



МЛНЧ-2015

Международные Лыковские научные чтения



ВЕБ-КОНФЕРЕНЦИЯ

**Первые Международные Лыковские научные чтения,
посвящённые 105-летию академика А.В. Лыкова**

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

22 - 23 СЕНТЯБРЯ 2015 ГОДА

*Веб-конференция «Первые Международные Лыковские научные чтения,
посвящённые 105-летию академика А.В. Лыкова – МЛНЧ-2015» прово-
дится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных
исследований - проект № 15-08-20703-г*

Москва 2015

УДК 687
ББК 37.23
А43

Председатель Оргкомитета
Председатель Комитета РосСНИО
по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов,
д.т.н., профессор **Рудобашта Станислав Павлович**

Заместители Председателя Оргкомитета
член-корр. НАН Р. Беларусь, д.т.н., профессор
Павлюкевич Николай Владимирович,
академик РААСН, д.т.н., профессор
Федосов Сергей Викторович

Учёный секретарь Оргкомитета
учёный секретарь Комитета РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обра-
ботки материалов, к.т.н., профессор **Кошелева Мария Константиновна**

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТ-
КИ МАТЕРИАЛОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И АГ-
РОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ** [Текст]: сборник научных статей Первых
Международных Лыковских научных чтений (22-23 сентября 2015 года)/ РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, ЗАО «Университетская книга», Курск, 2015., 485 с.

ISBN 978-5-9907009-4-9

В сборник включены научные статьи российских и зарубежных учёных, представ-
ленные на вебинаре, в которых рассматриваются вопросы теории и математического
моделирования процессов сушки и термовлажностной обработки различных материа-
лов, проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в химической, пище-
вой, текстильной и лёгкой промышленности, в строительной индустрии, древесины,
вопросы экологической и производственной безопасности при проведении рассматри-
ваемых процессов, методы и средства контроля и управления данными процессами.

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

ISBN 978-5-9907009-4-9

УДК 687
ББК 37.23

© Российский государственный
аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2015
© ЗАО «Университетская книга», 2015
© Авторы статей, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	14
Секция 1. «ТЕОРИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ»	15
Н.В. Павлюкевич, П.В. Акулич АКАДЕМИК А.В. ЛЫКОВ – УЧЕНЫЙ И ЧЕЛОВЕК.....	15
С.П. Рудобашта ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ АКАДЕМИКА А.В. ЛЫКОВА В СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЯХ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ СУШКЕ.....	21
Odilio Alves-Filho DRYING TECHNOLOGIES ENGINEERED FOR THE 21ST CENTURY	29
О.Р. Дорняк СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....	36
Н.Ц. Гатапова, А.Н. Пахомов, Ю.В. Пахомова ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА И КИНЕТИКИ СУШКИ ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ	42
О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, В.Н. Бандура РЕЖИМЫ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	47
Ю.А. Таран РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРОДУКТА, ДОГРАНУЛИРУЕМОГО ОКАТЫВАНИЕМ ПРИ СОВМЕЩЕННОМ ПРОЦЕССЕ СУШКИ, КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СВЯЗЫВАНИЯ ВОДЫ КОМПОНЕНТОВ В КРИСТАЛЛОГИДРАТЫ (ТЕХНОЛОГИЯ FATTENING)	56
Д.С. Слижук, П.В. Акулич КИНЕТИКА СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ-НАГРЕВА 58	
Н.Н. Сороковая, Н.И. Никитенко, Ю.Ф. Снежкин МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА, ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И УСАДКИ В ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ.....	63
А.Л. Таран, Р.В. Морозов, А.В. Таран, Р.Н. Иванов ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОКАТЫВАЕМЫЕ ГРАНУЛЫ ПРИ СОВМЕЩЕНИИ СУШКИ, КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ.....	67
Д.А. Горин, С.П. Рудобашта К РАСЧЕТУ СВЧ-НАГРЕВА ПАНТОВ ОЛЕНЯ.....	69
А.Г. Липин, А.А. Липин, А.В. Железцов МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ГЕЛЯ ПРИ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОМ ПОДВОДЕ ТЕПЛОТЫ	72
Г.А. Зуева, Г.Н. Кокурина, А.М. Соболев СИСТЕМНО-СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ КОНВЕКТИВНОМ ПРОГРЕВЕ НЕОГРАНИЧЕННОГО ЦИЛИНДРА	75
С.В. Вендин К РЕШЕНИЮ НЕКОТОРЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ МЕТОДОМ РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ	78

А.Н. Пахомов, Н.Ц. Гатапова, Ю.В. Пахомова КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СУШКИ КАПЕЛЬ ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ. 81	
А.А. Шевцов, А.В. Дранников, А.А. Коротаева, А.С. Муравьев АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ СУСПЕНЗИИ ПРОТЕИНОВОГО ЗЕЛЕННОГО КОНЦЕНТРАТА (ПЗК) .. 83	
Д.Б. Просвириков, И.Р. Ахметшин, Д.Ш. Гайнуллина, Т.Д. Просвирикова МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПАРОВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО МАТЕРИАЛА..... 87	
А.В. Бараков, А.П. Бырдин, А.А. Надеев ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ МАТЕРИАЛА И СУШИЛЬНОГО АГЕНТА В АППАРАТЕ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ..... 90	
Р.Р. Хасаншин, Р.Т. Хасаншина МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 93	
А.А. Липин, А.Г. Липин МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУШКИ ПОЛИАМИДА-6, СОВМЕЩЕННОЙ С УДАЛЕНИЕМ МОНОМЕРА..... 96	
В.И. Ряжских, А.В. Ряжских СЕДИМЕНТАЦИЯ МАЛОКОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ВЗВЕСИ СТОКСОВСКИХ ЧАСТИЦ В СЛОЕ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ..... 99	
А.В. Ряжских, Е.А. Кожухова ЛАМИНАРНОЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ОСТВАЛЬДА-ДЕ-ВИЛЯ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ КОЛЬЦЕВОГО КАНАЛА..... 103	
Л.М. Исмагилова, А.Р. Садрутдинов, Д.Зиятдинова МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАДИИ СУШКИ ПРИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ..... 107	
И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ МИКРОВОЛНОВОГО ПОЛЯ 109	
Г.Ф. Смирнов, А.В. Зыков ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ СУШКИ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К СУШКЕ СЛОЯ ЗЕРНА С КОНДУКТИВНЫМ ЭНЕРГОПОДВОДОМ..... 112	
М.А. Кузнецов, П.О. Овсянников, П.А. Нестеров ТЕПЛОЕМКОСТЬ ПОРИСТЫХ СРЕД, НАСЫЩЕННЫХ СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ 119	
В.Ю. Волынский, Я.С. Стороженко МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТЕРМООБРАБОТКИ ТКАНИ В СУШИЛЬНОЙ МАШИНЕ..... 122	
Секция 2. СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ В ХИМИЧЕСКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 128	
А.Н. Остриков, С.Т. Антипов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ 128	
Ю.Ф. Снежкин, Р.А. Шапарь ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 134	
В.А. Михайлик, Ю.Ф. Снежкин, Т.В. Коринчевская ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ НА СТЕПЕНЬ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ ПОРОШКОВ ИЗ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ..... 137	

А.В.Акулич, В.М. Лустенков, В.М. Акулич ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕОЧИСТКИ В СУШИЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ АППАРАТОВ.....	141
Е.А.Муравлева, О.Алвес-Фильо, С.П.Рудобашта КИНЕТИКА СУШКИ СУПЕР-СЛАДКОЙ КУКУРУЗЫ В НЕПОДВИЖНОМ ПРОДУВАЕМОМ И ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЯХ.....	146
Е.А. Муравлева, О. Алвес-Фильо, С.П. Рудобашта АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СУПЕР-СЛАДКОЙ КУКУРУЗЫ, ВЫСУШЕННОЙ В НЕПОДВИЖНОМ ПРОДУВАЕМОМ И ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЯХ.....	149
М.А. Остапенко, М.М. Савинов, В.А. Попов ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ АВТОНОМНАЯ КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СУШКИ, ПОЛУКОКСОВАНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ БУРОГО УГЛЯ.....	152
М.А. Остапенко, Л.М. Галушко ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВАКУУМНОЙ СУШКИ ПАСТЫ ЦИНКА УГЛЕКИСЛОГО.....	155
С.И. Бухало ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СУШКИ В ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ.....	157
А.М. Воробьев, Г.С. Кормильцин УСТАНОВКА ДЛЯ СУШКИ БИОПРОДУКТОВ.....	160
Г.В. Калашников, Е.В. Литвинов КОМБИНИРОВАННАЯ КОНВЕКТИВНО–СВЧ СУШКА СЫРЬЯ В ЛИНИИ ПРОИЗВОДСТВА ПЛОДООВОЩНЫХ ЧИПСОВ..	162
Ю.А. Максименко, Э.Р. Теличкина, Ю.С. Феклунова СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ ПРОДУКТОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ.....	165
И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова, О.Е. Губа РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШИЛЬНАЯ УСТАНОВКА.....	168
В.М. Попов, А.Н. Внуков, Е. Н. Лушникова ТЕМПЕРАТУРНАЯ ОБРАБОТКА КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КЛЕЕВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	172
В.Н. Василенко, Л.Н. Фролова, Н.А. Михайлова, Д.А. Таркаева ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СУШКИ СЕМЯН САФЛОРА МЕТОДАМИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	174
Ф.В. Назипова, К.Е. Кузнецов УСТАНОВКА НЕПРЕРЫВНОЙ СУШКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ С КОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ.....	176
А.А. Шевинов, Е.С. Шенцова, А.В. Дранников, О.А. Апалихина ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СЫПУЧЕЙ ФОРМЫ ХОЛИНХЛОРИДА.....	178
А.В. Голубев, А.А. Топоров ИЛЫ ПОЛЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ СТАНЦИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД КАК ОБЪЕКТ СУШКИ.....	180
А.А. Топоров, И.Г. Дедовец ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ.....	183
Ю.А. Калашин, Ю.В. Светлов, К.Д. Бузетти, Ю.Б. Никифоров, В.Г. Вусс ТЕПЛО-И МАССОБМЕН ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЭФФЕКТИВНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ И ПРОДУКТОВ ДЛЯ КОМБИКОРМОВОГО ПРОИЗВОДСТВА..	187
М.С. Апалькова, Т.А. Новикова ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА.....	190

Секция 3. СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ В ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 193

М.Г. Балыхин, К.Э. Разумеев, М.К. Кошелева, А.А. Захарова ПРОЦЕССЫ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ В ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	193
М.К. Кошелева, С.П. Рудобашта ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ НЕТКАНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	205
Н.М. Шарпар, Л.И. Жмакин ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШКИ ВОЙЛОКА.....	210
О.Р. Дорняк, И.В. Фокина, М.С. Апалькова ИССЛЕДОВАНИЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ СМЕСОВЫХ ТКАНЕЙ.....	212
Г.И. Хазанов, М.А. Апарушкина ПРИДАНИЕ СОВОКУПНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПРЕССОВЫХ СУКОН.....	215
Е.В. Шувалов ПРИМЕНЕНИЕ КАНАЛЬНОГО МЕТОДА НАГРЕВА ПАРОМ ПОВЕРХНОСТИ СУШИЛЬНОГО ЦИЛИНДРА В ТЕКСТИЛЬНОЙ ОТРАСЛИ.....	217
О.Г. Циркина ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАГРЕВА В ПОЛЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОТДЕЛОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	220

Секция 4. СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА 223

Г.Н. Станкевич ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКИ СУШКИ ЗЕРНА В УКРАИНЕ.....	223
В.Ф. Сорочинский КИНЕТИКА ОХЛАЖДЕНИЯ ЗЕРНА ПОСЛЕ СУШКИ НА УСТАНОВКАХ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ.....	230
С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, Н.А.Зуев, Е.Ю. Зотова СОВМЕЩЕННЫЙ ПРОЦЕСС СУШКИ И СТИМУЛЯЦИИ СЕМЯН С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	236
Н.М. Андрианов, А.В. Николаенко, Шуньчи Мэй, Юн Сюе ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕРНА В ШАХТНЫХ СУШИЛКАХ.....	241
Г.Н. Станкевич, Н.А. Валентюк ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ ЗЕРНА АМАРАНТА.....	244
Л.К. Овсянникова, В.В. Юрковская СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА ПРОСА.....	246
А.А. Езенков, С.П. Рудобашта ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА.....	249
И.И. Яровой ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	253
С.П. Рудобашта, В.В. Агапов, Д.С. Кашменский, Г.Д. Левко СУШКА-СТИМУЛЯЦИЯ СЕМЯН ЦВЕТОВ.....	256

Секция 5. СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 260

С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.А. Хрунов МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССАХ КОРРОЗИИ БЕТОНА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	260
С.В.Федосов, В.Г.Котлов, М.А.Иванова ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАГЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ	262
В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СУШКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ	270
М.В. Бочков, Ю.А. Гилёва, М.А. Иванова ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	272
С.В. Федосов, В.Е.Румянцева, И.В. Красильников ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИКИ И КИНЕТИКИ МАССОПЕРЕНОСА НА ПРОЦЕССЫ ЖИДКОСТНОЙ КОРРОЗИИ I ВИДА ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ	275
А.Г. Белых, Л.А. Кукарских ВЛИЯНИЕ ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ НА ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТОБЕТОНА	277
С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, В.С. Коновалова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ КОРРОЗИИ II ВИДА ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ В ЖИДКИХ АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ	281
Л.А. Кукарских, А.Г. Белых ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА РАЗРУШЕНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД	284
С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, С.А. Логинова МАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССАХ КОРРОЗИИ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ	289
С.В.Федосов, А.М.Соколов, Н.В. Красносельских, А.Н.Кузнецов СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ТОКАМИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ	291
Секция 6. СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ	300
Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, Ю.П. Семенов СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ	300
А.Н.Чернышёв, О.Р. Дорняк РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД В КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛЬНЫХ КАМЕРАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ УВЛАЖНЕНИИ АГЕНТА СУШКИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ	306
Т.Х. Галлеев, А.Р. Садрtdинов, Д.А. Ахметова ОПИСАНИЕ СТАДИИ СУШКИ В ПРОЦЕССЕ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ	311
Д.А. Паринов, В.А. Шамаев ТЕХНОЛОГИЯ ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ НА АЭРОЗОЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ	314
Д.А. Паринов ГИДРОИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ПРОПИТКИ СЫРОЙ ДРЕВЕСИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА	316
В.А. Салдаев, А.Р. Садрtdинов, Е.К. Воронин ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА	

ПОСЛЕДУЮЩИЙ ПРОЦЕСС ЕЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ THE EFFECT OF HIGH-TEMPERATURE DRYING OF WOOD BIOMASS FOR THE SUBSEQUENT PROCESS OF THERMAL PROCESSING	318
М.Г. Ермоченков КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ДРЕВЕСИНЫ В ГЕЛИИ	321
Т.О. Степанова, Х.Г. Мусин, И.Г. Хабибуллин ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	324
Э.Р. Хайруллина, Т.Д. Исхаков, М.Т. Шарапова ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСНО-ГИПСОВЫХ ПЛИТ	326
А.Р.Хабибуллина, З.Г.Саттарова, М.Н.Суходова КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ ПЕРЕД СТАДИЕЙ ПИРОЛИЗА	328
Ф.В. Назипова, А.И. Хуснуллина ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА	330
Р.В. Салимгареева, Т.А. Бодылевская ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В СРЕДЕ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ	333
Т.А. Бодылевская, Е.А. Белякова ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В ЖИДКОСТЯХ	335
Н.Н. Матвеев, Н.С. Камалова, Н.Ю. Евсикова, В.В. Саушкин МОНИТОРИНГ МИКРОСТРУКТУРЫ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В ДРЕВЕСИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЭФФЕКТА	337
Н.Ф. Тимербаев, З.Г. Саттарова, Р.Р. Зиятдинов, Л.Р. Смирнова, М.Н. Суходова КОНДУКТИВНАЯ СУШКА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ..	340
СЕКЦИЯ 7. ЭНЕРГО – И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....	343
А.Гаряев ПРИМЕНЕНИЕ УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛОТЫ И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ ПРИ СУШКЕ МАТЕРИАЛОВ	343
Н.И. Малин ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НА ПАРАМЕТРЫ ОТРАБОТАННОГО АГЕНТА СУШКИ ШАХТНОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ.....	346
Н.И. Малин К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ШАХТНЫХ ПРЯМОТОЧНЫХ И РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ЗЕРНОСУШИЛОК	350
Ю.А. Таран, М.К. Захаров, В.О. Беспалова, А.В. Таран ЭНЕРГО-РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ЗА СЧЁТ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНЫХ АЗОТСОДЕРЖАЩИХ УДОБРЕНИЙ ПОВЫШЕННОГО КАЧЕСТВА ДОГРАНУЛИРОВАНИЕМ ПРИЛЛИРОВАННЫХ ГРАНУЛ ПОРОШКООБРАЗНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ С ВЫСУШИВАНИЕМ РАСТВОРА СВЯЗУЮЩЕГО	353
Н.Савченкова ОЦЕНКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭФФЕКТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАСОСА ТЕПЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	356

И.Ф. Хакимзянов, П.А. Кайнов РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ	360
Г.В. Калашников, Е.В. Литвинов ТЕПЛОВЫЕ И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СУШЕНЫХ ЯБЛОК И ЯБЛОЧНЫХ ЧИПСОВ	362
А.Н.Чемоданов, П.Е.Царев ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СУШИЛЬНЫХ КАМЕР С ГОРИЗОНТАЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА	365
Д.В. Тунцев, М.Р. Хайруллина, А.С. Савельев, И.С. Романчева ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СУШКИ И УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ	367
С.В. Гужов КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЭФФЕКТОВ ЭНЕРГОСЕРВИСНОГО КОНТРАКТА ДЛЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ БЮДЖЕТНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ	369
А.Р. Шайхутдинова, Ф.В. Назипова РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В СРЕДЕ НАСЫЩЕННОГО ПАРА	377
Е.В. Романова, А.Н. Колиух СУШКА ЛЕКАРСТВЕННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ С ТЕПЛОВЫМ НАСОСОМ	380
А.В. Антипов АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ С ПЕРЕМЕННЫМ РАСХОДОМ ВОЗДУХА	382
Ш.Р. Мухаметзянов, И.Ф. Хакимзянов ОСЦИЛЛИРУЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВАКУУМНОЙ СУШКИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОВОГО НАСОСА	386
А.Касимов, И.Романчева, А.Савельев, Л.Герке ЭНЕРГОРЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ	389
Ю.Я. Печенегов, Ю.В. Першина, Е.А. Малышева ПЛАСТИНЧАТЫЙ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОР «ГАЗ-ГАЗ» С ОПТИМИЗИРОВАННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ	391
Н.Ф. Тимербаев, З.Г. Саттарова, Р.Р. Зиятдинов, Л.Р. Смирнова, М.Н. Суходова КОНДУКТИВНАЯ СУШКА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ..	393
В.С. Глазов, М.В. Горелов, М.Ю. Юркина ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ СЛОИСТЫХ СИСТЕМ	396
Д.С. Кашменский СУШКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ	398
С.В. Ковалев, С.И. Лазарев, Р.В. Попов ДИФфуЗИОННАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ МЕМБРАНЫ МГА-95 ПРИ АКТИВНОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ПРОКАЧКИ РАСТВОРА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ АППАРАТА	400
В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев, С.А. Вязовов УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННАЯ ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНОГО МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ	402
Д.О. Абоносимов, С.И. Лазарев, О.А. Абоносимов ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД	404

