять данный эффект слабее;

-необходимо разработать методику оценки эффективности применения саморегулирующихся кабелей для различных объектов, в том числе в сравнении с кабелями постоянной мощности;

ЛИТЕРАТУРА

1.*Смирнов В.В*. Локальные зоны электрообогрева. Проблема замерзания обратных клапанов устьевой арматуры / Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2012.-№5.-С.488-495.

УДК 664.661.2:664.87

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ КРИОПОРОШКОВ ИЗ ПЛОДОВ И ЯГОД
TECHNOLOGY OF RECEIVING AND APPLICATION OF CRYPROTOCKS FROM FRUITS AND BERRIES

Геннадий Иванович Касьянов, Алексей Владимирович Христюк
Gennady I. Kasyanov, Alexey V. Khristyuk

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар
Kuban State Technological University, Krasnodar
(e-mail: g_kasjanov@mail.ru)
Филиал № 1 ЗАО «Московский пиво-безалкогольный комбинат Очаково», г. Краснодар
Branch N 1 CJSC "Moscow beer-non-alcoholic plant Ochakovo", Krasnodar
(e-mail: hristuk_a@mail.ru)

Аннотация. Целью исследований является получение концентрированных пищевых добавок из отечественного растительного сырья. Для достижения этой цели решаются задачи получения порошков из плодов и ягод с максимальным сохранением БАВ исходного сырья при сушке. Высококачественные порошки из плодов абрикоса, облепихи, тыквы, фейхоа и хурмы получают по криогенной технологии, с использованием жидкого азота на одной или нескольких стадиях технологического процесса.

Abstract. The aim of the research is to obtain concentrated food additives from domestic plant raw materials. To achieve this goal, the tasks of obtaining powders from fruits and berries are solved with maximum preservation of BAC of the raw material during drying. High-quality powders from fruits of apricot, sea-buckthorn, pumpkin, feijoa and persimmon are obtained by cryogenic technology, using liquid nitrogen at one or several stages of the technological process.

Ключевые слова: плоды, ягоды, криопорошки, размер частиц, химический состав

Keywords: fruits, berries, cryopowders, particle size, chemical composition

Апробирована технология получения и применения криопорошков из плодов и ягод, измельченных в жидком азоте. Приведена сравнительная характеристика состава криопорошков из абрикоса, облепихи, тыквы, фейхоа и хурмы. Результатами исследований подтверждена целесоообразность использования криопорошков из плодов и ягод для обогащения различных пищевых продуктов.

Существующие за рубежом способы получения быстровосстанавливаемых порошков основаны на методе конвективной сушки, с суммарной энергоёмкостью в пределах 1,2-1,4 кВт/ч. Недостатком таких продуктов является невозможность измельчения до сверхтонкого состояния.

Плодовое и ягодное сырье является ежегодно возобновляемым продуктом и применяется для получения натуральных пищевых добавок.

Сушеные плоды и ягоды активно используются при производстве напитков [1]. Шрот после извлечения экстрактивных веществ применяют для обогащения состава хлебобулочных и кулинарных изделий [2].

Известны способы получения порошков из растительного сырья с использованием электромагнитного поля, вакуума и солнечной энергии [3,4].

Получение криопорошков предусматривает комбинированное обезвоживание плодов и ягод при сравнительно низких температурах, сверхтонкое измельчение сухого сырья в среде жидкого азота, с целью более полного сохранения ценных компонентов исходного сырья.

Впервые разработана отечественная технология получения мелкодисперсных порошков из плодов и ягод с применением электромагнитной, солнечной энергии и криопомола в среде жидкого азота, позволяющая сохранять ценные свойства продукта.

Практическая ценность полученных результатов для практики заключается в промышленном внедрении технологии получения криопорошков из плодов и ягод, предназначенных для обогащения широкого круга пищевых продуктов.

Сотрудниками КубГТУ предложены оригинальные технические приемы, позволяющие усовершенствовать технологию производства плодовых и ягодных криопорошков; разработаны методические рекомендации по производству порошков с применением криогенной техники; проект технических условий и технологической инструкции «Фруктовые и ягодные криоизмельчённые порошки».

Под руководством автора усовершенствована технология получения плодовых и ягодных криопорошков. Применяемая в новой технологии комбинированная сушка плодов и ягод позволяет сохранить ценные компоненты исходного сырья.

Разработана технология и подобрано оборудование для производства криопорошков из разных видов плодов и ягод, направленная на решение проблемы полноценного питания человека за счёт введения в пищу добавок, которые компенсировали бы отсутствующие или недостающие компоненты.

Использование криопорошков в качестве пищевых добавок позволяет создавать высокопитательные смеси, с ярко выраженным вкусом и ароматом свежих фруктов и ягод.

Фруктовые и ягодные криопорошки уже используются при производстве киселей, морсов, напитков, соков и соусов на базе отечественного растительного сырья с высокой долей БАВ. Имеется опыт обогащения пищевых концентратов первых и вторых блюд порошками из корнеплодов и пряной зелени.

Наибольшие перспективы имеют криопорошки из плодов и овощей как вкусовые и биологически активные добавки при производстве напитков, йогуртов, творожных масс, кисломолочной продукции, хлебобулочных и кондитерских изделий, мороженого, пюреобразных супов быстрого приготовления. Криоизмельченные лекарственные травы содержат набор ценных природных компонентов, сохранивших лечебное и лечебно-профилактическое действие.

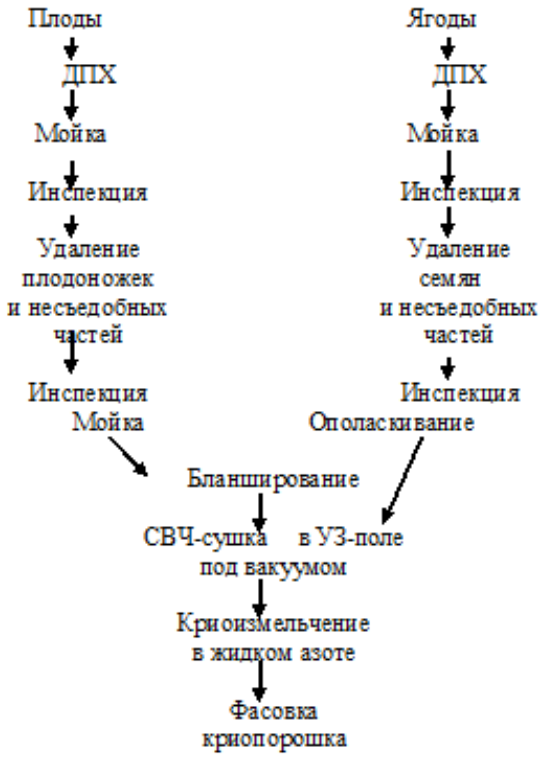


Рисунок 1 – Структурная схема производства криопорошков из растительного сырья

На рисунке 1 приведена структурная схема производства криопорошков из плодов и ягод.

Химический анализ состава сырья и криопорошков выполняли с использованием аналитических приборов и лабораторного оборудования кафедры технологии продуктов питания животного происхождения КубГТУ. Определение химических и микробиологических характеристик сырья и готовой продукции проводили с учетом требований Технического регламента Таможенного союза, с использованием спектральных и хроматографических методов. Режимы процесса сушки контролировали инфракрасным термометром и прецизионным цифровым манометром ДМ 5002, гранулометрический состав – счётчиком «Коультера ТА-11.

Были проведены исследования химических и физических свойств различных фракций криопорошков, которые показали, что химический состав различных фракций определяется свойствами исходных продуктов и не зависит от гранулометрического состава. Исследование растворимости различных фракций показало, что она возрастает обратно пропорционально размеру частиц (таблица 1).

Таблица 1 – Зависимость растворимости криопорошков абрикоса, облепихи, тыквы, фейхоа и хурмы от размеров частиц (% к массе)

Линейные размеры частиц, мм	Наименование криопорошков				
	абрикос	хурма	облепиха	фейхоа	тыква
более 0,50	35,8	37,6	36,7	65,3	60,0
0,50-0,25	39,6	48,5	46,8	69,8	64,0
0,25-0,15	41,2	52,8	50,8	71,2	67,6
0,15-0,10	43,7	54,7	53,7	72,9	69,0
0,10-0,07	50,1	59,7	58,6	74,7	69,2
менее 0,07	52,0	60,6	60,3	76,0	84,8

Реологические свойства полупродуктов и готовых смесей оценивали на вискозиметрах «Brookfield», «Haake ReoVin» и «Реотест». Установлено снижение вязкости изучаемых систем с увеличением скорости сдвига, с получением дисперсной системы неньютоновского типа. Гранулометрический состав порошков влияет на величину эффективной вязкости: фракция от 250 до 500 мкм имеет эффективную вязкость в 20-25 раз выше, чем фракции от 0 до 250 мкм.

В лабораторных условиях кафедры технологии продуктов питания животного происхождения КубГТУ отработаны технологические параметры и оптимальное соотношение рецептурных компонентов продуктов с криопорошком из тыквы.

Дисперсность полученных частиц всех образцов находится в интервале 10-100 мкм, в то время как при обычном помоле получаются частицы размером от 50 до 500 мкм.

Установлено, что измельчение предварительно замороженных сухих плодов и ягод позволяет значительно уменьшить удельную энергию разрушения структуры продукта, чем при комнатной температуре. Оптимизация процесса измельчения сырья до тонкодисперсного состояния стало возможной благодаря выбору соотношения масс продукта, жидкого N_2 и ударных шаров.

Условия продовольственной безопасности плодовых и ягодных криопорошков сформулированы в соответствии с требованиями технического регламента Таможенного союза. Технические и микробиологические требования к производству натуральных пищевых добавок в форме криопорошков представлены в проекте технической документации (ТУ и ТИ).