В. Потапов, О.Гриценко ФИЛЬТРАЦИОННАЯ СУШКА ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ ДАВЛЕНИИ	406
И.В. Яковлев, И.В. Парёхина, А.М. Исакова ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕХОДА НА АВТОНОМНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ОТ ВОЗДУШНОЙ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РОССИИ	409
М.А.Терещенко, Н.В.Мозговой ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АППАРАТОВ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ	412
Секция 8. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	415
М.П. Тюрин, Е.С. Бородина ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА ДЛЯ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ СУШИЛЬНЫХ РАСТВОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗДТ	415
М.П. Тюрин, Е.С. Бородина, М.А. Апарушкина УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ И ОЧИСТКА ВЫБРОСОВ ПОСЛЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ	417
И.А. Попов ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ СУШИЛОК ВЗП (СО ВСТРЕЧНЫМИ ЗАКРУЧЕННЫМИ ПОТОКАМИ)	421
Б.Т. Федотов, М.К. Кошелева, Л.В. Гурьева, В.Ю. Алейников ИССЛЕДОВАНИЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МЕДИЦИНСКОЙ ГИГРОСКОПИЧЕСКОЙ ВАТЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	423
В.В.Козляков, М.А.Кипнис БЕЗОТХОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВИЭ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕКСТИЛЯ В СИСТЕМЕ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ	426
О.И. Седяров, Н.С. Тихонова, И.Н. Курицин, В.В. Куранов ПРИМЕНЕНИЕ СВОБОДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕ- И ГАЗООЧИСТКИ	428
Л.В. Моисеева, А.В. Сухарев ГЛУБОКОЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЕ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОФИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ОТХОДОВ КОЖЕВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА	433
О.И. Седяров, В.В. Куранов, Н.С. Тихонова, Г.А. Свищев МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ВОЗДУХА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ СУШИЛЬНЫХ ЦЕХОВ КОЖЕВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА	436
Секция 9. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	441
Ю.П.Секанов О ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗАКОНА «ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ» В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ (на примере производства зерна)	441
Ю.Секанов, А.Колесникова УПРАВЛЕНИЕ СУШКОЙ ЗЕРНА: ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА	446

И.В.Сапожников, Н.В.Скуратов, И.И.Алексеева, Д.А.Самойленко, А.В.Протасова МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СУШИЛЬНЫМИ КАМЕРАМИ ДЛЯ ДРЕВЕСИНЫ	449
Н.В. Скуратов, И.В. Сапожников, И.И. Алексеева, Д.А. Самойленко, А.В. Протасова МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ	452
В.П. Беляев, С.В. Мищенко, П.С. Беляев АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ РАСТВОРИТЕЛЕЙ В МАССИВНЫХ ТЕЛАХ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО ИСТОЧНИКА	454
Нугманов А.Х.-Х., Краснов В.А., Максименко Ю.А. КАЛОРИМЕТР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ ПАСТООБРАЗНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ	456
А.А. Щёголев МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОТОЧНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	460
В.И. Рязжих, А.А. Хвостов, А.В. Иванов, Н.А. Дегтярев ВЫБОР МЕСТА КРЕПЛЕНИЯ ДАТЧИКА ВИБРОДИАГНОСТИКИ КОМПРЕССОРА КИСЛОРОДА ЗОДОДОБЫВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ	463
В.С. Глазов, М.В. Горелов, М.Ю. Юркина ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ ПОРИСТОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ НАГРЕВЕ ЕЁ ИЗЛУЧЕНИЕМ	466
П.Н.Муреев, А.В.Иванов АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗЦОВ НАРУЖНЫХ СТЕНОВЫХ ОГРАЖДЕНИЙ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ	469
А.В. Дранников, С.А. Шевцов, А.А. Дерканосова СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕРМОВЛАЖНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ ЕГО СУШКЕ И ХРАНЕНИИ	472
Р.А. Макаров, П.Н. Муреев, А.Н. Макаров ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАРУЖНЫХ СТЕН ЗДАНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ КИРПИЧА	474
М.М. Сафаров, А.Г. Мирзомамадов, С.С. Абдуназаров, З.Ю. Норов ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГРАНУЛИРОВАННОЙ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ	477
Л.В. Гурьева ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ	482

ОРГАНИЗАТОРЫ МЕЖДУНАРОДНЫХ ЛЫКОВСКИХ НАУЧНЫХ ЧТЕНИЙ

- *Министерство образования и науки РФ
- *Министерство сельского хозяйства РФ
- *Комитет РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материа-
лов
- *Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева
- *Институт тепло-массообмена имени А.В. Лыкова, Р. Беларусь, г. Минск
- *Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев
- *Московский государственный университет дизайна и технологии
- *Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

Рабочие языки научных чтений: русский и английский.

Статьи печатаются в редакции авторов

ОРГКОМИТЕТ МЕЖДУНАРОДНЫХ ЛЫКОВСКИХ НАУЧНЫХ ЧТЕНИЙ

Председатель Оргкомитета
Председатель Комитета РосСНИО
по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов,
д.т.н., профессор **Рудобашта Станислав Павлович**
(тел. моб. 8 (905) 590 23 38, E-mail: rudobashta@mail.ru)

Заместители Председателя Оргкомитета
член-корр. НАН Р. Беларусь, д.т.н., профессор
Павлюкевич Николай Владимирович,
академик РААСН, д.т.н., профессор
Федосов Сергей Викторович

Учёный секретарь Оргкомитета
учёный секретарь Комитета РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной
обработки материалов, к.т.н., профессор **Кошелева Мария Константиновна**
(тел. моб. 8 (926) 355 04 48, e-mail: oxtpraxt@ya.ru)

Ответственный за информационное обеспечение чтений на сайте
www.drying-committee.ru

член Президиума Комитета РосСНИО
по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов,
д.т.н., профессор **Волынский Владимир Юльевич**
(тел. моб. 8 (910) 985 05 60, 8 (961) 244 29 70, E-mail: vvolyln@mail.ru)

НАУЧНЫЙ ОРГКОМИТЕТ**От России:**

проф. Антипов С.Т. (Воронеж); проф. Балыхин Н.Г. (Москва), проф. Блиничев В.Н. (Иваново); проф. Волынский В.Ю. (Иваново), проф. Гаряев А. Б. (Москва); проф. Голубев А.В. (Москва); проф. Гребенников С.Ф. (С.-Петербург); проф. Дворецкий С.И. (Тамбов); проф. Дмитриев В.М. (Тамбов), проф. Дорняк О.Р. (Воронеж); проф. Захарова А.А. (Москва); проф. Зуева Г.А. (Иваново); проф. Карташов Э.М. (Москва); проф. Кошелева М.К. (Москва); проф. Кулов Н.Н. (Москва); проф. Малин Н.И. (Москва); проф. Мищенко С.В. (Тамбов); проф. Остриков А.Н. (Воронеж); проф. Разумеев К.Э. (Москва), проф. Резчиков В.А. (Москва); проф. Рудобашта С.П. (Москва); проф. Сажин Б.С. (Москва); проф. Сафин Р.Г. (Казань); проф. Сафин Р.Р. (Казань); д.т.н. Секанов Ю.П. (Москва); проф. Семенов Г.В. (Москва); проф. Семенов Ю.П. (Москва); д.т.н. Сорочинский В.Ф. (Москва); проф. Таран А.Л. (Москва); акад. РААСН Федосов С.В. (Иваново).

Международный:

Prof. P. Akulich (Belarus); Prof. O. Alves-Filho (Norway); Prof. P. Dittl (Czechia); Prof. M. Dyląg (Poland); NAS of Ukraine academician A. Dolinsky (Ukraine); Ph.D. D. Gehrmann (Germany); Prof. Hee-Suk Jung (Korea); Ph.D. T. Jirout (Czechia); Prof. T. Kudra (Canada); Prof. L. Mörl (Germany); Prof. A. Mudjundar (Singapore); NAS of Belarus corresponding member N. Pavlukevich (Belarus); Prof. F. Rieger (Czechia); Prof. G.D. Saravacos (Greece); NAS of Ukraine corresponding member Y. Snezhkin (Ukraine); Prof. G. Stankevich (Ukraine); Prof. C. Strumillo (Poland); Prof. E. Tsotsas (Germany); Prof. Li Zhanyong (China).

Введение

20 сентября 2015 г. исполняется 105 лет со дня рождения Алексея Васильевича Лыкова. Академик Алексей Васильевич Лыков – гордость российской науки и гордость белорусской науки, выдающийся ученый с мировым именем, основатель Инженерно-физического журнала – одного из ведущих журналов в мировом рейтинге в области теплотехники, тепломассообмена и других смежных научных направлений. Его имя носит Институт тепломассообмена НАН Р. Беларусь, директором которого он являлся многие годы.

Современная теория сушки создана в XX-м веке трудами ряда ученых, из которых главная роль принадлежит академику А.В. Лыкову. Она изложена в ряде его монографий: «Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения» (1938 г.), «Теория сушки» (1950 г.), «Тепломассообмен в процессах сушки» (1956 г.), «Теория сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов в пищевой промышленности» (1964 г.), «Теория сушки» (второе издание, 1968 г.) и основополагающих статей. Их дополняют капитальные труды А.В. Лыкова по общим вопросам тепломассопереноса: «Теория тепло-и массопереноса» (1963 г.), «Теория теплопроводности» (1967 г.), «Тепломассообмен. Справочник» (2-е изд., 1978 г.). Общее количество монографий А.В. Лыкова – 25.

Его работы известны во всем мире, а разработанные им теоретические положения сушки являются той основой, на которой строятся современные математические модели процесса.

Комитет по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов при Российском союзе научных и инженерных организаций в мае 2010 г. организовал и успешно провел Международный научно-технический симпозиум «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов», посвященный 100-летию А.В. Лыкова. На 5-м Международном научно – техническом симпозиуме «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2014», соорганизатором которого был Комитет, прошедшем в сентябре 2014-го года в Иванове, симпозиумом было принято решение о регулярном (один раз в 5 лет) проведении Международных научных чтений, посвященных юбилеям академика А.В. Лыкова. Данные чтения являются первыми и посвящаются 105-летию А.В. Лыкова.

Научные статьи, представленные на чтения и посвященные различным аспектам сушки, публикуются в данном сборнике.

Оргкомитет конференции, проводимой в форме вебинара, благодарит Российский фонд фундаментальных исследований за оказанную финансовую поддержку, позволяющую организовать и провести вебинар, издать его научные труды.

Председатель Оргкомитета конференции,
председатель Комитета РосСНИО по проблемам
сушки и термовлажностной обработки материалов,
д.т.н., профессор

С.П. Рудобашта

Секция 1. «ТЕОРИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ»

УДК 66.047:536.24

АКАДЕМИК А.В. ЛЫКОВ – УЧЕНЫЙ И ЧЕЛОВЕК**Н.В. Павлюкевич*, П.В. Акулич******N. Pavlyukevich*, P. Akulich****

**Институт тепло- и массообмена имени А.В.Лыкова НАН Беларуси
(e-mail:pnv@hmti.ac.by)*

***Институт тепло- и массообмена имени А.В.Лыкова НАН Беларуси
(e-mail:akul@hmti.ac.by)*

Аннотация: Статья посвящена выдающемуся ученому теплофизику, основателю белорусской научной школы по тепло- и массообмену, академику Алексею Васильевичу Лыкову, 105-летию со дня рождения которого отмечается в этом году. Изложены основные библиографические сведения, некоторые вехи научного и творческого пути и тенденции развития его наследия.

Abstract: The paper is devoted to Academician Alexei Vasil'evich Luikov, the outstanding scientist-thermophysicist, the founder of the Byelorussian scientific school in heat and mass transfer, 105 years from whose birth is celebrated this year. It gives an account of the basic bibliographic data, some landmarks of his scientific and creative activity, and the tendencies towards the development of his heritage.

Ключевые слова: тепломассоперенос, теплофизика, кинетика сушки, диффузия влаги.

Keywords: heat and mass transfer, thermophysics, drying kinetics, moisture diffusion.

Алексей Васильевич Лыков родился в 1910 г. в Костроме. Отец, инженер-технолог, был инициативным предпринимателем, изобретателем, работал на заводе своего отца в селе Большие Соли Костромского уезда, где было организовано крахмало-паточное производство, которое успешно функционировало. Мать Алексея Васильевича – Анна Федоровна Птицина – работала учительницей.

После окончания физико-математического отделения Ярославского педагогического института в 1930 году Алексей Васильевич работал в Ярославле преподавателем физики энергетического рабфака. В 1932 году А.В. Лыков поступает в аспирантуру научно-исследовательского института физики Московского университета. Он совмещал учебу в аспирантуре с исследовательской работой во Всесоюзном теплотехническом институте (ВТИ), где была хорошо оснащенная сушильная лаборатория. В это время его научными руководителями были А.С. Предводителев и А.А. Померанцев.

В октябре 1935 года А.В. Лыков заканчивает аспирантуру, а в феврале 1936 года защищает кандидатскую диссертацию на тему «Термическая диффузия влаги в материалах». В диссертации было дано изложение нового явления – термической диффузии влаги в капиллярно-пористых телах в процессе сушки. В литературе это явление термовлагопроводности известно под названием эффекта Лыкова. Суть его заключается в следующем. В процессе сушки имеет место перемещение влаги из центра к поверхности материала. Однако при конвективной сушке создается градиент температуры, противоположный градиенту влажности, что препятствует передвижению влаги изнутри к поверхности материала, так как термовлагопроводность является причиной перемещения влаги по направлению потока тепла (вовнутрь материала). Это явление подобно

явлению термодиффузии в газах и растворах (эффекту Соре). Данная фундаментальная работа молодого ученого получила широкую известность в СССР и за рубежом.

В 1936 году Алексей Васильевич заболел туберкулезом легких, переносит сложную операцию. Он прекратил педагогическую работу, проводимые в ВТИ исследования были временно приостановлены. Однако он не теряет оптимизма, пишет статьи в научные журналы (в том числе и зарубежные). В 1937 году он подготовил учебное пособие под названием «Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения» (кожа, глина, целлюлоза, дерево, торф, уголь и пр.). В 1939 году А.В. Лыков защитил докторскую диссертацию в Московском энергетическом институте. А в 1941 году выходит его вторая монография «Теплопроводность и диффузия в производстве кожзаменителей и других материалов».

Когда началась Великая Отечественная война, в связи с болезнью и инвалидностью А.В. Лыков был снят с воинского учета. Однако он продолжал вести научные исследования и в 1946 году его наградили медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне».

В 1942 г. А.В. Лыков возобновил педагогическую работу в качестве заведующего кафедрой физики Московского технологического института пищевой промышленности (МТИПП), он читал курс физики и спецкурс физико-химических основ пищевой промышленности. Кроме того, он по совместительству (с 1949 по 1954 гг.) работал заведующим кафедрой физики Института химического машиностроения. В МТИПП под руководством А.В. Лыкова были оборудованы современные лаборатории, где проводились исследования по тепло- и массопереносу в капиллярно-пористых телах, дисперсных средах при фазовых и химических превращениях. В этот же период растет международный авторитет А.В. Лыкова. По представлению профессора В. Оствальда он избирается членом международного общества Kolloidgesellschaft.

В 1950 г. А.В. Лыков издает монографию «Теория сушки», за которую ему в 1951 году присуждена Сталинская премия 2-й степени, а в 1952 году выходит в свет его монография «Теория теплопроводности», которая была переиздана в 1967 году. За книгу «Теория теплопроводности» Алексей Васильевич был удостоен высшей в СССР награды в области теплотехники – премии им. И.И. Ползунова. Эти две монографии являлись настольными книгами для большинства теплофизиков в СССР.

Весной 1956 г. Академия наук БССР предложила А.В. Лыкову переехать на работу в Минск, и 21 декабря 1956 года приказом по Академии наук БССР А.В. Лыков назначается директором Института энергетики АН БССР. Тематика научных исследований и структура этого института полностью сформировалась в 1961 году. Основными научными направлениями утверждены:

1. тепло- и массоперенос;
 2. исследование физических процессов в атомных реакторах на тепловых нейтронах.
- В соответствии с этими направлениями в институте созданы два отделения: отделение тепло- и массопереноса и отделение атомной энергетики. По отделению тепло- и массопереноса были организованы следующие лаборатории:
1. тепло- и массообмена в реагирующих системах;
 2. сушильных процессов;
 3. теплообмена в дисперсных средах;
 4. теплофизики;
 5. тепло- и массообмена при фазовых превращениях;
 6. энергоэкономических исследований;
 7. использования изотопов и ядерных излучений;
 8. контроля тепловых процессов электрическими методами.

Кроме того, в 1963 году была создана лаборатория аналитической теории переноса.

На Институт энергетики постановлением Президиума АН БССР в 1958 году было возложено строительство, оборудование и контроль за проектированием атомного ре-

актора типа ИРТ–2000, торжественное открытие которого состоялось 22 мая 1962 года. В 1965 году на базе отделения атомной энергетики был создан Институт ядерной энергетики АН БССР, который возглавил академик А.К. Красин.

В 1963 году Институт энергетики был переименован в Институт тепло- и массообмена АН БССР, что «было обусловлено потребностями создания научных основ объектов космической и авиационной техники, энергетики, в том числе атомной, тепломассообменных технологических процессов и аппаратов широкого назначения для различных отраслей народного хозяйства».

По инициативе А.В. Лыкова в 1958 году был основан «Инженерно-физический журнал», главным редактором которого он был до конца своей жизни. В 1959 году А.В. Лыков был назначен редактором международного журнала от СССР International Journal of Heat and Mass Transfer.

В январе 1966 года на физическом факультете БГУ была открыта кафедра теплофизики, которую А.В. Лыков возглавлял до конца своей жизни. Он читал спецкурс «теория теплопроводности», а для чтения лекций по новым дисциплинам А.В. Лыков приглашал ведущих ученых из академических и отраслевых институтов СССР. На старших курсах студенты выполняли курсовые и дипломные работы с использованием экспериментальной базы лабораторий института.

Деятельность А.В. Лыкова на посту директора Института тепло- и массообмена была исключительно плодотворной. Остановимся только на некоторых важных направлениях его научных исследований.

А.В. Лыковым (вместе со своими учениками) с помощью методов термодинамики необратимых процессов создана теория взаимосвязанного тепло- и массопереноса при фазовых превращениях [2, 3]. Полученная система дифференциальных уравнений в общем случае имеет вид

$$c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \psi \rho_0 Q \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial u}{\partial x} + a_m \delta \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где T – температура, u – влагосодержание, a_m – коэффициент диффузии влаги, δ – термоградиентный коэффициент, λ – коэффициент теплопроводности, ρ_0 – плотность сухого тела, ψ – критерий фазового превращения, который характеризует отношение изменения влагосодержания за счет испарения к общему изменению влагосодержания, Q – теплота испарения.

Заметим, что последний член в правой части уравнения (2) описывает процесс термической диффузии влаги, о которой говорилось выше. Система уравнений (1)–(2) сыграла и играет важную роль в исследовании процесса сушки влажных материалов.

Примером использования системы уравнений А.В. Лыкова является решение двухмерной задачи неизотермического влагопереноса в древесине совместно с уравнением влагоупругости. В результате определены внутренние напряжения при сушке и предельные значения прочности при допущении ортотропного строения древесины. Исследования показали, что эффект термовлагопроводности незначительно влияет на продолжительность процесса сушки древесины.

Еще одним примером является моделирование нестационарных взаимосвязанных процессов переноса теплоты и влаги в растительных материалах при комбинированном энергоподводе в условиях постоянного и импульсного СВЧ воздействия. Показано, что создание импульсных и импульсно-ступенчатых режимов СВЧ излучения позволяет уменьшить температурное воздействие на обрабатываемый материал. Установлены кинетические зависимости с учетом конечной скорости переноса влаги.

Время релаксации теплового напряжения при распространении теплоты в металлах составляет $\sim 10^{-11}$ с, в газах $\sim 10^{-9}$ с. При этом скорость распространения теплоты соизмерима со скоростью звука. Вследствие малости времени релаксации решения гиперболического уравнения теплопроводности практически совпадают с решениями классического параболического уравнения. Скорость же диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах примерно в 10^6 – 10^7 и более раз меньше, соответственно время релаксации диффузионных процессов значительно больше, поэтому, строго говоря, в уравнениях массопереноса ее следует учитывать [2, 3].

Для одномерной задачи гиперболическое уравнение массопереноса с учетом конечной скорости переноса массы имеет вид [3]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial u}{\partial x} + a_m \delta \frac{\partial T}{\partial x} \right),$$

где τ_p – время релаксации.

Время релаксации массы связано с коэффициентом влагопроводности соотношением $\tau_p = a_m / v_m^2$, где v_m – скорость распространения массы.

Огромный вклад в развитие и инициирование многих направлений в области теории и техники сушки и тепловой обработки материалов внес академик А.В. Лыков. Во время работы в Институте А.В. Лыковым результаты исследований в этой области изложены в следующих монографиях: «Молекулярная сушка» (совместно с А.А. Грязновым, 1956), «Тепло- и массообмен в процессах сушки» (1956), «Теория тепло- и массопереноса» (совместно с Ю.А. Михайловым, 1963), «Теория сушки» (1968).

Выполненные в Институте исследования процессов сушки во взвешенном состоянии легли в основу создания нового метода сушки зерна и разработки конструкции пневмогазовой зерносушилки с контактным тепло- и массообменом и осциллирующим режимом. Идея контактного тепло- и массообмена базируется на практическом использовании теории переноса энергии и массы вещества, разработанной А.В. Лыковым. С 1954 года были испытаны первые опытно-промышленные образцы зерносушилок. В конце 50-х годов началось внедрение пневмогазовых рециркуляционных зерносушилок большой мощности на целинных землях.

В 50-е годы одно из направлений Института было сосредоточено на решении проблемы вовлечения в топливный баланс страны торфа, продуктов его переработки и переработки древесины. В это же время получили развитие работы по искусственной сушке торфа, в том числе фрезерного, сушки бумаги и картона непосредственно дымовыми газами. Исследованы и созданы новые методы термообработки влажных материалов – осциллирующий режим, контактный тепломассообмен, реверсирование газового потока, которые получили распространение при разработке принципиально новых схем и конструкций сушильных установок.

Большое научное и практическое значение имели теоретические и экспериментальные исследования А.В. Лыкова в области тепло- и массообмена при сушке сублимацией. Под руководством А.В. Лыкова спроектирован и построен в Ростове-на-Дону завод по сушке пищевых продуктов сублимацией.

В последующие годы на основе теоретических и экспериментальных исследований особенностей и механизма терморadiационной сушки и отверждения полимерных покрытий на подложках разработаны высокоэффективные методы термообработки материалов и внедрены на предприятиях страны серии различных типов терморadiационных сушильно-термических установок и поточно-механизированных линий.

Получили развитие теоретические основы кинетики сушки микробиологических материалов, вскрывающие механизм обезвоживания. Установлена закономерность летального повреждения микроорганизмов, вызванного удалением влаги из биомассы ниже максимального гигроскопического влагосодержания. По признаку ксероустойчи-

ности микробиологические материалы разделены на две категории: ксеролабильные и ксероустойчивые. Разработан метод контактно-сорбционного обезвоживания термоллабильных материалов, новые технологии сушки микробиологических материалов. Исследования аэродинамики струйных и закрученных потоков, тепло- и массообмена при диспергировании растворов привели к созданию новых способов сушки жидких материалов во встречных струях и вихревых потоках. На основе исследований разработан ряд новых технологий и высокоэффективных распылительных сушильных установок (яичного меланжа, казеинового гидролизата, экстракта кормовых дрожжей, полиалюмината натрия и др.).

Наряду с другими направлениями в Институте проводились комплексные теоретические и экспериментальные исследования кинетики и динамики вакуумной сушки электроизоляции высоковольтных трансформаторов. Решение этой важной задачи связано с переходом к единой энергетической системе страны, созданием сверхмощных магистральных линий электропередач.

В это же время активно проводятся исследования тепломассопереноса в двухфазных дисперсных системах во взвешенном состоянии. В результате предложен и разработан новый метод сушки медпрепаратов в падающе-кипящем слое. Этот метод лег в основу дальнейшей разработки поточной механизированной линии для создания непрерывной технологии производства лекарственных и витаминных препаратов в таблетках, объединяющей множество сопутствующих операций в единый последовательный комплекс. Разработан ряд сушильных установок типа СМК (сушилка медпрепаратов комбинированная). Освоен серийный выпуск этих установок на Пензенском заводе дезхимоборудования.

В Институте получила развитие теория тепломассопереноса в ненасыщенных капиллярно-пористых телах, базирующаяся на основных положениях двухфазной фильтрации и учитывающая влияние поверхностных сил и неравновесность процесса десорбции влаги. При фильтрации двухфазной смеси жидкости и ее пара считается, что для каждой из фаз справедлив закон Дарси или его обобщения. В качестве замыкающих соотношений используются уравнения Кельвина, Клапейрона-Клаузиуса, семейства изотерм сорбции.

Следует отметить, что в расчетах процесса сушки важное значение приобрел комплексный подход, включающий изучение свойств высушиваемого материала, определение режима сушки, выбор типа аппарата, оптимальных его параметров и геометрии. При этом большое значение имеют экспериментальные работы по кинетике сушки и результаты их обобщений. Введение А.В.Лыковым числа Ребиндера в уравнение кинетики сушки и обширные исследования процессов сушки позволили выявить общие закономерности в зависимостях числа Ребиндера от свойств материалов, режимных параметров и получить ряд обобщенных уравнений, пригодных для приближенных инженерных расчетов.

Здесь отмечены только некоторые результаты исследований в области теории и техники сушки, основанные на идеях А.В.Лыкова и полученные в Институте в результате развития его наследия.

А.В. Лыков одним из первых обратил внимание на тот факт, что в задачах высокоинтенсивного нестационарного конвективного теплообмена попытки задавать зависимость температуры стенки от продольной координаты могут приводить к противоречивым результатам. Условия на поверхности раздела не всегда могут задаваться аргіогі, а их необходимо получить путем решения уравнений распространения тепла в твердом теле и жидкости совместно с уравнениями движения, а на границе «тело–жидкость» должны быть заданы условия сопряжения, т.е. условия равенства температур и тепловых потоков. Такая сопряженная формулировка задач высокоинтенсивного конвективного теплообмена в настоящее время является общепризнанным подходом.

Академик А.В. Лыков интересовался многими научными проблемами, находящимися на стыках классических дисциплин. Так, в институте под его руководством получили развитие исследования по реологии, аэротермооптике, плазмохимии. Большое внимание он уделял проблемам, связанным с нелинейной термомеханикой, в частности с термодинамическим обоснованием уравнения теплопроводности в средах с памятью.

А.В. Лыков придавал большое значение международному сотрудничеству ученых. По его инициативе в Институте каждые четыре года, начиная с 1961 года, проводились Всесоюзные конференции по тепло- и массообмену (с 1988 года – это Международные форумы), в которых принимают участие сотни ученых из разных стран. В 2012 году Минский международный форум по тепло- и массообмену был приурочен к 60-летию образования Института.

В 2003 году Постановлением Президиума Национальной академии наук Беларуси учреждена премия имени академика А.В. Лыкова. Премии имени выдающегося ученого-основателя всемирно известной белорусской научной школы по тепло- и массообмену академика А.В. Лыкова присуждаются за научные работы, вносящие крупный вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований по проблемам переноса энергии и вещества, создание новых научных направлений, открытие и описание закономерностей явлений тепло- и массопереноса в природных и технических объектах. Премии (две – одна отечественным ученым и одна – международному коллективу) присуждаются один раз в 2 года в канун дня рождения А.В. Лыкова (20 сентября).

Алексей Васильевич обладал огромной эрудицией, высокой духовной культурой. Он был деликатным и отзывчивым человеком, щедро делился знаниями и идеями со своими учениками. Он снискал большое признание и уважение ученых-теплофизиков во многих странах мира.

Список литературы

1. Предтеченский В. Алексей Васильевич Лыков. Комментарии к автобиографии. М.: Грифон, 2010. 400 с.
2. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
3. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. М.: Энергия, 1978. 560 с.

УДК 542.47.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ
АКАДЕМИКА А.В. ЛЫКОВА В СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЯХ
ТЕПЛОМАСООБМЕНА ПРИ СУШКЕ
THE USAGE OF THE THEORETICAL PROVISIONS OF ACADEMICIAN
A. V. LYKOV IN MODERN MODELS OF HIT AND MASS TRANSFER DURING
DRYING**

Станислав П. Рудобашта

Stanislav P. Rudobashta

Российский государственный аграрный университет –

МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия, Москва,

(e-mail: rudobashta@mail.ru)

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

Аннотация. Отмечены основные достижения А.В. Лыкова в теории сушки, показана значимость его работ по анализу механизмов тепломассопереноса во влажных материалах при сушке, а также значение для теории и практики сушки выведенных им дифференциальных уравнений внутреннего тепломассопереноса. Рассмотрены методы кинетического расчета процесса сушки: эмпирические, полуматематические, математические (теоретические), отмечено, что последние базируются на дифференциальных уравнениях внутреннего тепломассопереноса А.В. Лыкова. Отмечены значение и все более возрастающая роль математических методов кинетического расчета сушилок. Обсуждена возможность их применения для разных видов материалов. Приведены примеры построения математических моделей на их основе.

Abstract. The main achievements of A. V. Lykov in the theory of drying were noted, the importance of his work on the analysis of the mechanisms of heat and mass transfer in wet materials by drying was shown, and importance for the theory and practice of drying of derived by them differential equations of internal heat and mass transfer were shown. The methods of the kinetic calculation of the drying process: empirical, semi-empirical, mathematical (theoretical) were studied, it was noted that the methods are based on differential equations of internal heat and mass transfer of A.V. Lykov. The importance and increasing role of mathematical methods of kinetic calculation of the dryers was noted. The possibility of their use for different types of materials was discussed. Examples of mathematical models based on them were shown.

Ключевые слова: сушка, тепло- и массообмен, кинетика, расчет сушилок, моделирование

Keywords: drying, heat and mass transfer, kinetics, calculation of dryers, modeling

Введение

Современная теория сушки создана в XX-м веке трудами ряда ученых, из которых главная роль принадлежит академику А.В. Лыкову. Она изложена в ряде его монографий: «Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения» (1938 г.), «Теория сушки» (1950 г.), «Тепломассообмен в процессах сушки» (1956 г.), «Теория сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов в пищевой промышленности» (1964 г.), «Теория сушки» (второе издание, 1968 г.) и основополагающих статей. Их дополняют капитальные труды А.В. Лыкова по общим вопросам тепломассопереноса: «Теория тепло-и массопереноса» (1963 г.), «Теория теплопроводности» (1967 г.), «Тепломассообмен. Справочник» (2-е изд., 1978 г.). Общее количество монографий А.В. Лыкова – 25. Особенностью трудов А.В. Лыкова является органичное сочетание большого количества экспериментальных исследований (с содержательным анализом полученных резуль-

татов и их обобщением) с классическими работами аналитического плана в области теории тепломассопереноса и сушки, в частности. Именно глубокое понимание процессов, протекающих во влажных материалах при их сушке, полученное им первоначально в самостоятельных экспериментальных исследованиях, а затем в сотрудничестве с учениками, позволило ему обобщить эти результаты и описать внутренний массоперенос в виде стройной и законченной теории,

$$i = -k\rho_0 \frac{\partial u}{\partial n} - k_p \rho_0 \frac{\partial t}{\partial n} - k_p \frac{\partial p}{\partial n}, \quad (1)$$

где i – плотность потока влаги в материале; u – локальное влагосодержание материала;

k – коэффициент массопроводности (эффективный коэффициент диффузии влаги); k_t – коэффициент термовлагопроводности; k_p – коэффициент фильтрационного массопереноса;

n – нормаль к изоконцентрационной поверхности; p – давление внутри материала; t – температура; ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала.

Основными вехами в экспериментальном исследовании внутреннего массопереноса и их обобщения А.В. Лыковым являются следующие:

- обнаружение внутреннего испарения влаги в капиллярно-пористых и коллоидных капиллярно пористых материалах и формулировка в результате этого сначала «теории углубления поверхности испарения», а затем уточнение ее в виде «теории углубления зоны испарения»;

- обнаружение эффекта термовлагопроводности;

- разработка классификации влажных материалов на основе их основных коллоидно-физических свойств, согласно которой все материалы подразделяются на капиллярно-пористые, коллоидные капиллярно-пористые и коллоидные материалы. Эта классификация опирается на классификацию форм связи влаги с материалом П.А. Ребиндера;

- анализ физических механизмов внутреннего массо- и теплопереноса, приведший к формулировке уравнения (1).

Отдельно следует выделить работы по анализу тепломассопереноса с позиций термодинамики необратимых процессов. Результатом этого анализа явилось получение выражений для плотностей потоков влаги и тепла в термодинамических понятиях, обоснование трех движущих сил, вызывающих перенос влаги под действием градиента потенциала массопереноса $\nabla \Theta$, градиента температуры ∇T и градиента общего давления ∇p . Этот анализ имеет большое методическое значение, т.к. было показано, что при использовании в качестве движущей силы процесса массопереноса не градиента влагосодержания, а градиента потенциала переноса влаги он является аналогом теплового потенциала - температуры, удельная изотермическая массеомкость является аналогом удельной теплоемкости, а влагосодержание материала – аналогом удельной энthalпии. При этом имеет место полная аналогия в описании процессов тепло- и массопереноса. Поскольку в области влажного состояния химический потенциал не может служить в качестве потенциала переноса влаги, то А.В. Лыковым был предложен экспериментальный метод определения потенциала массопереноса. Хотя потенциал массопереноса требует дополнительных экспериментов по его определению и поэтому не нашел широкого практического применения, но методическое значение его велико. Отметим, в частности, что при решении задачи, описывающей массообмен в аппарате с неподвижным кольцевым слоем дисперсного материала, пронизываемого в радиальном направлении потоком газа или жидкости [1], нам было удобнее формулировать массообменную задачу сначала в терминах потенциала массопереноса, а затем уже перейти к выражениям с использованием понятия влагосодержания материала. А.В. Лыковым было показано, что молекулярно-кинетический и термодинамический методы исследо-

вания внутреннего массопереноса при сушке не только не противоречат друг другу, но дополняют друг друга.

Анализ с позиций термодинамики неравновесных процессов в случае постоянных коэффициентов и термодинамических характеристик приводит к системе дифференциальных уравнений для высокотемпературной сушки [2]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = K_{11}\Delta T + K_{12}\Delta \Theta + K_{13}\Delta p, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = K_{21}\Delta T + K_{22}\Delta \Theta + K_{23}\Delta p, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = K_{31}\Delta T + K_{32}\Delta \Theta + K_{33}\Delta p, \quad (4)$$

где K_{11}, K_{12}, K_{13} – термодинамические кинетические коэффициенты, выражаемые через теплофизические характеристики (ТФХ).

При не очень высоких температурах (примерно до 100°C) молярный массоперенос пренебрежимо мал и система уравнений (2) - (4) редуцируется к виду

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = K_{11}\Delta T + K_{12}\Delta \Theta, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = K_{21}\Delta T + K_{22}\Delta \Theta. \quad (6)$$

В результате молекулярно-кинетического анализа явлений внутреннего связанного теплообмена при сушке капиллярно-пористых и коллоидных капиллярно-пористых материалов А.В. Лыковым получена система уравнений, которые в отсутствие молярного массопереноса, с учетом внутренних фазовых превращений и зависимости коэффициентов переноса от влагосодержания и температур при выражении движущей силы массопереноса через градиент влагосодержаний имеют вид (уравнения А.В. Лыкова)

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \text{div} [k(u, t)(\text{grad } u + \delta_t(u, t)\text{grad } t)], \quad (7)$$

$$c\rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div} (\lambda(u, t)\text{grad } t) + \varepsilon r^* \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (8)$$

где τ – время; $\delta_t = k_t/k$ – относительный коэффициент термовлагопроводности; c – удельная теплоемкость; t – температура, °C; λ – коэффициент теплопроводности материала; r^* – сумма удельных теплот парообразования и адсорбции; ε – локальный критерий внутренних фазовых превращений.

При не очень жестких режимах сушки термовлагопроводностью можно пренебречь, тогда при принятии коэффициентов k и $\lambda = \text{const}$ уравнения (7) и (8) принимают вид

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = k \Delta u, \quad (9)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \Delta t + \varepsilon r^* \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (10)$$

где $a = \lambda / (c\rho_0)$ – коэффициент температуропроводности материала.

Чтобы более четко представить место и роль уравнений А.В. Лыкова (9) и (10) в кинетическом расчете сушилок укажем на то, что в настоящее время все методы кинетического расчета можно разбить на три группы: 1) эмпирические, 2) полуэмпирические,

3) математические (теоретические) [3]. Последние основаны на использовании уравнений (9) и (10). Математические методы при прочих равных условиях предпочтительны, поскольку они физически и методически наиболее обоснованы и предполагают использование справочных данных по ТФХ. Это повышает точность кинетического расчета и значительно уменьшает проблему масштабного перехода от лабораторных исследований к промышленным аппаратам, а в ряде случаев вообще не требует лабораторных исследований (проблема масштабного перехода при переходе от лабораторных исследований к промышленным аппаратам целенаправленно изложена в [4]). Обзоры разных методов кинетического расчета процесса сушки, в том числе и основанных на использовании уравнений теплообмена А.В. Лыкова, даны в [3, 5]. Теоретические положения сушки, развитые А.В. Лыковым, признаны во всем мире. На них опирались в своих исследованиях ведущие отечественные ученые старшего поколения в области сушки, такие, как В.В. Красников, П.Д. Лебедев, А.С. Гинзбург, Г.К. Филоненко, Ю.А. Михайлов, П.С. Куц, Г.С. Шубин и др.

Применение системы уравнений (9), (10) для расчета кинетики и динамики сушки материалов требует следующих условий: 1) необходимы данные по ТФХ материалов, 2) для капиллярно-пористых и коллоидных капиллярно-пористых материалов также данные по локальному критерию внутренних фазовых превращений ε ; 3) форма высушиваемого материала должна быть правильной (пластина, прямоугольный параллелепипед, цилиндр - неограниченный и ограниченный, шар), 3) форма и размер высушиваемого материала не изменяются в ходе процесса. Отсутствие данных по ТФХ во многих случаях затрудняет применение математических методов кинетического расчета. Локальный критерий фазовых превращений ε , как показали исследования, изменяется по толщине высушиваемого тела и во времени. Эти изменения наиболее значительны для грубопористых материалов с радиусом пор $\tilde{r} > 10^{-5}$ м. Анализ показывает, что при расчете кинетики сушки материалов с микрокапиллярами ($\tilde{r} < 10^{-7}$ м) в инженерных расчетах можно принять, что испарение влаги происходит у поверхности высушиваемого тела и что, следовательно, слагаемое $\varepsilon r^* \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}$ в уравнении (10) для внутренних

точек тела равно нулю, уравнение (10) при этом принимает вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \Delta t. \quad (11)$$

Граничное условие теплообмена третьего рода для уравнения (11) при конвективной сушке в этом случае записывается в виде

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{\text{ин}} = \alpha (t_c - t_{\text{ин}}(\tau)) - r^* i(\tau), \quad \tau > 0, \quad (12)$$

где $t_c, t_{\text{ин}}$ – температура сушильного агента и поверхности тела соответственно; α – коэффициент теплоотдачи; $i(\tau)$ – интенсивность сушки; индекс «ин» – поверхность тела.

Поскольку ТФХ высушиваемого материала и технологические параметры теплоносителя изменяются по рабочему объему сушилки, то для учета этих изменений в [6] был предложен зональный метод кинетического расчета процесса, основанный на разбиении всего диапазона изменения влагосодержания материала на ряд концентрационных зон и определения необходимого времени пребывания материала в каждой из них по решению линейного дифференциального уравнения теплопроводности (9). Примеры расчетов разных типов сушильных аппаратов на основе зонального метода приведены в [6, 7]. Этот метод требует, в первую очередь, данных по коэффициенту теплопроводности высушиваемого материала, который, как показывают исследования, существенно зависит от влагосодержания и температуры материала. В [6, 7] приведен также метод и пример расчета кинетики непрерывной сушки дисперсного материала с использованием

ем данных по теплофизическим характеристикам материала, также зависящим от влагосодержания и температуры.