Высушенный продукт измельчается в криомельнице в среде жидкого азота и поступает в фасовочно-упаковочную машину, где осуществляется упаковка готового порошка в герметичную тару. В процессе сушки сырья на установке дистанционно измеряли температуру продукта, корпуса криомельницы и стальных шаров. Результаты измерений представлены в виде уравнений регрессии, связывающие технологические параметры процессов сушки и криоизмельчения. Опытно-промышленные испытания усовершенствованной линии для получения плодовых и ягодных криопорошков позволили рекомендовать следующие режимы обработки сырья: форму нарезки тыквы и яблок – ломтики или кубики толщиной 5 мм, количество сырья единовременно поступающее в сушилку до 100 кг, время СВЧ-сушки в УЗ-поле под вакуумом 30 мин. Установлены температурные режимы сушки – 30-50 ^{o}C, влажность готового продукта 6 %, количество жидкого азота на 1 кг продукта – 2:1, время криоизмельчения – до 20 мин.

Разработанные режимы корректируются индивидуально в зависимости от видов перерабатываемого сырья. В соответствии с задачами исследования определялся химический состав плодовых и ягодных порошков. В таблице 2 приведен химический состав плодовых и ягодных криопорошков.

Таблица 2 – Химический состав плодовых и ягодных криопорошков

Наименование криопорошка	Вода %	Белки %	Жир %	Углеводы %	Клетчатка	Зола %	К мг%	Са мг%	Mg мг%	Р мг%	B_1 мг%	B_2 мг%	С мг%	РР мг%
Абрикос	6,5	7,7	0,2	66	3,8	4,6	1870	160	170	3	0,2	0,3	63	4
Хурма	7,9	4,8	0,3	69,2	12,6	6,5	2345	170	102	118	0,1	0,3	125	3
Облепиха	6,7	14,9	24,1	71	18,6	7,9	420	390	320	88	0,4	0,4	72	6
Фейхоа	6,3	4,2	0,4	70	9,6	3,7	420	390	320	89	0,1	0,4	89	9
Тыква	6,9	9,1	0,3	67	12,0	5,0	1590	380	146	259	0,6	0,4	83	5

В составе криопорошков определено также содержание антоцианов, биофлавоноидов, пектина, фитонцидов. Выполнены исследования по обогащению яблочных напитков с мякотью криопорошками абрикоса, тыквы, облепихи, фейхоа и хурмы. Микробиологические и физико-химические исследования подтвердили возможность увеличения сроков хранения напитков, обогащенных плодовыми и ягодными криопорошками. Таким образом, результатами исследований подтверждена целесоообразность использования криопорошков из плодов и ягод для обогащения состава разнообразных пищевых продуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселева Т.Ф., Ушакова А.С., Иванов П.П. Разработка технологии и рецептуры напитков с использованием сушеных фруктов //Техника и технология пищевых производств, выпуск № 1 (36), 2015. – С. 35-40.

2. Никулина Е.О. Разработка технологических процессов производства мучных кондитерских, хлебобулочных и кулинарных изделий с добавлением облепихового шрота. Автореф. дис. к.т.н. СПб, 2001. – 24с.

3. Патент РФ № 2494641. МПК A 23 L 1/025. Способ производства криопорошка из тыквы с использованием ЭМП СВЧ и солнечной энергии /Джаруллаев Д.С., Рамазанов А.М., Яралиева З.А. Заявка № 2012130626/13, заявлено 17.07.2012. Опубликовано 10.10.2013.

4. Petrov A.N., Maslennikova G.A Physical and chemical Aspects of vacuum Dryng of Berry raw Materials //Foods and Raw Materials, 2016, vol. 4, no. 1.– Pp. 129-134.

УДК 658.511

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КВАЛИФИКАЦИЙ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ
THE FORMATION OF THE QUALIFICATIONS SYSTEM AT THE REGIONAL LEVEL

Анатолий Константинович Лазаренко
Anatoly K. Lazarenko

Союз «Объединение работодателей Тюменской области», Россия, Тюмень
Union "Union of employers of the Tyumen region", Russia, Tyumen
(e-mail: lazarenko.anatolij@yandex.ru)

Аннотация: Интеграция России в мировую экономическую систему требует глубокого понимания сущности реформ в системах образования и кадрового обеспечения. Важнейшим принципом системы квалификации является добровольность, то есть ответственность за результаты интеграции лежит не только на государстве, но и на всех заинтересованных сторонах (стейкхолдерах).

Abstract: the Integration of Russia into the world economic system requires a deep understanding of the essence of reforms in education systems and staffing. The essential principle of the qualification system is voluntary, that is, the responsibility for integration rests not only on the state but also on all interested parties (stakeholders).

Ключевые слова: система, национальная система квалификаций, социальное партнерство, профессиональный стандарт, региональный стандарт кадрового обеспечения промышленного роста, инженерный подход, эффективность.

Key words: system, national system of qualifications, social partnership, professional standard, regional standard staffing industrial growth, the engineering approach, efficiency.

В структуре производительных сил кадры занимают ведущее место. От профессиональных знаний и умений административно-управленческого и производственного персонала зависит эффективность и качество принимаемых решений, производительность труда и, в конечном счёте, конкурентоспособность экономики любого масштаба.

Наиболее сложной задачей является приведение национальной системы квалификаций к международной (универсальной) **системе квалификаций. Непонимание сущности** национальной системы квалификаций является узким местом, т.е. тем **«критическим моментом»**, о котором так много говорится, когда речь заходит о подготовке кадров для национальной экономики.