Расчет кинетики сушки дисперсного материала в непрерывно действующем сушильном аппарате математическим зональным методом основывается на аналитическом решении уравнения массопроводности (9), при этом используется подвижная (лагранжева) система координат, связываемая с центром частиц, перемещающихся по аппарату. В каждой зоне параметры сушильного агента принимаются постоянными.

Решение для этого случая при постоянном начальном влагосодержании имеет вид

$$\bar{E} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a \text{Bi}_m^2}{\mu_k^2 (\text{Bi}_m^2 + \mu_k^2 + b \text{Bi}_m)} \exp(-\mu_k^2 \text{Fo}_m), \quad (13)$$

где $\bar{E} = (\bar{u}(\tau) - u_p) / (u_n - u_p)$ – среднее относительное влагосодержание; $a = 2$; $b = 1$ – для пластины; $a = 4$; $b = 0$ – для цилиндра; $a = 6$; $b = -1$ – для шара; $\text{Bi}_m = (\beta_c R) / (k \rho_0 A_p)$ – число Био массообменное; $\text{Fo} = (k \tau) / R^2$ – число Фурье массообменное; β_c – коэффициент массоотдачи; R – характерный размер тела (половина толщины пластины, радиус цилиндра или шара); $A_p = u_p / C_c$ – коэффициент распределения функции концентрационного фазового равновесия; C_c – массовая концентрация распределяемого вещества во внешней фазе; μ_k – корни соответствующих характеристических уравнений решений задач массопроводности, зависящие от формы тела, и числа Bi_m [6].

Для тел в форме прямоугольного параллелепипеда и ограниченного цилиндра используются решения, полученные путем перемножения решений (13) для тел соответствующей формы. В [6] проведен анализ зонального метода расчета кинетики сушки на основе аналитических зависимостей вида уравнения (13) (исследование области регулярного режима, вопрос учета неравномерного начального распределения влагосодержания во второй и последующих зонах, учет влияния нестационарного температурного поля на кинетику сушки, выбор числа зон, ошибка от использования решения линейного дифференциального уравнения массопроводности), который обосновывает применение этого метода в инженерных расчетах.

В [8] описан метод расчета кинетики сушки дисперсных материалов в движущемся слое, основанный на использовании дифференциальных уравнений А.В. Лыкова, с учетом изменения параметров сушильного агента по длине аппарата. Характер изменения параметров сушильного агента по длине аппарата в данной математической модели определяется тепло- и массообменом между сушильным агентом и высушиваемым материалом.

Широкое распространение персональных компьютеров и наличие универсальных вычислительных программ позволяет в настоящее время без особых затруднений осуществлять расчет кинетики и динамики процесса сушки на основе нелинейных дифференциальных уравнений А.В. Лыкова. Сдерживающим фактором является отсутствие во многих случаях данных по ТФХ материалов.

Применение математических методов для описания кинетики конвективной сушки дисперсных материалов существенно упрощается в том случае, когда форма частиц является правильной, размеры частиц не изменяются в ходе процесса, кинетика массообмена полностью контролируется внутридиффузионным сопротивлением, фильтрационный перенос влаги в материале отсутствует, а термовлагопроводность пренебрежимо мала, задача теплообмена является балансовой. Такие условия реализуются при глубокой конвективной сушке от внутренней влаги гранулированных полимеров перед их переработкой в изделия. В этих условиях математическое описание микрокинетики процесса (кинетика сушки единичной гранулы) строится на основе решения дифференциального уравнения массопроводности (диффузии влаги) в грануле. Получены данные

по коэффициентам массопроводности (диффузии влаги) практически для всех промышленно выпускаемых гранулированных полимеров [6, 7, 9, 10]. Получены также данные по полидисперсности гранул и неоднородности их пребывания в аппаратах непрерывного действия [11], что позволяет реализовывать этот метод расчета на практике. Примеры расчета сушилок с использованием указанных функций распределения на основе решения дифференциального уравнения массопроводности приведены в [7, 10].

Уравнения внутреннего тепломассопереноса А.В. Лыкова используются не только при описании процессов конвективной сушки, но и при других способах энергоподвода. Так, в [11] приведена математическая модель, описывающая динамику осциллирующего электромагнитного нагрева пластины (плоского слоя), учитывающая сток теплоты на испарение влаги на основе аналитического решения задачи массопроводности (13), а в [12] дан анализ этого процесса на основе данной модели.

Систематические исследования кинетики сушки различных материалов на основе теоретических положений А.В. Лыкова проводятся в ИТМО им. А.Н. Лыкова НАН Р. Беларусь [13, 14]. Другим центром планомерного изучения кинетических и технологических аспектов сушки с использованием теории А.В. Лыкова является ИТТФ НАН Украины [15-17].

Развитая А.В. Лыковым теория широко используется при анализе и расчете процессов сушки и других термовлажностных процессов в химической, пищевой, легкой, целлюлозно-бумажной и других отраслях промышленности и в сельскохозяйственном производстве. Примером работ последнего времени с эффективным использованием дифференциальных уравнений взаимосвязанного тепломассопереноса А.В. Лыкова для математического моделирования технологических процессов могут служить: применительно к строительной индустрии [18], а для процессов пищевой технологии [19].

Фундаментальная теория тепломассопереноса, разработанная А.В. Лыковым, служит основой для дальнейшего развития отдельных ее положений и методов расчета различных технологических процессов, углубления познаний о свойствах материалов. Современные тенденции в развитии теории и техники сушки, которые опираются на феноменологическую теорию А.В. Лыкова, проанализированы в [13]. В [20] выполнен анализ тепло- и массопереноса в пористых средах, расширяющий возможности применения математических методов при описании различных технологических процессов с их участием. В [6] выделен и описан класс непористых материалов (полимеров), рассмотрены особенности внутреннего массопереноса в них, проанализированы специфические явления аномальной диффузии. В [21] описание внутреннего массопереноса А.В. Лыкова дополнено соотношениями, учитывающими деформации в материале. В [16, 17] представлена математическая модель тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке термолабильных материалов, которая развивает основные положения теории А.В. Лыкова. В [22] получены соотношения, которые учитывают внутривещной тепломассообмен между фазами и анизотропию структуры. В качестве дальнейшего развития отдельных положений теории А.В. Лыкова следует рассматривать и работы [23, 24], в которых соответственно рассматривались вопросы массопереноса в наноструктурах и режимы и механизмы обезвоживания продуктов в электромагнитном поле.

Теоретические положения А.В. Лыкова широко востребованы инженерной практикой и служат надежной основой для анализа и расчета различных тепломассообменных процессов в системах с твердой фазой.

Выводы

1. Современная теория сушки создана в XX-м веке трудами ряда ученых, из которых главная роль принадлежит академику А.В. Лыкову;

2. А.В. Лыков:

- обнаружил явление углубления зоны испарения в пористых материалах и эффект термовлагопроводности, выполнил анализ явлений тепломассопереноса во влажных

материалах, на основе которого сформулировал кинетическое уравнение внутреннего массопереноса;

- вывел дифференциальные уравнения, описывающие взаимосвязанный внутренний тепломассоперенос при сушке;

- выполнил анализ тепломассопереноса при сушке с позиций термодинамики необратимых процессов, показав полную аналогию процессов массо- и теплопереноса при выборе в качестве движущей силы массопереноса термодинамического потенциала;

- дал классификацию влажных материалов при сушке на основе их структурных свойств и величины энергии связи влаги с материалом;

- проанализировал кинетические закономерности сушки материалов разного класса при различных способах энергоподвода на сушку;

- проанализировал взаимосвязь технологических свойств материала с условиями тепломассообмена при сушке.

3. Теоретические положения А.В. Лыкова широко востребованы инженерной практикой и служат надежной основой для анализа и расчета различных тепломассообменных процессов в системах с твердой фазой;

4. Фундаментальная теория тепломассопереноса, разработанная А.В. Лыковым, служит основой для дальнейшего развития отдельных ее положений и методов расчета различных технологических процессов, углубления познаний о свойствах материалов.

Список литературы

1. Рудобашта С.П., Дмитриев В.М., Карташов Э.М. Тепломассообмен в аппарате с кольцевым стационарным слоем зернистого материала // Теор. основы хим. технол. 2002. Т. 36. № 5. С. 456-460.

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

3. Рудобашта С.П. Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов. Известия Российской академии наук. Серия энергетика. 2000. № 4. С. 98-108.

4. Масштабный переход в химической технологии. Разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования. Под ред. Розена А.М. М.: Химия, 1980. – 320 с.

5. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: Химия. 1987. – 208 с.

6. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. Под ред. А.Н. Плано-вского. М.: “Химия”. 1980. – 248 с.

7. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах, 2-е изд., перер. и доп. М.: КолосС. 2010. – 478 с.

8. Мазяк З.Ю. Тепло- и массоперенос в пористых телах при переменных потенциалах в среде. Львов: Изд-во Львовск. ун-та. 1979. – 120 с.

9. Рудобашта С.П., Дмитриев В.М. В.М. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление конвективной сушки дисперсных полимерных материалов // Инж.- физ. журнал. 2005. Т. 78. № 3. С. 51-60.

10. Дмитриев В.М. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление процесса конвективной сушки гранулированных и пленочных полимерных материалов. Дисс. ... докт. техн. наук. Тамбов. 2003. – 478 с.

11. Рудобашта С. П., Карташов Э. М., Зуев Н. А. Тепломассоперенос при сушке в осциллирующем электромагнитном поле // Теор. основы хим. технол. 2011. Т.45. № 6. С. 641-647.

12. Rudobashta S., Zueva G., Zuev N. Mathematical Modeling and Numerical Simulation of Oscillating Infrared Seeds Drying Process // Drying Technology: An International Journal 2014. Vol. 32. Issue 11. P. 1352-1359.

13. Акулич П.В., Драгун В.Л., Куц П.С. Технологии и техника сушки и термообработки материалов. Минск: «Белорусская наука». 2006. – 191 с.

14. Акулич П.В. Термогидродинамические процессы в технике. Под ред. д.т.н. П.С. Куца. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова. 2002. – 268 с.

15. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Оптимизация процессов распылительной сушки. Киев. Наукова думка. 1984. – 240 с.

16. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Математическая модель тепломассопереноса и фазовых превращений в процессах сушки // Пром. теплотехника. 2001. Т. 23. № 3. С. 65-73.

17. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки с целью оптимизации процесса сушки термолабильных материалов // Инж.-физ. журнал. 2005. – Т. 78, – № 1. – С. 74 – 87.

18. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК «ПресСто». 2010. – 364 с.

19. Теоретические основы пищевых технологий: монография. В 2-х книгах. 1 кн. – 608 с. 2 кн. – 800 с. Отв. редактор В.А. Панфилов. М.: КолосС. 2009.

20. Павлюкевич Н.В. Введение в теорию тепло-и массопереноса в пористых средах. 2-е издание. Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова. 2003. – 141 с.

21. Луцки П.П. Массопроводность деформируемого в процессе сушки твердого пористого тела // Промышленная теплотехника. 1987. Т. 9. № 5. С. 29-34.

22. Дорняк О.Р. Тепломассоперенос в ненасыщенных коллоидных капиллярно-пористых анизотропных материалах: дисс. ... докт. техн. наук. Воронеж. 2007. – 340 с.

23. Бурдо О.Г. Механо-диффузионный эффект – новое направление в массопереносе // Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Бандура В.Н., Ружицкая Н.В. Режимы и механизмы обезвоживания продуктов в электромагнитном поле // Труды Международной научно-технической конференции «Проблемы ресурс- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК». V-й Международный научно-технический симпозиум «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)» (СЭТТ – 2014), посвященный 110-летию чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова, 23-26 сентября 2014, Иваново 2014. Т. 1. С. 39-43.

**DRYING TECHNOLOGIES ENGINEERED FOR THE 21ST CENTURY
ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ 21 ВЕКА**

Odilio Alves-Filho
Одилио Алвес-Фильо

Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway
(e-mail: odilio.alves@ntnu.no)

Норвежский университет науки и технологий

Abstract: This paper covers the heat pump drying technologies engineered for the 21st century. These novel technologies offer economical and efficiency benefits compared to conventional drying. The future is for heat pump dryers working with natural fluids because they are engineered as sustainable thermal processes in accordance with Kyoto and Montreal protocols. These technologies have been systematically designed from extensive R&D done at Norwegian University of Science and Technology (Trondheim).

Аннотация: В данной статье представлены технологии сушки с тепловым насосом, которые являются технологиями 21-го века. Эти инновационные технологии обладают несомненными преимуществами с точки зрения экономической эффективности и качества продукта по сравнению с традиционной сушкой. Будущее стоит за теплонасосными сушилками, работающими на природных хладагентах, потому что они разработаны как устойчивые тепловые процессы в соответствии с Киотским и Монреальским протоколами. Эти технологии были разработаны в ходе обширных научных исследований, проведенных в Норвежском университете науки и технологий (Трондхейм).

Keywords: energy efficiency; green technology; investment return; sustainable processes.

Ключевые слова: возврат инвестиций; устойчивые процессы; экологически чистые технологии; энергоэффективность.

INTRODUCTION

Cooling and heating processes have been around for several decades but R&D and applications of modern heat pump (HP) drying technology has only recently advanced from pilot to industrial applications. The worldwide trend in drying is to incorporate computers, electro-mechanics and controlling devices for better dryers' performances. These advances along with new construction materials can be combined design lighter, stronger and compact HP dryers.

The future HP dryers will operate with natural working fluids to fully comply with current and future environmental protection protocols. Extensive tests and R&D have been made at Norwegian University of Science and Technology and HP dryers have developed from bench to pilot plants as well as industrial plant for specific applications. The focus has been on capacity, efficiency, sustainability and design of HP dryers operating with environmentally friendly fluids. Further experiments are being performed to refine technoeconomic problems and testing new products of commercial interest. Also, HPD allows processing of heat-sensitive materials and produce high quality and tailored properties dried products at competitive cost. For this purpose the HPD operates in atmospheric freeze-drying and evaporative drying in a single unit.

This paper explores HPD design and layout and compares dryers based on coefficients of performance, thermal efficiency and specific moisture extraction ratio. It describes HPD operating with natural fluids with benefits in components with reduced size, climate stability and low environmental impact. Several arrangements of heat pump dryers are illustrated and problems are solved for cases ranging from bench scale to pilot and industrial plants. HPD is among the best available green technologies to produce superior quality products and fully comply with energy, climate change and environmental concerns.

Therefore, HPD is a novel and cutting edge technology of the 21st Century since it is unique and offers social-industrial and cost-efficiency advantages. The last century conventional dryers that are still commonly used today lack these benefits since they were designed in an era unconcerned with environmental and energy issues.

ENVIRONMENT AND CLIMATE ASPECTS RELATED TO DRYING

Conventional dryers consume large amounts of energy inducing an equivalent emission of green house gas (GHG) to the atmosphere. The living space of our planet is confined to a limited gaseous atmosphere, a shallow hydrosphere and a thin earth crust. The conditions in this living space depend on two delicate balances. The first balance is energy received from the sun's radiation the energy rejected as *infrared radiation*. A known disturbance here is blocking transfer of infrared radiation leading to warming up of the biosphere. The cause of blockage is the notorious greenhouse gases (GHG) represented by carbon dioxide, chlorofluorocarbons (CFCs), hydrochlorofluorocarbons (HCFCs), hydrofluorocarbons (HFCs), hydrocarbons, methane, nitrous oxide and others.

The second is mass balance of oxygen and the GHG carbon dioxide. This mass balance involves the sun's radiation, the plants composing the greenish earth's crust and the GHGs emitted by natural and artificial processes. The main process involved this mass balance is photosynthesis that is triggered by sun's photons that successfully cross the atmosphere and strike green leaves where carbon dioxide combines with water producing carbohydrate and oxygen molecules. Photosynthetic plants and organisms are converters of GHG to compounds essential to life and respiration. These compounds are the building blocks of cells either of animals or plants, thus, comprising the base of the food chain to nourish herbivores, carnivores and humans.

A most important aspect of the photon-leaf association is the release of oxygen and capture of carbon dioxide to maintain a balanced and tolerable concentration of GHG and oxygen in a life supporting biosphere. This photosynthetic phenomenon is in equilibrium with the carbon dioxide released by natural cellulose decomposition, volcanism, etc. Any disturbance of the oxygen-GHG mass balance results in an over-heating of the biosphere with appalling effects in the hydrological and carbon dioxide-air cycles. However, GHGs are being released in increased concentration by direct combustion processes, transport, agriculture, wastes, and chemicals-solvents and other industries.

The most extensive initiative to reduce the GHG emission occurs in Europe through proposals and incentives. The estimated artificial emission of GHGs in 2011 is 33.4 Gt, a number that is difficult to grasp. A better sense of the magnitude is to convert to a familiar geometrical shape. Since the density of carbon dioxide density is about 1.98 kg/m³ the emission is equivalent to a sphere of 32 km in diameter.

Notice also that similar spheres have been emitted in the near past and future emission will be of progressively larger spheres. This statement is reinforced by the estimated 50 Gt emission of GHGs for 2050 when nearly 100 of such wicked spheres will flock the stratosphere and disrupt earth's cycles and life.

There are also chemical substances degrading the living space stratosphere and an indicator is the ozone depletion potential (ODP). The 1920's conception of the CFCs and HCFCs was followed by widespread use in commercial refrigeration and aerosol agents. No concern existed on the effect of these substances on the environment, health and safety. Even though taken as safe there were accidents that could not be detected in time because the gas phase of these substances is colorless, odorless and denser than air.

The observations and measurements made at the end of last century indicated that the chlorine molecule in CFCs and HCFCs causes severe damage to the ozone layer and it is highly stable. As a consequence CFCs and HCFCs were phased-out and replaced by HFCs that have zero ODP and non-zero global warming potential (GWP).

The negative effect on climate change is connected to refrigerants with high GHGs and GWP. Then, the amount of these refrigerant has to be reduced and better fluid selection be-

comes essential. HFCs are to be gradually reduced, replacement, low charge, containment, recycling and destruction at the end-of-life of equipment. This implies that HFCs will eventually be phased out.

Therefore, climate change or environment depletion is avoided by selecting the best refrigerants and heat pump fluids. These are natural fluids with near zero global warming potential and zero ozone depletion potential.

Heat pump drying can be designed to operate with natural fluids resulting in a significant drop in green house gas emission. In particular, when electricity is generated in fossil fueled thermal power plants, the heat pump technology provides reduction in energy consumption with an equivalent drop in greenhouse gas emissions. Furthermore, the heat pump dryers operate in closed cycles both in the refrigerant and drying air loops. This means that it is a green technology without ambient pollution by fines or thermal pollution by hot exhaust air.

HEAT PUMP DRYING BENEFITS AND PRINCIPLE OF OPERATION

Conventional dryers have limitations such as low quality dried product, negative environmental impact and high energy consumption or high cost. A solution to these problems is to apply heat pump drying that now is a ready-to-use technology. It operates well at high-medium to low temperatures depending on the material sensibility and application. It can also combine low and medium temperatures in a single heat pump dryer aiming at energy savings and superior product quality (Alves-Filho, et al., 2003).

A properly designed heat pump dryer uses a fraction of the energy required by conventional dryers. As indicated in Table 1 the HPD is several orders-of-magnitude more energy efficient and less costly than conventional dryers.

Table 1. Energy utilization by the main conventional and by heat pump dryers

Dryers	SMER, kg/kWh	Specific energy, kJ/kg
Conventional dryers: rotary, spray, tunnel and fluid bed vacuum freeze	0.5 to 0.75 0.08	7200 to 4800 —
Adiabatic heat pump fluidized bed dryer	2 to 3	1800 to 1200
Polytropic heat pump fluidized bed dryer	3 to 5	1200 to 720
Superheated steam dryer	2.4 to 3.6	1500 to 1000

The table gives the energy utilization by main conventional and heat pump dryers. It shows that the adiabatic and polytropic heat pump dryers have SMER similar or slightly higher than superheated steam dryer. Let us now describe what a heat pump dryer is and how it operates. This drying technology is designed to operate at atmospheric pressure, in single or multiple stages, in batch or continuous modes, with moving or fluidized bed for further enhancement of energy use and water removal rate. It can also operate in the stationary bed with lower rates.

The heat pump dryer recovers heat from the drying exhaust vapor that is lost in open conventional dryers. A properly designed heat pump dryer has a closed loop and fully recovers energy that is distributed for both the heating and cooling required in a drying process. The refrigerant flows through the evaporator where it absorbs latent heat from the exhaust vapor and recycles it through the condenser. In a similar way valuable volatiles can be recovered and harmful condensable vapors can be separated and discarded.

The magnitude of heat recovery in a heat pump dryer depends on the area available for heat transfer and properties of refrigerant and moist air. It also depends on the moist air and evaporating refrigerant temperatures as well as on the evaporating and condensing temperature difference. The last condition is highly dependent on the number of stages of the heat

pump dryer. The single-stage vapor compression is a commonly applied heat pump cycle. In this case only one evaporator cools the moist air, condenses the water vapor fraction and absorbs (for boiling the refrigerant) the corresponding latent heat of vapor condensation.

A single stage heat pump drying system is advantageously and widely applied but is unable to provide several streams of drying air with different conditions and to operate with large evaporating and condensing temperature difference. For this case the solution is multistage heat pump drying as illustrated in Figure 1. It shows a two-stage heat pump dryer that operates

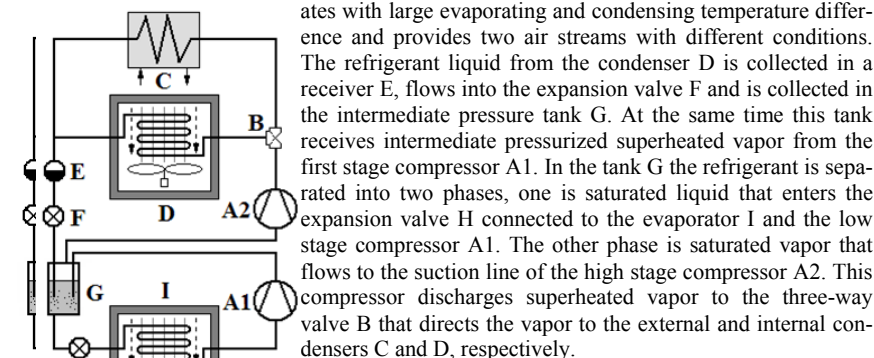


Figure 1. Two-stage heat pump dryer.

with large evaporating and condensing temperature difference and provides two air streams with different conditions. The refrigerant liquid from the condenser D is collected in a receiver E, flows into the expansion valve F and is collected in the intermediate pressure tank G. At the same time this tank receives intermediate pressurized superheated vapor from the first stage compressor A1. In the tank G the refrigerant is separated into two phases, one is saturated liquid that enters the expansion valve H connected to the evaporator I and the low stage compressor A1. The other phase is saturated vapor that flows to the suction line of the high stage compressor A2. This compressor discharges superheated vapor to the three-way valve B that directs the vapor to the external and internal condensers C and D, respectively.

The second stage drying involves moisture removal by evaporation at higher rates. The two-stage heat pump dryer operates with energy recovery for high efficiency (superior quality dried product) resulting in reducing the energy use and costs.

Currently heat pump drying is industrially applied for processing fish and vegetables. Extensive research continues for development of new dried products and process improvements.

This paper showed that heat pump drying is a novel technology that offers major benefits in terms of product quality, energy savings and environmental emission minimization. Heat pump drying is commercially applied for processing fish and vegetables. This dryer can operate in single or combined evaporation or atmospheric freeze sublimation modes for drying of foods, fruits, berries and vegetables and other heat sensitive products. The heat pump dryer has efficiency up to 5 times higher than conventional dryers with potential for implementation by modern industries.

SINGLE STAGE VAPOR COMPRESSION HEAT PUMP DRYING

A single vapor compression system has a throttling valve or similar device separating the low and high pressure sides as illustrated in Figure 2. Heat exchangers particularly called condensers and evaporators are applied to transfer energy between the heat pump system working fluid and surroundings. The working fluid changes phase from vapor to liquid as it flows through the condenser and releases energy to the heat sink. This direction of energy transfer requires a higher temperature in the heat pump fluid than the heat sink temperature. Simultaneously, the working fluid changes phase from a liquid and vapor mixture to vapor by boiling in the evaporator while receiving energy from the heat source. This direction of energy transfer also requires lower temperature in the evaporating fluid than in the heat source temperature. These processes take place in a closed cycle as the working fluid flows through condensers, evaporators, compressors and throttling devices. The energy transfer obeys the statements of the first and the second laws of thermodynamics. Additionally, the energy exchange occurs in accordance with the mechanisms of heat conduction, convection, sublimation, condensation and evaporation.

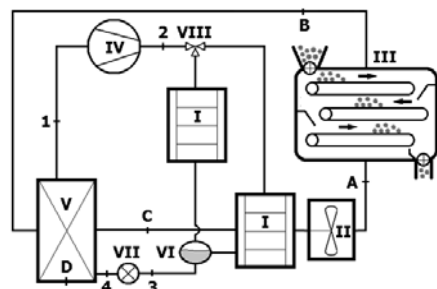


Figure 2. Heat pump belt dryer with R134a: I – condensers (heaters), II – blower, III – belt dryer with leak cubes, IV – compressor, V – evaporator, VI – receiver, VII – throttling valve, VIII – three way valve, 1 – saturated vapor, 2 – superheated vapor, 3 – saturated liquid, 4 – vapor and liquid mixture, A – inlet of drying chamber, B – inlet of evaporator, C – inlet of condenser, D – evaporator surface.

A modern alternative for substantial energy recovery with suitable drying rates is the heat pump drying technology operating with full recirculation of the exhaust air. The main features of the heat pump dryer are the ability to fully recycle exhaust air using a closed loop design, condensation of water vapor in the air and energy transfer for boiling the refrigerant inside the evaporator with subsequent release of this energy to the air inlet during condensation of refrigerant inside the condenser.

The single stage vapor compression heat pump dryer applies with high coefficient of performance (COP) and specific moisture extraction ratio (SMER) for medium temperature drying. The COP and SMER are particularly high for heat pump drying systems with medium or small temperature difference between evaporation and condensation.

TWO STAGE VAPOR COMPRESSION HEAT PUMP DRYING

A properly designed two stage vapor compression heat pump dryer has better performance than single stage vapor compression for large temperature and pressure differences between evaporation and condensation. The reason is that the extra components in the dryer allows operation in smaller pressure intervals resulting in enhanced coefficients of performance, energy utilization and water removal rate. A major advantage of this dryer is its ability to process heat sensitive wet-solids, liquid and pastes since the evaporator and air inlet temperatures can be set slightly below the material freezing point resulting in high quality product while operating with high performance and enhanced water removal rates. The additional benefits of this heat pump dryer are a lower pressure ratio, higher cooling capacity, higher isentropic efficiency, lower discharge temperature or compressor overheating protection, lower compression and expansion energy losses.

SELECTION OF HEAT PUMP FLUIDS

There is an abundance of heat pump fluids, or refrigerants, in the international market today because there is no ideal refrigerant satisfying all required conditions in different applications. A question is: how to select a fluid from this wide variety? What are the criteria for selection? The answers to these questions are covered gradually in this paper. The selection procedure involves comparison of fluids based on the properties at the state points of the heat pump cycle at specific operating conditions. The current selection favors fluids with near zero ozone depletion potential and global warming potential, harmless and non-toxic, compatible with materials and lubricating oils, favorable properties and low cost.

Selection Based on Performance from Cycles with Similar Conditions

A heat pump and refrigerator operates with a fluid or refrigerant that flows through the evaporator absorbing energy from the heat source (medium to be cooled) and through the

condenser transferring energy to the heat sink (medium to be heated). The processes in a mechanical vapor compression heat pump system cycle are evaporation, condensation, compression and throttling. These processes and energy transport occur as the fluid changes phase and flows through the components.

Selection Based on Performance at Transcritical Cycle

An important factor in selecting a fluid is the ability to operate in a transcritical cycle. This cycle has improved performance compared to a subcritical cycle for operation close to the critical point. In a conventional subcritical cycle the condensation occurs in the two-phase region and the COP drops sharply as the pressure approaches the critical point. The obvious questions are how to reverse this situation and what is the fluid to select? The situation is inverted by considering that condensation in a transcritical cycle (above critical point) happens without phase change and, as the condensation pressure approaches the critical point, the COP greatly increases by means of gas cooling. An exceptional fluid choice for the heat pump transcritical cycle is the carbon dioxide (R744) since it has critical temperature and pressure of 31.03°C and 7380 kPa. The heat pump with carbon dioxide in a transcritical cycle displays better performance characteristics compared to subcritical cycle.

Selection Based on Operating Pressure and Temperature

The refrigerant can be selected based on the evaporating and condensing temperatures for pressures of 1 and 25 bar that are typical in commercial compressors. The temperature and pressure are constant in the two-phase region for azeotropic blends and natural fluids implying a constant saturation temperature at a given pressure. However, the temperature varies with the pressure for zeotropic blends and air. This implies for these blends that the temperatures at each pressure are defined by bubble-point temperature (t_{bub}) and dew-point temperature (t_{dew}) rather than saturation temperature (t_{sat}).

The R718 has high saturation temperatures at the typical pressures and is seldom used in vapor compression heat pump systems. In contrast, R729 is a cryogenic fluid with very low saturation temperatures at the given pressures. The natural fluids have a large variation of the saturation temperatures allowing a wide range of application. The closeness of the bubble-point temperatures of the zeotropic blends indicates their similar purposes and performances.

Selection Based on Effect on Safety and Environmental Issues

The selection of the heat pump fluid depends strongly on the environmental effects of the fluid and potential health risks the fluid presents. In terms of safety the refrigerant selection depends on the classes and groups established according to the Standard 34. The safety classes of refrigerants are expressed by letters: A: nontoxic for concentration below 400 ppm by volume, B: toxic at concentration above 400 ppm.

The safety groups are represented by numbers as follows:

- 1: no spread of flame in air at 18°C and 101 kPa,
- 2: low flammability limit greater than 0.1 kg/m³ at 21°C and 101 kPa,
- 3: highly flammable with lower flammability limit less than or equal 0.1 kg/m³ at 21°C and 101 kPa.

The GWP is equivalent to the amount of heat trapped as greenhouse gases (GHGs) relative to carbon dioxide, which is used as a reference value with a GWP of 1.

THE 21ST CENTURY HEAT PUMP DRYERS WITH NATURAL FLUIDS DESIGNED AT NTNU

The current trend favors zero ODP and zero GWP fluids and the future vision is intensified application of natural fluids in heat pumps and refrigeration systems. Then, the R&D is increasing and encouraging the return to natural fluids in combination with today's advanced components, processes, controls, and materials. The reasons are that natural fluids have excellent properties and are permanent solutions in concern to safety and impact to environment and climate. The natural fluids are further sub-divided into the safest, such as water and air, and practical which are the hydrocarbons, ammonia, and carbon dioxide.

Attracted by the collective advantages of natural fluids several institutions and industries are currently engaged and developing heat pump systems with these fluids. In choosing the natural fluids alternatives, ammonia and carbon dioxide were considered as the best selection due to the benefits of zero ODP, unit GWP, safety, proper temperature and pressure levels, excellent performance and energy utilization. Process performance and impact on environment, climate and health have been the focus of R&D at the Norwegian University of Science and Technology (NTNU) and, as a consequence, several heat pump dryers with R717 and R744 have been designed and built. In addition to fluid another choice was a full recirculation of exhaust air and maximum energy recovery by the heat pump dryer components. These parameters are considered in the design of the R717 and R744 heat pump dryers and, in particular, to the blower, drying chamber, evaporator, compressor, condenser and throttling device. The main objectives are to develop sustainable and green heat pump technology to achieve and enhanced coefficient of performance and optimum specific moisture extraction ratio.

Carbon Dioxide Heat Pump Dryer

The only pilot scale heat pump dryer working with carbon dioxide in a transcritical cycle for particulate materials in a fluidized or stationary bed was designed and built at NTNU. The R744 heat pump dryer is designed to operate at variable conditions with a cleaning in place system (CIP). The CIP includes spray nozzles that are mounted in the drying loop allowing proper cleaning of the blower, cyclone, heat exchangers, drying chamber and connecting ducts prior and after drying. Air and gases such as nitrogen, helium and steam can be applied for drying or sterilization since drying loop is designed to stand a maximum absolute pressure of 220 kPa.

Potential applications for this dryer are biochemical, chemical, medical, pharmaceutical and food products. The wet material is loaded into the chamber, the gas velocity is adjusted for fluidization or stationary modes and the temperature is set according to the nature, stickiness and thermal sensitivity of the drying material. Major benefits of this heat pump dryer is a green technology with zero ODP, near zero GWP and it is designed with very high coefficient of performance for high energy efficiency and lower cost.

Ammonia Heat Pump Dryer

Ammonia was selected as the natural fluid and used in the fluidized bed and tunnel drying technologies designed and built at NTNU. The fluidized bed heat pump dryer working with R717 differs from the conventional adiabatic dryers because it is designed to operate close to isothermal or non-adiabatic processes. To achieve this operation the air drying loop side has two drying chambers with immersed heat exchangers connected to the heat pump condensers. The wet material is continuously loaded into the first drying chamber operating in back-mixing fluidized bed, after which the semi-dried product flows through a connecting duct and enters the second drying chamber operating in plug-flow where it is fully dried and discharged.

CONCLUSIONS

HPD is a green technology with zero GWP and ODP when operating with natural fluids. A well designed heat pump dryer is several orders-of-magnitude more energy efficient and less costly than conventional dryers. HPD beneficially contribute to a sustainable society while providing superior products at competitive cost. This is a 21st century engineered drying technology ready for implementation by modern industries wishing a return of investment while contributing to a sustainable society.

CITED REFERENCES

Alves-Filho, O. (2013). Heat Pump Drying: Theory, Design and Industrial Application. New and Improved Drying Technologies, Norway, 359 pp., ISBN 978-82-92739-99-0.

Alves-Filho, O., Eikevik T. and Goncharova-Alves, S. (2008). Single- and Multistage Heat Pump Drying of Protein. Drying Technology, Vol. 26 (4), pp. 470-475. Marcel Dekker Inc. NY. USA.

Alves-Filho, O. and Roos, Y.H. (2006). Advances in Multi-Purpose Drying Operations with Phase and State Transitions. Drying Technology, Vol. 24 (3), pp. 383-396. Marcel Dekker Inc. NY. USA.

Alves-Filho, O. and Mujumdar, A.S. (2005). Novel Drying Technologies for Energy Savings and High Product Quality – Model Based Case Studies (Plenary lecture). Proceedings of the 2nd International Conference “Energy-Saving Technologies for Drying and Hygrothermal Processing” (DHTP-2005), Moscow. Russia, 11-14 October, Vol. 1, pp. 29-47.

УДК 674.047

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ MODERN PROBLEMS OF MATHEMATICAL MODELLING OF THERMOMOIST PROCESSING OF MATERIALS

Ольга Р. Дорняк

Olga R. Dorniyak

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
Россия, Воронеж

(e-mail: ordorniyak@mail.ru)

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Russia, Voronezh

Аннотация: Рассмотрены динамика и перспективы развития методов математического моделирования применительно к процессам сушки.

Abstract: Dynamics and prospects of development of mathematical modeling methods in relation to drying processes are considered.

Ключевые слова: математическое моделирование; капиллярно-пористые среды; drying.

Keywords: Mathematical modeling; capillary-porous media; drying.

Введение. Метод математического моделирования называют «третьим методом познания», который сочетает в себе многие достоинства, как теории, так и эксперимента [1]. Методы математического моделирования постоянно развиваются. Цель доклада – основываясь на публикациях последних лет, оценить динамику и перспективы развития методов, а также дать полезные ссылки молодым исследователям на ряд блестящих обзоров и оригинальных работ, которые помогут им сориентироваться в проблемах математического описания процессов переноса при сушке.

Данный доклад представляется на первых международных научных Лыковских чтениях. Поэтому, сделаем некоторое отступление, зададимся вопросом: современна ли теория А.В. Лыкова? Полагаем, что да, несмотря на то, что свою знаменитую теорию академик А.В. Лыков создал в середине прошлого века. Большинство специалистов известна диффузионно-фильтрационная математическая модель влаго- и теплотеноса в капиллярно-пористых телах [2], разработанная А.В. Лыковым и часто называемая его именем. Конечно, появились новые подходы и методы моделирования процессов сушки, но до сегодняшних дней эти процессы все еще изучены недостаточно. Модель А.В. Лыкова остается надежным рабочим инструментом технологов при проектировании конкретных сушильных процессов, и они не спешат с ней расставаться, не имея альтернативы, превосходящей эту модель по соотношению информативность - уровень доступности. Поэтому высказывания, звучащие иногда как сожаление, что «до сих пор основными книгами по явлениям переноса при сушке остаются работы А.В. Лыкова», у многих последователей и учеников А.В. Лыкова могут вызывать, только, законную

гордость. Известность и популярность исследований академика А.В. Лыкова подтверждается их широким цитированием в российских и зарубежных публикациях, причем не только тех из них, что напрямую пользуются моделью, а также тех, что идут дальше, развивая и углубляя теорию сушки. Движущей силой этого развития, является необходимость, связанная с современными практическими задачами, которые требуют описания наиболее значимых, но сложных и взаимосвязанных физических явлений, сопровождающих интенсивную сушку материалов.

Метод математического моделирования для изучения процессов сушки, как и в других отраслях науки, начал применяться с 40-х – 50-х годов прошлого века. Достижения исследователей XX века, ставшие основой для проектирования сушильных процессов, проанализированы в проблемной статье профессора С.П. Рудобашты «Фундаментальные исследования тепломассопереноса при сушке» [3]. В последние десятилетия междисциплинарная отрасль науки, изучающая процессы сушки, безусловно, развивалась. Достаточно полную информацию о векторах этого развития можно найти в обзоре «Новые российские исследования в области сушки и термовлажностных процессов» [4], а также в коллективной монографии «Современные вопросы теории переноса при сушке» [5]. Современные методы математического моделирования тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых системах представляют работы [6-11]. Отметим, что список цитированной литературы ни в коей мере не претендует на полноту.

Три основных типа математических моделей для процессов сушки и термовлажностной обработки материалов. Современные математические модели в нашей научной отрасли с необходимостью являются компьютерными моделями, т.к. их исследование в силу сложности проводится в основном с помощью компьютера. Методологическую основу математического моделирования традиционно составляет удачно сформулированная академиком А.А. Самарским триада «модель, алгоритм, программа». При этом все три компонента триады рассматриваются нераздельно: 1) математическая модель, с одной стороны, адекватно описывающая процесс, а с другой, допускающая реализацию с помощью существующей вычислительной техники; 2) эффективный численный алгоритм, позволяющий на основе модели провести на доступных компьютерах расчет; 3) программная реализация алгоритма, дающая возможность в числовом виде получить результат, а затем и обработать его для окончательного потребления, например, с помощью визуализации [12]. Такая концепция позволяет решать для сложных систем, к которым относятся объекты сушки, следующие актуальные проблемы:

- Выяснение механизмов взаимодействия элементов системы.
- Идентификация параметров модели по экспериментальным данным.
- Оценка устойчивости системы.
- Прогноз поведения системы при различных внешних воздействиях.
- Оптимальное управление системой в соответствии с выбранным критерием оптимальности.

Рассмотрим типы математических моделей сушки, которые наиболее часто используются современными исследователями процессов сушки и термовлажностной обработки материалов.

Важно подчеркнуть, что можно говорить о двух качественно разных типах моделирования по отношению к пористым средам - о моделировании «структуры» образца и моделирование его поведения (процессов тепло- и массопереноса). При этом указанные процессы, определяемые внешними воздействиями, могут приводить к преобразованию «структуры». Слово «структура» взято в кавычки не случайно. Возможно, следует пользоваться, в ряде случаев, более современной терминологией, различая структуру и текстуру материала, как предлагается в [13]. Структура частиц пористого материала, образованная из атомов и молекул, определяет его химические и фазовые свойства, а текстура - комплекс дополнительных свойств, например, проницаемость для газов и

жидкостей, многие адсорбционные особенности, равновесное распределение введенных в пористое пространство флюидов, реальную механическую прочность, теплопроводность и пр. [13].