Таким образом, наличие высокоэффективной системы кадрового обеспечения, способной постоянно адаптироваться к запросам инновационной экономики, быстро реагировать на запросы общества в профессионалах высокой квалификации, является важнейшей задачей любого государства, любого бизнеса. Решать эти задачи призван зарождающийся институт – **национальная система квалификаций.**

Подойдём к решению задач кадрового обеспечения с **инженерной точки зрения**. Инженерный подход заключается в способности применять законы физики при решении созидательных задач, поиска узких мест, т.е. **критических моментов,** их устранения или оптимизации.

Все системы изоморфны, т.е. обладают сходными свойствами, будь–то астрономические, геологические, биологические инженерные или социальные. Разрыв в развитии или развитие на разных скоростях отдельных частей, элементов любой системы несёт угрозу всей системе, и системы профессионально образования и кадрового обеспечения не исключение.

Система профессионального образования имеет большую массу, по сравнению с зарождающимся институтом – Национальной системой квалификаций, соответственно обладает и большей инерцией. Однако, как показала практика, вместо того, чтобы вникнуть в смысл создаваемой системы, и создания механизмов и устройства, позволяющих изменить траекторию по-прежнему активно работают механизмы **позволяющие сохранить инерцию**.

Подготовка квалифицированных кадров как раз является тем **«критическим моментом»,** который мы никак не можем разрешить на протяжении многих лет.

Задачи по улучшению управления промышленностью, совершенствованию планирования и усилению экономического стимулирования промышленного производства были обозначены ещё в докладе Председателя совета Министров СССР А.Н.Косыгиным на Пленуме ЦК КПСС 27 сентября 1965 года. В докладе ответственность возлагалась на Министерство высшего и среднего специального образования и Госплан СССР.

Необходимость модернизации системы кадрового обеспечения, включая создание условий для объективной оценки квалификаций работников, особенно обострилась именно в Тюменской области, при освоении Ямбургского газоконденсатного месторождения. Крупные государственные и хозяйственные руководители СССР - В.С.Черномырдин, Ю.П.Баталин, Б.Е.Щербина, В.Г.Чирсков, Г.П.Богомяков, И.А.Шаповалов и др. уже тогда предпринимали меры по повышению мобильности кадров и отбору специалистов по реальным умениям, а не по наличию дипломов, свидетельств и прочих регалий. Ведь за «длинным рублём» многие стремились на север, и надо было как – то отбирать работников способных работать на современной технике, решать множество организационных, инженерно-технологических и социальных задач. Кстати, Ю.П.Баталин в своё время был Председателем Госкомтруда СССР, поэтому, хорошо представлял и знал, что и как надо делать.

Первым, из постсоветских руководителей ещё 10 февраля 2000 года, отразившим в нормативно-правовом акте необходимость разработки **профессиональных стандартов,** создания системы независимой оценки профессиональных квалификаций и информационно-консультационного обеспечении в АПК, был председатель Правительства РФ В.В.Путин. Однако, приказом Минсельхоза России в 2001 году предлагаемая модель была видоизменена и развитие пошло другим путём.

Практика встраивания в международную экономику показала, что задержки и отклонения от стратегического замысла по созданию **экономики основанной на знаниях,** в т.ч. важнейшего института - **национальной системы квалификаций**, будут ограничивать экспортный потенциал. Тем самым девальвируются все меры государственной поддержки во всех отраслях, индустриях и видах экономической деятельности.

Исчезает необходимость изучать международные стандарты, регламенты, директивы, кодексы и адаптировать к ним отечественные нормы и правила. И главное, мы не сможем создавать собственные инновации, а продолжим пользоваться чужими и не самым лучшим образом. Все попытки обрести европейскую технологическую и управленческую культуру, по-прежнему **осуществляются поверхностно**, по понятиям и предпочтениям отдельных лиц и (или) предпринимательских сообществ, зачастую преследующих эгоистические цели в **ущерб национальным интересам**.

Причин много, одной из них является сложившееся убеждение, что наша система образования, включая систему профессионального образования **«самая лучшая»** и нет смысла что-то менять. Но тогда возникает резонный вопрос, почему производительность труда у нас в 2-3 раза ниже, чем у работников в странах с развитой экономикой. Ссылки на устаревшие технологии не более чем лукавство, т.к. технологическую политику формирует и реализует менеджмент соответствующего уровня.

В настоящее время государственная политика в сфере социально-трудовых отношений, включая кадровое обеспечение, направлена на то, чтобы мы, как социальные партнёры, объединили интеллектуальные и материальные ресурсы и изменили ситуацию. Мы же никак

не можем вырваться из парадигмы в сфере высшего и специального образования сложившейся ещё в СССР.

В России создана и развивается Национальная система квалификаций (НСК). Наша задача на данном этапе создать региональную инфраструктуру и приступить к опытному применению процедур, связанных с оценкой профессиональных квалификаций и профессионально-общественных аккредитаций образовательных программ. Эти задачи давно могли бы решить, если бы вникли в сущности Болонского процесса, Копенгагенской декларации, Маастрихтского коммюнике, а не ударились в необоснованную критику и не чинили препятствия.