Учитывая вышесказанное можно выделить три класса математических моделей тепло- и массопереноса в пористых средах при сушке, для наглядности представленных на рисунке.



Рисунок – Методы математического моделирования тепло- и массопереноса при сушке и термовлажностной обработке капиллярно-пористых материалов.

1 тип - наиболее развитые на сегодня методы математического моделирования процессов тепло- и массопереноса. К нему относятся все модели влаго- и теплопереноса на основе уравнений типа А.В.Лыкова. Геометрическое моделирование пористой системы при этом не проводится.

Уравнения А.В.Лыкова записаны для капиллярно-пористого тела, как гомогенного. Все параметры переноса являются усредненными по представительному объему высушиваемой среды. Если обезвоживание проводится в изотермических условиях, то для изучения кинетики и динамики влагосодержания используется уравнение диффузии. Иногда решение этого уравнения обобщается на случай неизотермических процессов путем введения эффективного коэффициента диффузии, зависящего от влагосодержания и температуры и определяемого с использованием экспериментальных данных.

Динамика развития этого метода математического моделирования может быть названа экстенсивной, поскольку исследования направлены на изучение процессов сушки все большего числа материалов, в том числе, самых разных овощей, фруктов, других продуктов питания. Профессор А.С. Муджумдар (A. S. Mujumdar) указал [14], что в сушке нуждается более 50000 природных материалов, которые, как правило, имеют сложное капиллярно-пористое строение. Технологические режимы их обезвоживания индивидуальны. Кроме того, востребованы интенсивные способы сушки, способные сохранить качественные характеристики высушиваемого сырья - комбинированные процессы сушки, например, конвективная сушка с использованием СВЧ-излучения, ультразвука и т. д. [15,16]. Поэтому исследования, в которых математическая модель процесса сушки включает уравнения влагопроводности, теплопроводности и, реже, уравнения общего давления будут продолжены. Следует отметить, что модели этого класса, не претендуют на универсальность. Как правило, коэффициенты переноса, определяют, опираясь на натурный эксперимент. При этом, как известно, эти коэффициенты учитывают вклад разных механизмов и не раскрывают реальной физической картины

конкретных процессов и явлений, каждое из которых в определенных условиях может оказаться лимитирующим [17]. Данные модели описывают именно тот конкретный процесс обезвоживания, для которого были поставлены эксперименты по определению коэффициентов переноса.

2 тип – математические модели сушки, построенные на основе механики многофазных систем [7]. Эти модели построены с учетом того, что при различных внешних воздействиях на образец возможно существенно различное поведение фаз материала (различие их плотностей, скоростей, температур, деформаций и т.д.), с одной стороны. С другой стороны, в моделях, как правило, учтены и эффекты взаимовлияния фаз, такие как фазовые переходы, теплообмен, прочность структурного каркаса, капиллярные эффекты. Благодаря этой концепции, может быть сформулирован единый подход к теоретическому исследованию и созданию математических моделей многих процессов, направленных на изменение свойств коллоидных капиллярно-пористых материалов. Континуальные уравнения для гетерофазной среды получают объемным усреднением микроуравнений для макроскопических параметров каждой фазы по представительному объему соответствующей фазы [7]. В публикациях иностранных авторов аналогичный подход опирается на работы [18].

Многофазные модели занимают промежуточное положение в рассматриваемой схеме. Этот подход не моделирует систему пор и структурный каркас, однако содержит достаточно широкий спектр параметров текстуры пористой среды, которые являются определяющими для процессов тепло- и массопереноса, но не требуют введения модельных представлений. К таким «безмодельным» текстурным характеристикам пористой системы относятся, например, изменяющиеся во времени плотность, пористость, удельная межфазная поверхность, объемное содержание свободной и связанной воды и т.д. Например, математическая модель тепло- и массопереноса в ненасыщенных анизотропных коллоидных капиллярно-пористых материалах содержит 9 безмодельных текстурных характеристик [19]. Таким образом, многофазные модели, кроме того, что они позволяют исследовать различные физические механизмы переноса жидкой и газообразной фазы при сушке, еще и более информативны, позволяя при численных расчетах проводить мониторинг распределения полей безмодельных текстурных характеристик в объеме высушиваемого образца. Конечно, алгоритмы и программы расчетов для моделей второго типа существенно сложнее и объемнее, чем для первого.

Научные результаты, которые получены ранее и могут быть получены впредь на основе механики многофазных систем, имеют общефизический интерес. На основе именно этого подхода возможны исследования процессов структурных превращений в материале в реальных физических условиях [19-21]. Это направление исследований, в котором еще много нерешенных вопросов, требует дальнейшего развития. У данного направления есть более сильные перспективы для системного регулирования структурной организации и механических свойств капиллярно-пористых материалов при их сушке и термовлажностной обработке, чем у первого. Математические модели на основе методов механики многофазных систем дают возможность изучать более тонкие механизмы взаимодействия фаз.

Проблемы определения коэффициентов переноса имеются при обоих подходах, но если в Лыковской теории, эти коэффициенты для каждого продукта и режима сушки часто невозможно прогнозировать, в многофазных моделях значения коэффициентов переноса должны носить универсальный характер.

Главное условие развития метода математического моделирования процессов обезвоживания на базе механики многофазных систем – дальнейшие успехи в области физической химии.

3 тип – возможно основа будущего прогресса в области математического моделирования процессов сушки. Этот тип связан с построением и реализацией сопряженных моделей геометрии капиллярно-пористого материала и физики различных явлений, со-

проводящих процесс его термовлажностной обработки. Текстура пористых систем может быть описана с использованием иерархической последовательности моделей, например, включающей следующие уровни [13, 22]:

1. Модель атомно-молекулярной структуры и межмолекулярного взаимодействия.
2. Модель первичных текстурных элементов.
3. Модель кластеров или ансамблей узлов и связей.
4. Модель решетки ансамблей кластеров.
5. Модель пористого тела в виде решетки пор и/или частиц.
6. Модель элемента слоя пористых зерен.

И так далее.

Как указано в [13] на уровнях 2-5 могут быть использованы теории перколяции или компьютерные сетевые модели пористых и корпускулярных сред различных структур (случайные, регулярные и пр. решетки и упаковки) – модели «Pore Network Models» [23-25]. Для описания неупорядоченных структур применяется эффективный метод Вороного-Делоне [26]. Заключительной стадии сушки соответствуют уровни 1-2, где могут быть использованы методы молекулярной динамики или Монте-Карло.

Развитие методов математического моделирования 3 типа сдерживалось и сдерживается до сей поры отсутствием высокопроизводительных вычислительных систем. В настоящее время в связи с внедрением многопроцессорных систем появляется возможность моделировать и пористую структуру на различных уровнях и физические процессы в элементах структуры. Правда, появляются принципиально новые проблемы численной реализации вычислительных алгоритмов, например, связанные с их адаптацией к архитектуре многопроцессорных систем с распределенной памятью [12].

В печати появляются результаты исследований процессов сушки и термовлажностной обработки капиллярно-пористых материалов с использованием готовых коммерческих математических пакетов – программного инструментария ANSYS, FLUENT, COMSOL. Причем они позволяют подойти к проблеме моделирования процессов сушки и термовлажностной обработки материалов на всех трех платформах (в запрограммированных рамках). Как относиться к этим результатам – вопрос пока дискуссионный. Отметим одним штрихом, не касаясь возможностей и проблем работы с пакетами, что их использование разрушает ту сложившуюся триаду (модель-алгоритм-программа), которая работала на новый результат исследования.

Заключение. Развитие математического моделирования процессов сушки сдерживается недостатком знаний о механизмах взаимодействия фаз, а также о структуре материала, изменяющейся во взаимосвязи с процессами тепло- и массопереноса. Как отмечено в работе [27], моделирование процесса сушки капиллярно-пористых тел все еще остается близким к искусству. Математическое моделирование процессов сушки, старт которому в России, Белоруссии, Украине и других странах дали труды большого ученого и человека Алексея Васильевича Лыкова развивается. Если сравнить удельный вес исследований по трем рассмотренным направлениям, то он максимален для работ, использующих модели 1 типа, существенно ниже для моделей 2 типа, и пока мал для 3 типа.

Список литературы

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 320 с.
2. Лыков А.В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
3. Рудобашта С.П. Фундаментальные исследования тепломассообмена при сушке // Труды 2 междунаро. науч. практич. конф. "Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и тепловые процессы СЭТТ-2005)". Т.1. М.: Изд-во ВИМ, 2005. – С.7-17.

4. Рудобашта С.П. Новые российские исследования в области сушки и термовлажностных процессов // Труды 3-го междуна-род. науч. практич. конф. "Современные энерго-сберегающие тепловые технологии (Сушка и тепловые процессы СЭТТ-2008)". Т.1. М., 2008. - С.5-18.
5. Современные подходы к исследованию и описанию процессов сушки пористых тел / Под ред. В.Н. Пармона. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. – 300 с.
6. 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.
7. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. – М. : Наука, 1978. – 336 с.
8. Гринчик Н.Н. Процессы переноса в пористых средах, электролитах и мембранах. – Минск : АНК «Институт тепло-и массообмена» АН Беларуси, 1991. – 251 с.
9. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. М.: Химия, 1982. – 320 с.
10. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Развитие теории и методов расчета динамики сорбции и десорбции // Инженерно-физический журнал. – 2010. Т. 83, № 4. - С. 779-789.
11. Гринчик Н. Н., Акулич П. В., Куц П. С., Павлюкевич Н. В., Терехов В. И. К проблеме неизотермического массопереноса в пористых средах // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, № 6. – С. 129–141.
12. Четверушкин Б.Н. Современные методы математического моделирования // Материалы электронной конференции «Информационно-вычислительные технологии в фундаментальных и прикладных физико-математических исследованиях». IFTAN-2005. URL : http://www.ivtn.ru/2005/physmath/enter/r_pdf/dp05_23.pdf (дата обращения 01.07.2015).
13. Фенелонов В.Б. Элементы моделирования структуры пористых тел, процессов сушки и массообмена в пористых телах // Современные подходы к исследованию и описанию процессов сушки пористых тел / Под ред. В.Н. Пармона. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. – С. 11-89.
14. Mujumdar A.S. Handbook of Industrial Drying. - Marcel Dekker, New York, 1995 (Part 1).
15. Акулич П.В., Темрук А.В., Акулич А.В. Моделирование и экспериментальное исследование тепло- и влагопереноса при СВЧ-конвективной сушке растительных материалов // Инженерно-физический журнал. – 2012. Т. 85, № 5. - С. 951-958.
16. Афанасьев А.М., Конягин И.А., Сипливы Б.Н. Переходные явления тепло- и массопереноса при конвективной сушке капиллярно-пористых материалов // Математическое моделирование. - 2004. Т. 16. № 5. - С. 117-127.
17. Коновалов В.И., Кудра Т., Гатапова Н.Ц. Современные вопросы теории переноса при сушке // Вестник ТГТУ. - 2008. Том 14. № 3. - С. 538-559.
18. 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.
19. Дорняк О.Р. Тепломассоперенос в ненасыщенных коллоидных капиллярно-пористых анизотропных материалах: Автореф. дис... д-ра техн. наук. - Воронеж, 2007. - 32 с.
20. Perré P., Passard J. A Physical and Mechanical Model Able to Predict the Stress Field in Wood over a Wide Range of Drying Conditions // Drying Technology. – 2004. - V. 22, № 1. - P. 27 - 44.
21. Kowalski S.J., Rajewska K. Drying-induced stresses in elastic and viscoelastic saturated materials // Chemical Engineering Science. – 2002. – V. 57. – P. 3883 – 3892.
22. Айлер Р. Химия кремнезема. М.: Мир, 1982. Ч. 1. - 416 с.
23. Salin J.-G. Fiber level modeling of free water behavior during wood drying and wetting // Ciencia y tecnologia. – 2011. V. 13(2). – P. 153-162.

24. Taleghani S.T., Dadvar M. Two dimensional pore network modeling and simulation of non-isothermal drying by the inclusion of viscous effects // International Journal of Multiphase Flow. – 2014. V. 62. – P. 37–44.
25. Surasani V.K., Metzger T., Tsotsas E. Consideration of heat transfer in pore network modeling of convective drying // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. V. 51. - P. 2506–2518.
26. Волошин В.П., Лучников В.А., Медведев Н.Н. Численное моделирование пористых материалов и количественный анализ структуры пор // Современные подходы к исследованию и описанию процессов сушки пористых тел / Под ред. В.Н. Пармона. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. – С. 90-122.
27. Wang Wei, Chen Guohua, Mujumdar A. S. Physical Interpretation of Solids Drying: An Overview on Mathematical Modeling Research // Drying Technology. – 2007. - V.25, №4. - P. 659–668.

УДК 66.047

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА И КИНЕТИКИ СУШКИ ЖИДКИХ
ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ
APPROACHING TO MODELING OF THE KINETICS OF DRYING
OF DISPERSED LIQUID PRODUCTS ON SUBSTRATES**

**Наталья Ц. Гатапова *, Андрей Н. Пахомов **,
Юлия В. Пахомова***
Natalya Ts. Gatapova * Andrew N. Pakhomov **,
Yulia V. Pakhomova*****

**Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,
(e-mail: postmaster@gntzpri.tstu.ru).*

*** Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,
(e-mail: panpost@yandex.ru).*

**** Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,
(e-mail: puvdom@yandex.ru)*

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

Аннотация: Статья посвящена описанию разрабатываемого авторами метода расчета кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках, основанного на совместном решении задач теплопереноса и диффузии в материале с динамически изменяющимся числом слоев, их теплофизических свойств и размеров. Приводится связь дисперсного состава высушиваемого продукта с появлением поверхностных структур в процессе сушки. Отмечено влияние возникающих на поверхности структур на характер термограммы сушки.

Abstract: The article describes the method developed by the authors for modeling the kinetics of drying of dispersed liquid products on the substrates based on the joint solution of problems of heat transfer and diffusion in the material with dynamically varying number of layers, their thermal properties and dimensions. Given the connection of dispersed composition of the dried product with the appearance of surface structures during the drying process. The influence exerted on the contact surface structures on the character of thermal drying.

Ключевые слова: сушка, кинетика, расчет, подложка, слой, термограмма, структурообразование.

Keywords: drying, kinetics, modeling, substrate, layer, thermogram, gelation.

При изучении процессов сушки различных продуктов наибольшую ценность и важность приобретает понимание физической природы процесса и возможность его мате-

матического описания. Как показано в ряде работ [1-3], кинетика процесса сушки жидких дисперсных продуктов и качественные характеристики готового продукта в основном определяются специфическими структурно-реологическими превращениями. Например, в процессе сушки термолабильных материалов химические и структурно-деформационные превращения определяют качественные показатели сухого продукта [1, 8].

Любые явления, происходящие в процессе сушки (например, структурообразование на поверхности, химические реакции, изменения формы и размеров высушиваемого материала, формирование массовых потоков в объеме материала и т.п.), приводят к появлению на термограмме сушки определенных «неклассических» точек или участков (например, точки перегиба или участки монотонного асимптотического роста или падения температуры) [2, 7, 9]. В результате серьезно изменяется вид термограммы сушки. Для выявления особенностей процесса и описания его механизма, кинетика нагрева материала в процессе сушки часто является более важной, чем кинетика удаления влаги [1, 6]. Поэтому вид термограммы зачастую является наиболее информативным с точки зрения понимания физики процесса.

При сушке жидких дисперсных систем на поверхности формируется определенная структура (например, пленка), приводящая к изменению теплофизических свойств поверхности высыхающего материала и, как следствие, оказывающая лимитирующее влияние на процесс испарения, что ярко отражается именно на характере термограммы.

В качестве исследуемых материалов для сушки на подложках нами были выбраны мясо-костная жидкость, жидкая послеспиртовая барда и жидкий пластификатор бетона на основе натриевых солей полиметиленафталинсульфокислот [2, 3]. Основные теплофизические свойства исследуемых жидкостей представлены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства исследованных жидких дисперсных продуктов

Продукт \ Свойства	Плотность, кг/м ³	Вязкость, мПа·с	Влажность, %	Теплоемкость, Дж/кг·К
Мясо-костная жидкость	1012-1100	1,05-1,12	86-90	4100 – 4150
Послеспиртовая барда	1050-1120	1,1-1,15	90-92	4060 – 4120
Жидкий пластификатор	1185	1,12-1,15	80-95	4000 - 4100

На рис. 1 представлены характерные термограммы, формирующиеся при сушке тонких слоев этих жидкостей на подложке в одинаковых условиях [10]. Как видно из рис. 1, характер термограмм для материалов со сходными основными теплофизическими свойствами принципиально отличается. Процесс сушки мясо-костной жидкости (3) очень схож по термограмме с классической сушкой простого капиллярно-пористого тела. Жидкая послеспиртовая барда (2) в процессе сушки ведет себя более сложно. Термограмма не имеет ярко выраженной площадки мокрого термометра. Температура в первом периоде сушки постоянно растет. В районе площадки мокрого термометра на термограмме имеется характерная точка перегиба [2, 9].

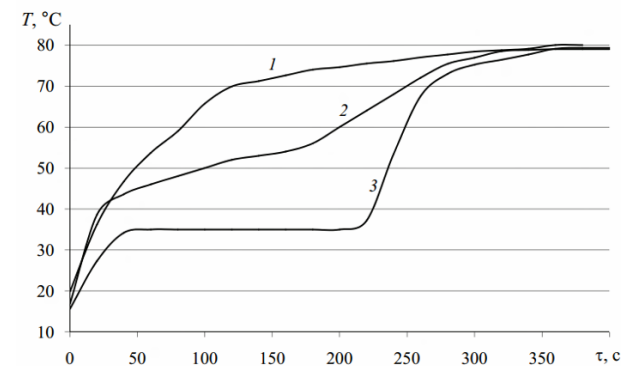


Рисунок 1. Характерные термограммы сушки жидкого пластификатора (1), послеспиртовой барды (2), мясо-костной жидкости (3). Подложка – алюминий, $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $w = 3\text{ м/с}$, толщина слоя 0,5 мм.

Аналогично жидкой послеспиртовой барде в процессе сушки ведет себя жидкий пластификатор (1). При этом на термограмме практически вырождается площадка мокрого термометра. Однако в районе площадки мокрого термометра в первом периоде на термограмме также имеется характерная точка перегиба [10].

Подобный характер термограмм связан с механизмом формирования на поверхности высыхающего продукта определенных структур. Жидкая фаза мясо-костной жидкости в процессе сушки не формирует на поверхности и в объеме тела никаких структур (пленок, агломератов, корок и т.п.). При сушке жидкой послеспиртовой барды на поверхности высушиваемого продукта сразу начинает формироваться тонкая пленка, которая со временем эволюционирует в довольно жесткую корку. При высыхании слоя пластификатора через некоторое время от начала процесса на поверхности формируется эластичная пленка и наблюдается явление пульсации жидкости под пленкой. В процессе высыхания жидкость из-под пленки удаляется с образованием воздушной прослойки. Поверхностная пленка (в режиме закрепления контактной линии на подложке) поднимается вверх, опускается, различным образом деформируется с образованием поверхности сложной геометрической формы [2, 3, 9].

Характер возникновения поверхностных и объемных структур связан с фракционным составом высушиваемого продукта и формой частиц, составляющих дисперсную фазу. Описание явлений самоорганизации подобных структур является весьма сложным, поэтому применительно к нашим задачам практическую ценность имеет поиск критерия оценки возможности самоорганизации частиц заданного продукта в заданных условиях [11-13].

Для математического описания кинетики сушки подобных материалов нами предлагается использование совместных решений задач теплопроводности и диффузии в материале с динамически изменяющимся числом слоев, теплофизических свойств и размеров слоя. Вообще многослойные системы применяются не только для описания процессов теплопроводности (диффузии) в физически многослойных телах, но они могут использоваться для описания процесса в физически однослойном теле, если какие-либо его свойства сильно изменяются по одной или нескольким координатам. Как показал опыт исследования кинетики сушки волокнистых материалов и жидких дисперсных систем на подложках, проводимых на кафедре процессов и аппаратов ТГТУ, наиболее полное физическое приближение задачи к реальным условиям обеспечивает рассмотрение исследуемого тела как многослойного (имеющего, как правило, от двух до четы-

рех слоев) [1-7, 10]. При этом слои могут как появляться, так и вырождаться в процессе расчета.