После майских указов Президента Российской Федерации В.Путина и Указа от 14.04.2014 № 249 «О Национальном совете при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям», внесены изменения в Трудовой кодекс Российской Федерации, Федеральный закон «О техническом регулировании », Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации», Федеральный закон «Об объединениях работодателей».

Вступил в силу Федеральный закон «О независимой оценке квалификации», изданы Постановления Правительства Российской Федерации, касающиеся реализации государственной политики в области кадрового обеспечения. Государственная кадровая политика перестала носить фрагментарный характер и всё больше приобретает признаки системы.

Это вселяет уверенность, что усилия, направленные на модернизацию системы кадрового обеспечения и профессионального образования, будут поддержаны в профессиональном сообществе всех отраслей и масштабов производства. Мобилизовав все силы и средства, мы выведем экономику из кризиса и займём достойное место в мировой экономической системе. По-другому не получится, слишком опасная внешнеполитическая ситуация и ненадёжное окружение. **Рассчитывать приходится только на самих себя.**

На федеральном уровне все необходимые структуры и атрибуты НСК в основном созданы. К ним относятся:

- Национальный совет при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям (НСПК);
- Национальное агентство развития квалификаций (НАРК);
- Отраслевые советы по профессиональным квалификациям (СПК).

На региональном уровне необходимо создать и развить части и элементы национальной системы квалификаций и организовать взаимодействие со структурами федерального уровня, т.е. встроиться в систему. К региональной инфраструктуре относятся:

- Межведомственная комиссия по профессиональным квалификациям в Тюменской области;
- Региональный методический центр по квалификациям в Тюменской области (РМЦ);
- Центры оценки квалификаций.

Развитие системы кадрового обеспечения поддерживается Правительством Тюменской области. В рамках XX Петербургского международного экономического форума заключено соглашение с Агентством стратегического развития (АСИ) по внедрению регионального стандарта кадрового обеспечения промышленного роста. Распоряжением Правительства Тюменской области утверждена дорожная карта внедрения **регионального стандарта кадрового обеспечения промышленного роста.**

Ключевыми участниками апробации внедрения регионального стандарта кадрового обеспечения промышленного роста, также являются члены отраслевых объединений работодателей. В настоящее время предстоит **адаптировать мероприятия** по внедрению регионального стандарта кадрового обеспечения промышленного роста к мероприятиям, проводимым НСКП.

Существенной частью обеспечения гарантий качества специалистов является «внешний контроль». Его необходимость все больше признается и должна планироваться в деятельности отраслевых ассоциаций и союзов, как это делается в странах с развитой экономикой.

Чтобы эти системы приносили пользу заинтересованным сторонам, в том числе работодателям, работникам и студентам, их необходимо формулировать в понятных и релевантных терминах.

На пути модернизации экономки по-прежнему главным препятствием является недопонимание сущности НСК и роли работодателей и объединений работодателей в системе. Действительно в стране и регионах разрабатывается много разных планов (дорожных карт) и есть непонимание, какие планы являются **приоритетными**, какие механизмы включать для их реализации, **перед кем держать ответ**.

Притом, что цели, задачи, функции и участники проектов и мероприятия во всех планах (дорожных картах), касательно образования и кадрового обеспечения, удивительно совпадают. Это свидетельствует о том, что нам надо всё осмыслить и подрегулировать систему управления кадровым обеспечением на региональном уровне.

В заключение следует отметить, что в странах с развитой экономикой именно отраслевые ассоциации и союзы участвуют в создании регламентов, технических нормативов, занимаются методическим обеспечением, осуществляют независимую оценку профессиональных квалификаций, т.е. дают пропуск в профессию. Деятельность отраслевых объединений в развитых странах с инженерной точки зрения направлена **в будущее**.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берталанфи Л. Общая теория систем: Критический обзор // Исследования по общей теории систем. - М.: Прогресс, 1969. С. 23-82.

2. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. – СПб.Изд-во СПбГТУ, 1997 г.

3. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. Финансы и статистика, 2003.

4. Данелян Т.Я. Теория систем и системный анализ: Учебное пособие. - М.: Изд. МЭСИ, 2005.

5. Лазаренко А.К. Развитие системы управления АПК области (на материалах Тюменской области) Москва, 2001 236 с. РГБ ОД, 61:02-8/1240-5.

6. Лазаренко А.К. Инновационная деятельность в аграрном секторе экономики Тюменской области. Л 17 ББК 65.5(2) 32 УДК 338.43 Г.Тюмень -2009г.

7. Лазаренко А.К. Аналитическая записка «Независимая система оценки и сертификации профессиональных квалификаций – как объективная необходимость» - 2011г.

8. Аниськина Н.Н. Формирование единых требований для оценки качества ДПО. Дополнительное профессиональное образование в стране и мире/ № 6(6) 2013, с. 1-5

9. Блинов В.И., Батрова О.Ф., Есенина Е.Ю., Факторович А.А. Современные подходы к оцениванию квалификаций // Высшее образование в России. 2013. № 5. С. 100–106.