Покажем алгоритм формирования / вырождения многослойных задач при расчетах кинетики сушки исследуемых материалов [10].

Задачу расчета кинетики сушки мясостойкой жидкости можно рассматривать как двухслойную. Первый слой – диффузионно-непроницаемая подложка. Второй слой – слой жидкости, изменяющий свою толщину в первом периоде сушки. Во втором периоде толщина слоя остатка не меняется. Уравнения для расчета интенсивности испарения в первом периоде, расчет критического влагосодержания представлены в работах [1-4].

Для жидкой послеспиртовой барды разделим процесс сушки на отдельные этапы. На первом этапе (в начальный момент времени) до появления на поверхности жидкости пленки в расчете рассматривается двухслойная задача. Первый слой – диффузионно-непроницаемая подложка, второй слой – слой жидкости, изменяющий свою толщину в процессе высыхания.

На втором этапе, с появлением на поверхности жидкости пленки, в задаче добавляется еще один слой – слой пленки. Задача становится трехслойной. Момент появления этого слоя можно оценить по полученным в работе [2] уравнениям. При этом на термограмме отмечается характерная точка перегиба в первом периоде сушки и выделяется первое критическое влагосодержание, соответствующее этой точке. Как было сказано ранее, слой пленки в процессе высыхания эволюционирует в жесткую корку, под которой остается подслои, схожий по свойствам со слоем пленки [2, 4, 7, 11]. Кинетика формирования слоя корки была исследована в работах [2, 4] и момент начала ее формирования можно рассчитать. Таким образом, формируется еще один слой – слой корки и задача становится четырехслойной. В процессе высыхания жидкая фаза испаряется, слой жидкости уменьшается до полного исчезновения. Таким образом, вырождается один слой. Задача становится трехслойной. Дальнейшее ведение процесса приводит к вырождению слоя пленки в слой корки. Задача становится двухслойной: один слой – подложка, второй слой – слой высохшего материала [8-10].

Процесс сушки жидкого пластификатора можно с определенной степенью допущения рассматривать аналогично процессу сушки послеспиртовой барды. Однако точность описания такого процесса будет не велика вследствие отсутствия на сегодняшний день корректных математических описаний таких явлений в высыхающем слое как пульсации, аналогичные автоколебательным реакциям [12].

Определившись с алгоритмом формирования или вырождения слоев, получив определенные корреляционные зависимости для теплофизических свойств этих слоев совместно решают задачи теплопроводности и диффузии в классической постановке с использованием интервального метода.

Интервальный метод, разработанный под руководством проф. В.И. Коновалова и используемый в большинстве работ его научной школы [1-7, 10], позволяет применять аналитические решения задач теплопроводности (диффузии), осложненные изменением граничных условий, свойств высыхающего продукта, геометрических размеров тела, появлением определенных структур на поверхности и в объеме тела во времени.

Основная идея интервального метода состоит в том, что процесс разбивается по времени на определенные интервалы Δt . Длительность каждого интервала Δt определяется характером изменения граничных условий, свойств высыхающего продукта, геометрических размеров тела, появлением определенных структур в зависимости от температуры, концентрации или по времени процесса. Для решения задачи выделяют первый, предыдущий и последующий интервалы. Для каждого интервала, по предварительно полученным зависимостям, изменяющиеся коэффициенты принимаются кусочно-постоянными. Таким образом, задача теплопереноса для каждого интервала линеаризуется. Для первого интервала задача решается с учетом начальных условий,

заданных в нулевой момент времени. Соответственно, в момент времени Δt , в решении мы получим распределение температуры, заданное в виде функции. Для следующего временного интервала в качестве начального условия принимается распределение температуры, полученное на предыдущем интервале времени в момент равный Δt (т.е. фактически в конце предыдущего интервала).

Основной особенностью применения решений задач теплопроводности / диффузии в рассматриваемой постановке является математическое описание (или хотя бы численная оценка) характеристик формируемых поверхностных структур. Необходима оценка коэффициента уменьшения интенсивности испарения с поверхности в первом периоде и возможный аналитический расчет тепло-физических свойств формирующихся в высыхающем продукте структур.

Одним из перспективных подходов к решению подобного рода задач на сегодняшний день является использование фрактального анализа и выявление корреляций фрактальных параметров с истинными наблюдаемыми явлениями [14-15]. Основным свойством фракталов является самоподобие, создающее возможность генерации кривой или поверхности по заданному алгоритму с заданными параметрами. Как показывает практика, многие природные объекты, образующиеся путем эволюции, также самоподобны и, следовательно, оказываются аналогичны фракталам. Это в равной степени относится и к дисперсным продуктам [16]. Следовательно, применение фрактальных структур дает определенную возможность моделирования реальных объектов.

Задача сопоставления структур, формирующихся на поверхности высыхающих жидких дисперсных продуктов, с определенным видом фрактальных линий или поверхностей, а также корреляции свойств реальных поверхностных структур с фрактальными параметрами является задачей, решаемой авторами в настоящее время.

Список литературы

1. Гатапова, Н.Ц. Кинетика и моделирование процессов сушки растворителей, покрытий, дисперсий, растворов и волокнистых материалов: единый подход : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 : защищена 10.06.2005 / Гатапова Наталья Цибиковна. – Тамбов, 2005. – 554 с.
2. Пахомов, А.Н. Кинетика сушки дисперсий на твердых подложках : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена : 16.03.2001 / Пахомов Андрей Николаевич. – Тамбов, 2000. – 225 с.
3. Пахомова, Ю.В. Кинетика сушки капель жидких дисперсий на диффузионно-непроницаемых подложках: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08: защищена 23.12.2011 : утв. 23.12.2012 / Пахомова Юлия Владимировна. – Тамбов, 2011. – 283 с.
4. Коновалов, В. И. О возможностях использования точных, интервальных и приближенных аналитических методов в задачах тепло- и массопереноса в твердых телах / В. И. Коновалов, Е. Н. Туголуков, Н. Ц. Гатапова // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1995. – Т. 1, №1-2. – С. 75 – 90.
5. К расчету внутреннего тепло- и массопереноса и кинетики сушки и нагрева волокнистых материалов / В. И. Коновалов [и др.] // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – Т. 3, №3. – С. 224 – 236.
6. Гатапова, Н.Ц. О температурных площадках при высокотемпературной кондуктивно-барабанной сушке влажных материалов / Н.Ц. Гатапова, В.И. Коновалов, А.Н. Колиух, А.Н. Пахомов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2004. Т. 10. № 4-1. С. 968-977.
7. Пахомова, Ю.В. Особенности механизма и кинетики сушки капель дисперсий (на примере сушки послеспиртовой барды) / Ю.В. Пахомова, В.И. Коновалов, А.Н. Пахомов // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 70–82.

8. Пахомова, Ю.В. Оценка качества готового продукта при сушке жидких дисперсных веществ / Ю.В. Пахомова, В.И. Коновалов // *Вопр. соврем. науки и практики*. Ун-т им. В.И. Вернадского. – 2011. – № 2(33). – С. 407–412.

9. Пахомов, А.Н. Типы кинетических кривых, получаемых при сушке капель жидких дисперсных продуктов/ А.Н. Пахомов, Ю.В. Пахомова // *Химическая технология*. 2014. № 10. С. 620–623.

10. Пахомов, А.Н. К расчету кинетики нагрева и сушки многослойных дисперсных продуктов на подложках/ А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова//*Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2015. – Т. 21, № 2, – С.279 – 288.

11. Пахомов, А.Н. Возможности самоорганизации дисперсных систем при сушке на подложке / А.Н. Пахомов, Ю.В. Пахомова, Е.А. Ильин // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2012. – Т. 18, № 3, – С.633 – 637.

12. Пригожин, И. Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой/И. Пригожин, И. Стенгерс//М., Прогресс, 1986. – 432с.

13. Пригожин, И. От существующего к возникающему/ М.: КомКнига, 2006. – 296 с.

14. Мандельброт, Б.Б. Фракталы и хаос. Множество Мандельброта и другие чудеса/М., НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 392с.

15. Мандельброт, Б.Б. Фрактальная геометрия природы /М., НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 656с.

16. Ролдугин, В.И. Свойства фрактальных дисперсных систем/М., Успехи химии, №72(11), 2003, С. 1027-1054

УДК 620.3:[537.8:631.365]

РЕЖИМЫ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ REGIMES OF DEHYDRATION IN ELECTROMAGNETIC FIELD

Олег Г. Бурдо*, Сергей Г.Терзиев*,

Валентина Н. Бандура.**

Oleg G. Burdo*, Sergey G. Terziev*, Valentina N. Bandura**

* *Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса*
(e-mail: terma_onaft@rambler.ru).

Odessa national academy of food technologies, Ukraine, Odessa

** *Винницкий национальный аграрный университет, Украина, Винница*
(e-mail: bandura_3@ukr.net)

Vinnitsa National Agrarian University, Ukraine, Vinnitsa.

Аннотация: В работе рассмотрены принципы адресной доставки энергии в процессах теплопереноса. Дана классификация таких технологий. Анализируются бародиффузионные процессы переноса влаги из объема продукта. Установлены механизмы и режимы ламинарной и турбулентной бародиффузии. Введено число энергетического воздействия, которое учитывает эффективность электромагнитного подвода энергии и бародиффузионных процессов переноса влаги из продукта. Проведена оценка энергетической эффективности сушилок трех поколений по числу энергетического воздействия.

Abstract: In current work principles of targeted energy delivery in the processes of heat and mass transfer are reviewed. The classification of such technologies is given. Barodiffusion processes of migration of moisture from product volume are analyzed. The mechanisms and modes of laminar and turbulent barodiffusion are set. The number of energy action, which takes into account the efficiency of the electromagnetic energy supply and processes of barodiffusion transfer of moisture from the product is introduced. An assessment of energy efficiency of dryers of three generation by number of energy action is carried out.

Ключевые слова: Адресный подвод энергии, сушка в электромагнитном поле, бародиффузия.

Keywords: Address energy supply, drying in an electromagnetic field, barodiffusion.

Введение. Одной из ключевых, жизненно важных проблем настоящего времени является обеспечение человечества энергетическими ресурсами. Энергия стала дефицитным и дорогим ресурсом во всем мире, что привело к энергетическому кризису [1-3]. Отсутствие системного подхода к исследованию энерготехнологических проблем, опыта в решении задач эффективного использования энергии усугубляют энергетический кризис [3]. Это в значительной степени касается сушильных технологий. В пищевых и перерабатывающих производствах сушка, как правило, определяет и себестоимость, и качество продукта. Наибольшее распространение здесь получили конвективные способы сушки. Для такого способа сушки характерно серьезное научно-техническое противоречие. Стремление достичь высоких коэффициентов теплопереноса требует повысить скорость теплоносителя, т.е. его расход. Однако при этом пропорционально растут и потери теплоты с отработавшим сушильным агентом, что в условиях энергетического кризиса нежелательно. Принятая в странах постсоветского пространства практика сушки зерна смесью топочных газов и воздуха не исключает возможность загрязнения продукта канцерогенными веществами. Поэтому в условиях энергетического кризиса, стабильного роста стоимости энергоносителей энергетические и экологические концепции сушки требуются пересмотреть.

Целью работы является совершенствование теплотехнологий сушки путем модернизации традиционных схем и разработки принципиально новых технологий обезвоживания гарантирующих безопасность продукта при существенном снижении энергетических затрат.

Общая научно-техническая идея разработок выражается в использовании принципов адресной доставки энергии к продукту, к его элементам. Объектом исследований стали зерносушильные установки, в которых кроме серьезных энергетических проблем не решены требования по экологической безопасности продукта. Последовательно проведена модернизация базовых конвективных сушилок, предложены принципиально новые технические решения.

В работе впервые поставлена и решается задача организации технологий направленного энергетического действия (НЭД). Показано, что энергетика является не только характеристикой, основным результатом технологии, но и инструментом организации технологии, средством управления кинетикой процессов переноса в элементах различных систем. Развитие технологий должно идти по пути направленного, селективного подвода энергии к тем элементам сырья, которые требуют энергетического воздействия. При этом термолabile элементы сырья должны минимально подвергаться энергетическому воздействию. Особое внимание следует уделять микро- и наноразмерным структурам сырья. Эти элементы в традиционных технологиях практически не рассматриваются. Определены перспективы НЭД - технологий.

Классификация НЭД- технологий. НЭД – технологии – это технологии направленного, селективного действия на элементы сырья и биологические объекты. НЭД-нанотехнологии отличаются тем, что направление энергетического действия – наномасштабные объекты, микро- и наномасштабные структуры. И в первом, и во втором случаях задачей селективного энергетического воздействия является управление полями, сложение направлений силовых воздействий слабых полей, организация потока из микро- и нанокapиллярной структуры, формирование состава этих потоков, направление силовых воздействий на оболочки клеточной структуры микробиологических объектов и т.п. [4].

Для пищевых систем снижение количества потребленной энергии не только повысит энергетический КПД процесса и снизит себестоимость продукта, но и уменьшит уро-

вень термического воздействия на продукт. Это приведет к сохранению термолабильных и биологически активных компонентов пищевого сырья. Например, пищевые продукты и кулинарные изделия, полученные по НЭД, станут отвечать требованиям функционального питания. Эффективность пищевых технологий (производительность, удельная энергоёмкость, качество готового продукта, степень извлечения ценных компонентов сырья и пр.) в значительной степени определяется возможностями воздействия на оболочки клеток, микроорганизмы, поры, капилляры и пр. Ставится задача найти эффективные принципы, подходы для локальных действий, направленных на интенсивные, низкоэнергетические операции с пищевым сырьем, и, даже, с отдельными наноразмерными элементами этого сырья. Важно создать фундаментальные основы эволюционных нанометрических явлений и процессов. Один из путей в этом направлении – это НЭД - технологии. С позиций сегодняшнего дня [4, 5] можно так прогнозировать развитие НЭД - технологий обезвоживания сырья (рис.1). Принципы удаления влаги на основе электромагнитной энергии не всегда отвечают смыслу термина «сушка». Поэтому в работе используется термин более широкого смысла – обезвоживание.

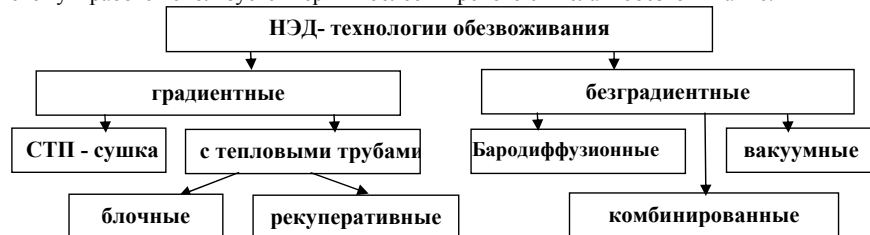


Рис.1. Классификация НЭД- технологий обезвоживания.

Сушка смешанным теплоподводом (СТП) активно развивается харьковской научной школой [6]. Использовать возможности тепловых труб (ТТ) в зерносушильной технике предложено в ОНАПТ [7]. На первом этапе был создан утилизатор теплоты на тепловых трубах. Оригинальная компоновка аппарата обеспечила режим «самоочищения» теплопередающей поверхности. Производственные апробации теплоутилизатора в схемах сушки растворимого кофе, сахара и зерна подтвердили высокую эффективность аппарата, обеспечивалось снижение расхода топлива от 10 до 25% [7]. На втором этапе ставилась задача создания зерносушильной техники 2 поколения, обеспечивающей экологическую безопасность зерна при существенном снижении расхода топлива. В основе разработок принцип адресной доставки энергии к продукту и следующие гипотезы.

Гипотеза 1. Разделение теплоносителя на два потока, один из которых циркулирует по контуру «тепловой генератор – зона нагрева зерна – тепловой генератор» с помощью конденсаторов ТТ нагревает зерно перед сушкой, после чего в калорифере из ТТ греет воздух до температуры сушильного агента и возвращается в теплогенератор, а другой поток – горячий воздух из калорифера продувается сквозь зерновой поток, увлажняется и выбрасывается в атмосферу, позволит до 40% теплоносителя пустить на рециркуляцию, что существенно снизит потери энергии с отработавшим теплоносителем. Конструкция зоны нагрева зерна на основе ТТ обеспечивает экологическую безопасность зерна, организацию равномерного подвода энергии к продукту и эффективное его перемешивание и согласует темпы процессов тепло- и массопереноса. Тепловой КПД такой блочной зерносушилки повышается до 60%.

Развитие эта техническая идея получила в гипотезе 2, что привело к конструкции рекуперативной зерносушилки.

Гипотеза 2. Если снять с воздуха задачу теплоносителя, а оставить ему функцию только диффузионной среды, организовать адресный подвод энергии к потоку зерна

системой ТТ, испарители которых обогреваются топочными газами (или любым другим источником энергии), то можно полностью обеспечить предварительный нагрев зерна за счет энергии выбросов из зоны сушки, сократить время и энергетические затраты и гарантировать получение безопасного продукта.

Первые две гипотезы обуславливают переход на принципиально новые конструкции шахтных зерносушилок, по сути, речь идет про сушилки 2 поколения.

Реализация 2 гипотезы позволит повысить тепловой КПД шахтной зерносушилки до 80 – 85% [7]. На этом возможности градиентных принципов сушки по снижению энергетических затрат исчерпываются.

Сушилки 3 поколения требуют принципиально новых подходов. Формулируется 3 гипотеза.

Гипотеза 3. Применение при обезвоживании зерна адресной доставки энергии непосредственно к влаге в объеме зерновки позволит инициировать мощный, специфичный гидродинамический поток, который возникает при взаимодействии электромагнитного поля с полярными молекулами влаги в капиллярах. Это приведет к удалению воды не только в паровой фазе, а туманом, существенно повысит интенсивность массопереноса за счет резкого снижения внутреннего диффузионного сопротивления, уменьшению энергетических затрат и времени процесса обезвоживания.

Третья гипотеза связана с радикально новыми способами организации процесса обезвоживания, с привлечением принципов наноэнерготехнологий для развития бародиффузионных процессов [4, 8].

Эффект и механизм бародиффузии. Исходя из термодинамической схемы нанопроцесса [8, 9] механизм комбинированного нано- и макропереноса влаги из волокнистой структуры в поток поясняется схемой (рис.2).

В отличие от традиционных способов сушки анализируемые процессы характеризуются сопряженным протеканием процессов с разными по своей природе движущими силами [4]. Во-первых, имеет место чисто диффузионный процесс (J_D), который зависит от коэффициента диффузии D_c соответствующей движущей силы. Далее развивается конвективная диффузия (поток J_K), интенсивность которой определяется коэффициентом массоотдачи β . При этом, наибольшие диффузионные сопротивления будут для нано- и микрокапилляров сырья, где наиболее стесненные условия.

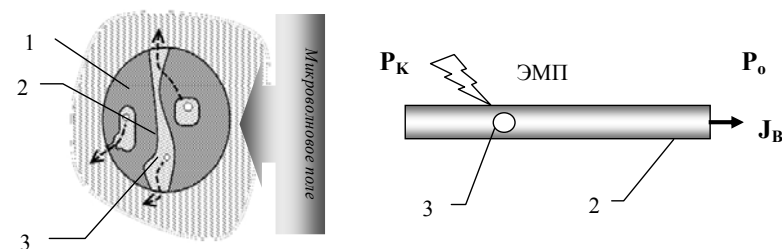


Рис. 2. Механизм и гидравлическая модель бародиффузии:

1 – зерно; 2 – капилляр; 3 – паровой пузырек.