УДК 621.928.9

УЛАВЛИВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В АППАРАТАХ СО ВСТРЕЧНЫМИ ЗАКРУЧЕННЫМИ ПОТОКАМИ
TRAPPING OF FINE DISPERSED MATERIALS IN APPARATUSES WITH COUNTER-SWIRLING FLOWS

Игорь Александрович Попов
Igor A. Popov

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

Аннотация: В работе представлены результаты экспериментального исследования улавливания мелкодисперсного материала в многофункциональном аппарате со встречными закрученными потоками.

Abstract: The paper presents the results of an experimental study of the trapping of fine dispersed material in a multifunctional apparatus with counter-swirling flows.

Ключевые слова: пылеулавливание, встречные закрученные потоки.

Keywords: dust collecting, counter-swirling flows.

Экспериментальные исследования проводились на установке со встречными закрученными потоками, предназначенной для проведения сушки мелкодисперсных материалов с одновременным их улавливанием. Диаметр цилиндрической части составлял 105, 109 мм, а высота ее могла быть изменена в пределах от 210 до 2000 мм. Кроме того, с целью увеличения времени пребывания материала в аппарате (для расширения диапазона подлежащих обработке материалов) аксиональный ввод первичного потока снабжен аксиальным вводом так называемого экранизирующего потока ($V_э$), применение которого, как показало исследование полей скоростей в аппарате приводит «вытягиванию» вертикальной части первичного потока. Нижняя часть аппарата (ниже отбойной шайбы) была снабжена тангенциальными соплами, подача теплоносителя через которые (V_r) позволяет также увеличить время пребывания в аппарате.

Подача мелкодисперсного материала могла осуществляться по первичному каналу, по вторичному каналу и по двум каналам одновременно при помощи шнековых питателей с приводом от вариаторов.

На выходе из аппарата была смонтирована система пылеулавливания, включающая высокоэффективный контрольный циклон и тканевый рукавный фильтр.

Выгрузка дисперсного материала осуществлялась в нижней части приемного бункера через шланговый затвор.

Эффективность улавливания определялось весовым методом с проверкой по балансу.

Навеска дисперсного материала массой 1-5 кг загружалась в бункер шнекового питателя. Большие значения массы соответствовало большей производительности питателя. При достижении высокой степени улавливания обязательно использовалась навеска наибольшей массы. Характеристика материала (гидроокись алюминия)

Плотность: 1350 кг/м^3

Фракционный состав (размер (мм)/ содержание (%)):
0,2/0,01; 0,16/0,5; 0,1/7,5; 0,063/26,6; 0,05/20,2; > 0,05/45,19

Эквивалентный диаметр (мм) 0,039

В результате проведенных экспериментов были установлены зависимости эффективности улавливания от режимных параметров процесса. Исходя из данных о необходимом времени пребывания материала в сушильном аппарате, полученных ранее при

исследовании зависимости удерживающей способности от режимных параметров, было принято целесообразным использовать соотношение $\varepsilon = V_2 / V_1$ пределах 1,0 – 3,0, где V_1, V_2 - объемные расходы теплоносителя через первичные и вторичные вводы соответственно. G - массовый расход дисперсного материала.

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблицах 1-6.

ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ (η) АППАРАТА ВЗП- 105/210 ПРИ ПОДАЧЕ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА ПО КАНАЛАМ

Таблица 1. $V_1 + V_2 = 0{,}02778$ м^3/с; $\varepsilon = 3$.

№	G	η_1	η_2	η_{1-2}
1	0,00055	99,33	99,55	99,07
2	0,00142	99,36	99,52	99,04
3	0,00269	99,32	99,50	99,06
4	0,00369	99,30	99,48	99,05
5	0,00690	99,23	99,48	99,04
6	0,01010	99,16	99,47	99,89
7	0, 01266	99,02	99,36	99,63
8	0,01887	99,22	99,42	99,11

Таблица 2. $V_1 + V_2 = 0{,}02222$ м^3/с; G=0,00847 кг/с; $\varepsilon = 3$.

№	V_τ	η_1	η_2	η_{1-2}
1	0	99,29	99,71	98,87
2	0,00278	98,88	99,48	98,20
3	0,00556	98,10	98,78	97,59
4	0,00833	96,24	97,44	95,81
5	0,01111	92,84	94,22	91,79
6	0,01389	86,95	90,26	84,17
7	0,01667	79,04	85,21	76,19

Таблица 3. $V_1 + V_2 = 0{,}02222$ м^3/с; G=0,00847 кг/с.

№	ε	η_1	η_2	η_{1-2}
1	0,5	-	92,04	89,03
2	1,0	83,90	97,72	94,81
3	2,0	98,59	99,31	98,57
4	3,0	99,29	99,71	98,90
5	5,0	99,42	99,81	99,20
6	7,0	99,64	99,84	99,34
7	9,0	99,68	99,89	99,61
8	10,0	99,81	99,92	99,66

Таблица 4. $V_1 + V_2 = 0{,}02778$ м^3/с; G = 0,00847 кг/с.

№	ε	η_1	η_2	η_{1-2}
1	0,5	82,51	88,53	86,15
2	1,0	88,26	92,65	90,40
3	2,0	97,05	99,25	98,36
4	3,0	99,15	99,45	98,95
5	5,0	99,21	99,49	99,02
6	7,0	99,28	99,65	99,15
7	9,0	99,53	99,82	99,34
8	10,0	99,79	99,91	99,63

Таблица 5. $V_1 + V_2 = 0{,}02222$ м^3/с; G=0,00847 кг/с; ε = 3.

№	$V_э$	η_1	η_2	η_{1-2}
1	0	99,29	99,71	98,89
2	0,00278	99,19	99,58	98,60
3	0,00556	98,48	99,44	97,96
4	0,00833	97,89	99,18	96,38
5	0,01111	96,72	98,39	93,89
6	0,01389	95,36	97,70	91,71
7	0,01667	92,97	96,00	88,37

Таблица 6. $V_1 + V_2 = 0{,}02222$ м^3/с; $G_1 = 0{,}00847$ кг/с.

№	V_τ	η_1		
		ε = 1	ε = 2	ε = 7
1	0	83,90	98,59	99,64
2	0,00278	83,12	97,59	99,09
3	0,00556	81,32	94,58	98,27
4	0,00833	78,84	90,12	95,76
5	0,01111	76,22	82,79	89,25
6	0,01389	72,65	77,11	85,09

В результате проведенного исследования подтверждена высокая эффективность улавливания мелкодисперсного материала в многофункциональном аппарате, возможность управления процессом улавливания посредством изменения режима работы, определены области режимных параметров обеспечивающих высокую эффективность работы при низких энергозатратах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.А.; Дис. канд. техн. наук М; МТИ им. А.М. Косыгина, 1979.

2. Сажин Б.С., Гудим Л.И. Вихревые пылеуловители. М., Химия, 1995, 144 с.

3. Сажин Б.С., Гудим Л.И. Обзорная информация. Сер. Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов. Вып.1. М., НИИТЭХИМ, 1982

УДК 502.3

О МЕРОПРИЯТИЯХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ОБЪЕДИНЕНИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ НА СРЕДНЕМ УРАЛЕ
ON ACTIVITIES OF PUBLIC ASSOCIATIONS FOR IMPROVEMENT OF ENVIRONMENTAL SITUATION IN THE MIDDLE URALS

Александр Валерьевич Анисимов, Салчинский Владимир Иванович
Alexander V. Anisimov, Vladimir I. Salchinsky

** Екатеринбургский союз научных и инженерных организаций – ЕС НИО, Россия, Екатеринбург*
** Yekaterinburg Union of scientific and engineering organizations, Russia, Yekaterinburg*
(e-mail: anisdnt@yandex.ru, vladsalh@rambler.ru)

Аннотация: Рассмотрены основные мероприятия, проводимые общественными организациями: Екатеринбургским Союзом научных и инженерных организаций (ЕС НИО), Уральским обществом любителей естествознания (УОЛЕ) и Уральским экологическим союзом по охране окружающей среды на территории Свердловской области.

Abstract: The article considers the main activities carried out by public organizations: the Yekaterinburg Union of Scientific and Engineering Organizations (EU NIO), the Ural Society of Naturalists (UOLE) and the Ural Environmental Union for environmental protection in the Sverdlovsk Region.

Ключевые слова: экология, Средний Урал, общественные организации.
Keywords: ecology, Middle Urals, community organizations.

Состояние окружающей среды Свердловской области определяют:

- высокая современная техногенная нагрузка;
- долговременное негативное воздействие на природные комплексы и, как следствие, снижение природно-ресурсного потенциала;
- использование в промышленности ряда устаревших технологий и оборудования;
- накопление значительного количества отходов;
- сокращение биологического разнообразия.

В соответствии с Законом Свердловской области от 20 марта 2006г. № 12-ОЗ «Об охране окружающей среды на территории Свердловской области» ряд общественных объединений активизировали свою деятельность в 2017 году, посвященному Году экологии в России.

Так, Екатеринбургский союз научных и инженерных организаций (ЕС НИО) организует в течение ряда лет работу своих членов по охране окружающей среды по следующим экологическим проектам:

а) в процессе работы электростанций, работающих на каменном угле, образуется большое количество золотошлаковых отвалов, создающих значительные экологические проблемы. Так, например, Рефтинская ГРЭС, расположенная на территории Уральского федерального округа, ежегодно дает 5 млн. тонн золы, которая не перерабатывается, постоянно пылит, загрязняя воду, воздух и почву. По данным пробирного анализа экибастузский уголь, который сжигает Рефтинская ГРЭС, содержит золото на уровне 2-3 г/тонну. Следовательно, Рефтинская ГРЭС в процессе работы выбрасывает в атмосферу и отвалы ежегодно около 30 тонн золота. Учитывая это, в лаборатории «Переработка техногенных отходов» Уральского дома науки и техники под руководством д.т.н. А.Н. Лебедева разработана новая технология выделения благородных и редких металлов, микросфер из золотошлаковых отходов ТЭС, изготовлена опытно-промышленная установка по извлечению аэрозольных частиц золота из дымовых газов ТЭС, а также проработана технология промышленного модуля для выделения из золы указанных ценных компонентов

на первой стадии и изготовления самого дешевого известково-зольного кирпича на второй стадии с выдачей 70-80 млн. штук в год;

б) рабочая группа под руководством Ю.Г. Брусницына, изобретателя СССР, и В.Н. Попова, инженера-геофизика, в пос. Малышева проводит обследование шламохранилищ, отвалов Малышевского рудоуправления на предмет обогащения и извлечения из них ценных полезных ископаемых, привлечения к этой проблематике ряда фундаментальных и прикладных институтов;

в) в течение 2016г. ЕС НИО организовал по инициативе члена ЕС НИО Г.А. Оберюхтина проведение 2-х круглых столов по проблеме «Монорельсовый транспорт» для города Екатеринбурга с учетом того, что данный вид транспорта является самым экологичным и позволяет решать проблему городских пробок и оптимизации пассажиропотоков в городе;

г) рабочая группа под руководством В.И. Салчинского в 2016г. провела обследование набережной градообразующей реки Исети на 3-х участках: на Верх-Исетском пруду, на городском пруду и на Нижне-Исетском пруду. Наши предложения по технологии очистки русла и благоустройству были направлены Губернатору Свердловской области и в администрацию г. Екатеринбурга. В настоящее время они частично реализуются в районе Верх-Исетского пруда в связи с подготовкой к Чемпионату мира по футболу в 2018 году;

д) в течение ряда лет группа под руководством Э.А. Смирновой ведет наблюдение и мониторинг состояния Юго-Западного лесопарка г. Екатеринбурга, в непосредственной близости от которого расположены Уральский дом науки и техники и ЕС НИО. Группе оказана юридическая и организационная помощь. В результате арендаторами лесопарка проведен ряд субботников: проведена расчистка лесного массива, благоустроена «Тропа здоровья», установлены скамейки для отдыха, прегражден въезд на территорию лесопарка автомашин.

Большую работу по оздоровлению экологической обстановки проводят члены ЕС НИО – некоммерческие общественные организации:

- Уральское общество любителей естествознания (председатель исполкома Г.А. Порозов и ученый секретарь Л.Н. Пономарева);
- Уральский экологический союз (исп. директор Г.В. Ращупкин, к.х.н.)

Эти общественные организации объединяют известных на Урале ученых, общественных деятелей, журналистов, предпринимателей, геологов, чья деятельность связана с природой.

Основные направления их деятельности:

- экологическое образование и воспитание;
- просвещение и формирование экологической культуры жителей Урала;
- реализация социально-значимых экологических проектов и программ.

Реализованные ими проекты:

- общественная экспертиза бассейна реки Чусовой;
- экспертиза последствий деятельности Белоярской атомной электростанции;
- общественная экологическая экспертиза проектов переработки отходов на промышленных предприятиях;
- создание общественных консультативных советов при исполнительных и представительных органах власти Свердловской области;
- участие в разработке областных и городских экологических проектов;
- организация проведения круглых столов;
- выпуск изданий по региональной экологической политике;
- организация студенческих и школьных экологических семинаров;
- организация и проведение экологических экспедиций и экскурсий.

В качестве примера можно привести проведение экологической экспедиции «В гармонии с природой», девизом которой является «Неразрушающее природопользование».

Инициативу поддержала экологическая общественность региона и различные организации, в том числе Уральское отделение РАН и ряд институтов.

Особого внимания общественности с точки зрения экологического туризма заслуживают заповедные места Свердловской области:

- Природный парк «Оленьи ручьи» в Нижнесергинском районе;
- Природный парк «Река Чусовая» в Шалинском районе;
- Природно-минералогический заказник «Режевской»;
- Природный парк «Истоки Исети», г. Среднеуральск;
- «Висимский заповедник» (родина Мамина-Сибиряка).

По инициативе Г.В. Короленко Уральское общество любителей естествознания выступило с идеей высадки аллеи дубов, которые хотя и с трудом, но все-таки приживаются в Екатеринбурге и живут более 100 лет.

Общественность также обращает внимание областных и городских властей на проблемы:

- монацита в Красноуфимском районе;
- ликвидации последствий радиоактивного следа от Чернобыльской катастрофы.

Большая работа проводится общественниками с детьми.

Член УОЛЕ Силина Б.М. – директор детского экологического центра ежегодно проводит конференции по экологии, работу по направлениям:

1) просветительская и образовательная деятельность;

2) практические экскурсии по изучению природы Урала.

29 марта 2017г. на базе Дворца молодежи в Екатеринбурге прошел областной съезд «Родники», посвященный Году экологии. На специальной выставке были представлены фотоотчеты по открытию и благоустройству природных источников. Некоторые участники сами смастерили макеты.

К слову сказать, в 2016 году в 76 муниципальных образованиях Свердловской области появилось 200 новых источников питьевой воды.

Проект «Родники» проходит в области ежегодно.

Научное издание

Международный научно-технический Форум
ПЕРВЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ
(МНТФ КОСЫГИН- 2017)
Тематика чтений
«СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК»
VI-й Международный научно-технический Симпозиум
«СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЭТТ – 2017»
Сборник научных трудов
(Том 2)

11 - 12 октября 2017 года

Технический редактор Бородина Е. С.
Компьютерная верстка и макет Бородина Е. С.

Материалы публикуются в авторской редакции.