В условиях действия микроволнового поля (ЭМП) параллельно движению массовых потоков J_D и J_K возникает еще один поток J_B (рис.2). Это специфический, гидродинамический поток, который возникает от того, что в глубине капилляра часть воды переходит в пар, что приводит к росту давления внутри капилляра (P_K). Это бародиффузия. Давление, которое обеспечивает «запуск» бародиффузии $P_{БД} = P_0 + P_K$. При достижении давления $P_{БД}$ происходит выброс жидкости и пара из глубины зерновки. Частота вы-

бросов и количество функционирующих капилляров увеличивается пропорционально электрофизическому воздействию. Массовый поток J_B зависит от разности давлений в капилляре P_K и среды P_O , а также от коэффициента массоотдачи β' , который может существенно отличаться от β .

$$J_B = \beta' \cdot (P_K - P_O) \quad (1)$$

Поток, возникающий под действием электромагнитного поля, турбулизирует приграничный слой, сопротивление массопереносу может быть на порядок ниже, чем в традиционных схемах массоотдачи. Соответствующее давление в i -м капилляре рассчитывается по классическому уравнению гидравлической сети с учетом сил поверхностного натяжения, которые могут быть значительными в микро- и нанокapиллярах. Следовательно, давление в капилляре определяют параметры: d_i, l_i – диаметр и – длина капилляра; w – скорость жидкости в капилляре; ρ – плотность жидкости; ξ – местные сопротивления; σ – силы поверхностного натяжения; λ – коэффициент гидравлического трения; g – ускорение свободного падения.

$$P_{K_i} = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \left[\frac{\lambda \cdot l_i}{d_i} + \sum \xi \right] + \rho \cdot g \cdot l_i + \frac{\sigma}{d_i} \quad (2)$$

Краевая задача массопереноса в условиях микроволнового поля является сопряженной для потоков J_D, J_K и J_B (рис.3).

Подробно особенности моделирования по (рис.3) рассмотрены в [4].

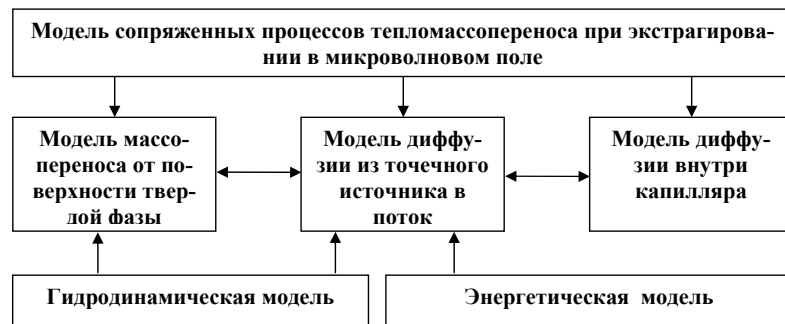


Рис.3. Классификация моделей при обезвоживании в СВ-поле.

Бародиффузионные эффекты в капиллярнопористых системах способны качественно изменить характер линий сушки (рис.4). Это подтверждено экспериментально (рис.5).

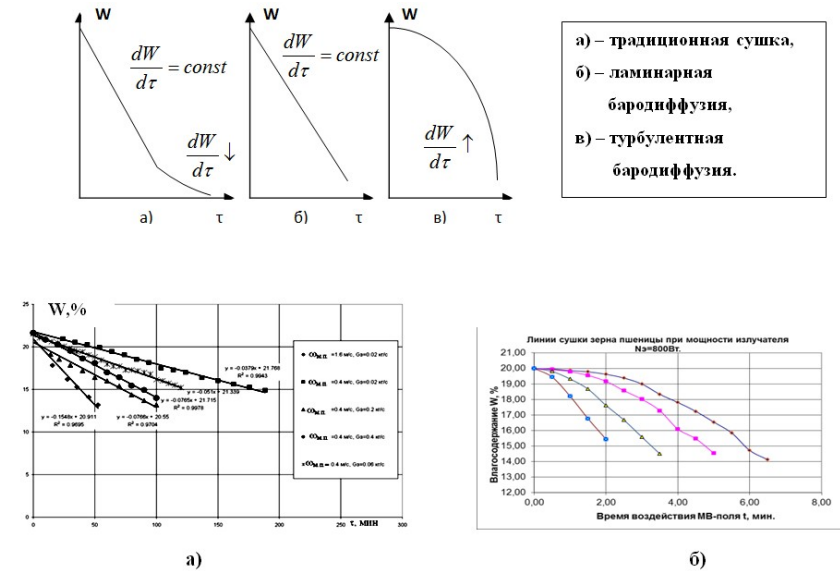


Рис.4. Линии удаления влаги в рекуперативной (а) и в микроволновой (б) установках.

Если в традиционной сушке различают периоды постоянной и убывающей скорости (рис.4, а), то в технологиях направленного энергетического действия наблюдаются режимы, в которых скорость удаления влаги может оставаться неизменной, и, даже, повышаться. В рекуперативной установке при согласовании режимных параметров комплекс $(dW/d\tau)$ остается постоянным (рис.5). То же самое характерно и для условий ламинарной бародиффузии, когда гидродинамический поток из объема зерновки достигает ее поверхности, что обеспечивает постоянную скорость удаления влаги. В режиме турбулентной бародиффузии наблюдается стабильный рост комплекса $(dW/d\tau)$. Объяснить этот парадокс можно тем, что под действием электромагнитного поля последовательно будет увеличиваться доля гидродинамического потока из объема зерновки, т.е. часть потока, который выходит в виде тумана. В первые минуты поверхностная влага как бы экранирует объем зерновки от электромагнитного поля, идет удаление влаги с поверхности, бародиффузионный поток минимальный. На следующем этапе по мере уменьшения количества поверхностной влаги растет доля и мощность потока из объема зерновки. Так можно объяснить характер линий удаления влаги, типичный пример которых приведен на рис.5,б [10, 11].

Режимы турбулентной бародиффузии ломают сложившиеся методы оценки энергетической эффективности процесса обезвоживания. Параметром оценки всегда считался тепловой КПД, который представлялся отношением физически необходимой энергии на удаление влаги к энергии, затраченной в процессе.

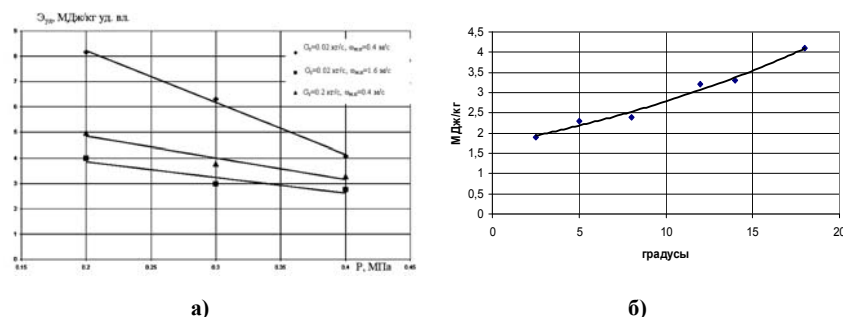


Рис.5. Удельные затраты энергии на удаление влаги в установках 2 (а) и 3 (б) поколений.

Для рекуперативной установки величина удельных затрат энергии определяется расходом зерна (G), скоростью движения диффузионной среды (воздуха) сквозь зерновой слой (ω) и давлением (P) в испарительно-конденсационном теплопередающем модуле (рис.6,а). Видно, что достигнуты режимы, в которых тепловой КПД составляет 85%.

Для установок 3 поколения, реализующих бародиффузионные эффекты, достигнуты значения удельных затрат энергии 1.9 МДж на 1 кг удаленной влаги (рис.6,б), что ниже, чем физически необходимая энергия для перевода воды в пар. Если ламинарная бародиффузия характеризуется привычными для классической задачи массопереноса понятиями - внутреннее и внешнее диффузионные сопротивления, то в режиме турбулентной диффузии нивелируются такие понятия, как пристенный пограничный слой и соответствующие диффузионные сопротивления. Если ламинарная бародиффузия интенсифицирует только внутридиффузионный массоперенос, то турбулентная бародиффузия интенсифицирует и внутри – и внешедиффузионный массоперенос. Возникает задача количественной оценки энергетической эффективности процесса удаления влаги, приемлемой и для режимов бародиффузии.

Число энергетического действия. Последние годы характеризуются бурным развитием сушильной техники с электромагнитными источниками энергии. Вместе с тем, совершенствование разработок ведется на основе инженерной интуиции. Уровень понимания процессов взаимодействия продукта и электромагнитных волн значительно ниже представлений электрофизических явлений в генераторах электромагнитного излучения. Техника электромагнитных генераторов опередила теорию тепломассопереноса в процессе сушки при электромагнитном подводе энергии. Объясняется это тем, что сами генераторы (особенно микроволнового диапазона) являются элементами военной техники, их совершенствование и проводилось под заказы этой отрасли. Если учесть, что прикладные проблемы даже традиционной сушки не доведены до общепризнанных инженерных методов проектирования, то специфика сушки при электромагнитном подводе энергии практически не изучена. Однако успешное моделирование процессов сушки с ЭМП может дать мощный импульс широкого внедрения перспективной техники в пищевые технологии. Для учета влияния электромагнитного поля при сушке сырья автором [4] предложено число энергетического действия (число Бурдо), которое выражается отношением энергии, затраченной на организацию процесса (Q_1), к той энергии, которая физически необходима для перевода в пар всей удаляемой из сырья влаги (Q_T). Это число справедливо и для традиционных сушилок, и для установок 2 и 3 поколений. Для установок с ЭМП число энергетического действия будет иметь вид

$$Bu = (Q_1 / Q_T) = N (Mr)^{-1} \quad (3)$$

Соотношение между энергией излучения (N) и той энергией, которая необходима для аналогичных процессов в традиционных технологиях определяет как энергетическую эффективность оборудования, так и режим массопереноса. Величина Q_T определяется массовым расходом удаляемого пара (M) и удельной теплотой фазового перехода (r). До определенных значений числа Bu имеют место ламинарные режимы движения жидкости в капиллярных каналах твердой фазы. Число Bu может показывать условия перехода к более интенсивному массопереносу, который логично назвать режимом турбулентной бародиффузии.

Это число удачно обобщило базы экспериментальных данных в процессах обезвоживания и экстрагирования. Представляется, что число Bu может ответственно характеризовать энергетическую специфику всех задач, применяемых НЭД – технологии. Оно позволяет сравнивать энергетические показатели сушилок разных поколений.

Таблица 1. Сравнение энергетических показателей сушилок разных поколений

Принцип удаления влаги	МДж/кг удаленной влаги	Тепловой КПД, %	Число Бурдо
Базовые конвективные	6 - 8	0,3 - 0,38	2,6 – 3,5
Зерносушилки			
- базовые 1 поколения	4,26 – 6,3	0,36 – 0,5	1,85 – 2,7
- модернизированные 1 поколения	3,8 - 5,1	0,45 – 0,6	1,67 - 2,22
- блочные 2 поколения	3,54	0,65	1,54
- рекуперативные 2 поколения	2,7 - 2,88	0,8 – 0,85	1,18 - 1,25
- 3 поколения (достигнутый результат)	1,29	-	0,56
- 3 поколения (ожидаемый результат)	0,2	-	0,09

Результаты табл.1 позволяют сделать 2 вывода. Во-первых, число Bu логично оценивает энергетику сушилок, реализующих разные принципы обезвоживания. Во-вторых, число Bu иллюстрирует перспективу установок 3 поколения.

Эффективность извлечения влаги из твердой фазы зависит от согласования продолжительности и мощности импульсов ЭМП. При малой продолжительности может не успеть сформироваться поток влаги из нано- и микрокапилляров. При большой продолжительности и мощности возможен нежелательный перегрев твердой фазы. При более тонкой организации энергоподвода целесообразно менять параметры ЭМП во времени в соответствии с мгновенными значениями диэлектрических характеристик твердой фазы (наличия и количества в каналах влаги). Величину ЭМП следует согласовывать и с диаметрами каналов – в более мелких каналах требуется больший перепад давлений для возникновения бародиффузионного потока.

Выводы. Локальное действие на наномасштабные элементы пищевого сырья позволяют дать принципиально новые подходы организации процессов в АПК. Развивается новое научное направление в пищевых нанотехнологиях – управление процессами переноса на границе фаз нанометрических пищевых структур [4]. Инструментом такого управления может стать энергетическое воздействие. Такое направление названо «НЭД - технологии», т.е. технологии направленного (селективного) энергетического действия на элементы сырья. Подраздел направления – нанозерготехнологии, технологии адресной доставки энергии к наномасштабным элементам пищевого сырья.

Мощным средством инициирования возникновения нанокинетики является импульсное электромагнитное поле. Именно в условиях ЭМП представляется возможность организовать направленный, локальный подвод энергии к полярным молекулам пищевого сырья, т.е. реализовать НЭД- технологии.

Список литературы

1. Energy intensities, EROIs, and energy payback times of electricity generating power plants. Energy Volume 52, 1 April 2013, pp. 210 – 221.
2. Gromadzki, G. Energy game : Ukraine, Moldova and Belarus between the EU and Russia /G. Gromadzki, W. Konończuk; Stefan Batory Found. – Warsaw: Stefan Batory Found., 2007.– 47 p
3. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244с.
4. Бурдо О.Г., Пищевые нанотехнологии – Херсон, 2013 – 294с.
5. Рынок нано: от нанотехнологий к нанопродуктам /Г.Л.Азоев [и др.]; под ред. Г.Л.Азоева.- М.: БИНОМ, 2011. - 319с
6. Потапов В.А., Повышение энергоэффективности сушки виноградных выжимок в массообменном модуле с кондуктивным подводом теплоты //Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій – Одесса: 2013. – Вип. 43 – Том 2. – с. 179-184.
7. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368с.
8. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях //Инженерно-физический журнал. Минск, т.78, № 1.-2005. - С.88-93.
9. Burdo O.G. Nanoscale effects in food-production technologies // Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2005.- Vol.78, Issue 1.- P.90-96.
10. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. Электромагнитные технологии обезвоживания сырья /Problemele energeticii regionale, Chisinau, №1 (18), 2012.- pp.69-79.
11. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Ружицкая Н.В., Макиевская Т.Л. Процессы переработки кофейного шлама. – Киев: ЭнтерПринт, 2014.- 228 с.
12. Бурдо О.Г. Нанотехнологии. Флагманские, перспективные и фундаментальные проекты в АПК //Наук. праці Од. націон. акад. харчових технологій. – Одеса: 2006. – Вип.28, Т2. – с.242-251.

УДК 631.812.12

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРОДУКТА, ДОГРАНУЛИРУЕМОГО ОКАТЫВАНИЕМ ПРИ СОВМЕЩЕННОМ ПРОЦЕССЕ СУШКИ, КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СВЯЗЫВАНИЯ ВОДЫ КОМПОНЕНТОВ В КРИСТАЛЛОГИДРАТЫ (ТЕХНОЛОГИЯ FATTENING)
CALCULATION OF THE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION DYNAMIC, OF THE PRODUCT, OVERGRANULATED BY THE COMBINATION OF DRYING, CRYSTALLIZATION, AND BINDING OF THE WATER INTO CRYSTALLOHYDRATES (FATTENING TECHNOLOGY) PROCESSES

Ю.А. Таран

Y.A.Taran

Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва
 (e-mail: aj_@mail.ru)

Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies, Russia, Moscow

Аннотация: Fattening – процесс послойного нанесения исходного продукта с компонентами (компонентом) или без на поверхность гранул внешнего ретурна, при одновременной сушке получающихся гранул потоком горячего воздуха и (или) связыванием воды в кристаллогидраты, реализуемый по технологии окатывания. Технология использовалась нами для: придания поверхности требуемых свойств перед капсулированием, упрочнения гранул, введения добавок, создания многослойных гранул с управляемым выделением компонентов, для укрупнения грансостава и других. Во всех случаях важно знать динамику изменения грансостава.

Abstract: Fattening – is the process of layering an initial product with or without other component(s) on the surface of the external retourgranules, while simultaneously drying the resulting granules in a flow of hot air and (or) binding of water in crystallohydrates implemented by nodulizing technology. We used this technology to: make the surface of required properties before encapsulation, harden the granules, create multi-layer granules with controlled release of components, enlargen granules and others. In all cases it is important to know the dynamics of granulometric composition.

Ключевые слова: гранулирование, грануляторы, грануляционные башни

Keywords: granulation, granulator, granulation tower

На практике для догранулирования целесообразно использовать аппараты барабанного или тарельчатого типа. Первые – предпочтительны и экономически оправданы (при производительности порядка 30 т/час, по сравнению с примерно 10 т/час у тарельчатых аппаратов). Вторые позволяют получить более высокое качество покрытия и обеспечить практически безретурный процесс, благодаря сегрегирующему действию тарелки.

Для определения изменения грануляционного состава в результате процесса догранулирования нами получено уравнение:

$$\frac{1}{(1+\lambda)\tau} = F_z(m) - \frac{1}{\tau} F(m) + \int_0^{m'} \bar{v}(m) \frac{dF(m')}{dm'} dm' - \bar{v}(m) \frac{dF(m)}{dm} m = 0 \quad (1)$$

где $F_z(m)$, $F(m)$ – функции распределения по массе гранул исходного ретурна и иско-

мая, $\lambda = \frac{G_{pn} a_n}{G_z}$ – степень догранулирования исходного ретурна, G_z , G_{pn} – массовые расходы исходных гранул, и суспензии догранулирующего порошка соответственно, кг/ч; a_n

– концентрация догранулирующей смеси, $\bar{\tau}$ – среднее время пребывания гранул в аппарате, ч,
 $\bar{v}(m) = \frac{1}{m} \frac{dm}{d\tau} [c]^{-1}$ – безразмерная скорость роста гранулы.

Дифференцируем уравнение (1) по (m). Получим уравнение расчета плотности распределения для выхода процесса догранулирования на стационарное распределение по массе:

$$\frac{1}{(1+\lambda)\tau} f(m) - \frac{1}{\tau} f(m) - m \frac{d}{dm} [\bar{v}(m) f(m)] = 0 \quad (2)$$

Для всего распределения ($0 < m < \infty$) $Fr(m) \rightarrow 1$; $F(m) \rightarrow 1$; $\frac{dF(m)}{dm} \rightarrow 0$, получим:

$$-\frac{\lambda}{1+\lambda} \cdot \frac{1}{\tau} + \int_0^{\infty} \bar{v}(m) f(m') dm' = 0 \quad (3)$$

Определим безразмерную скорость роста массы гранулы как:

$$\bar{v}(m) = \frac{1}{m} \frac{dm}{d\tau} = \frac{1}{m^{1/3}} \frac{dm^{1/3}}{d\tau} = \frac{K}{m^{1/3}} \quad (4)$$

Подставим (4) в (2) и получим:

$$\frac{1}{(1+\lambda)\tau} f(m) - \frac{1}{\tau} f(m) - Km \frac{d}{dm} \left(\frac{f(m)}{m^{1/3}} \right) = 0 \quad (5)$$

а из уравнения баланса по всему распределению $0 \leq m \leq \infty$ имеем:

$$-\frac{\lambda}{1+\lambda} \cdot \frac{1}{\tau} + K \int_0^{\infty} \frac{1}{m^{1/3}} f(m') dm' = 0 \quad (6)$$

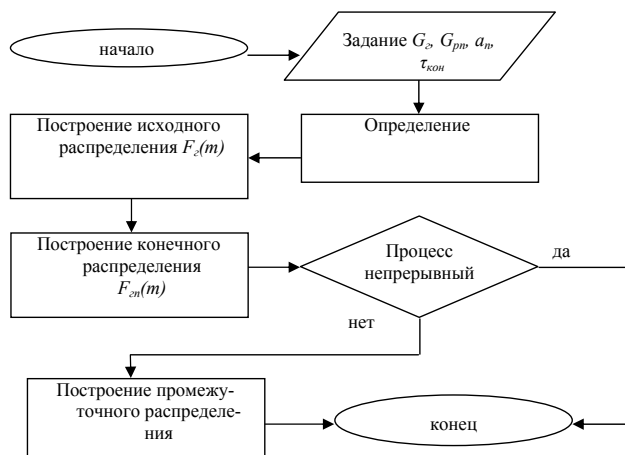


Рисунок 1. Блок-схема решения задачи

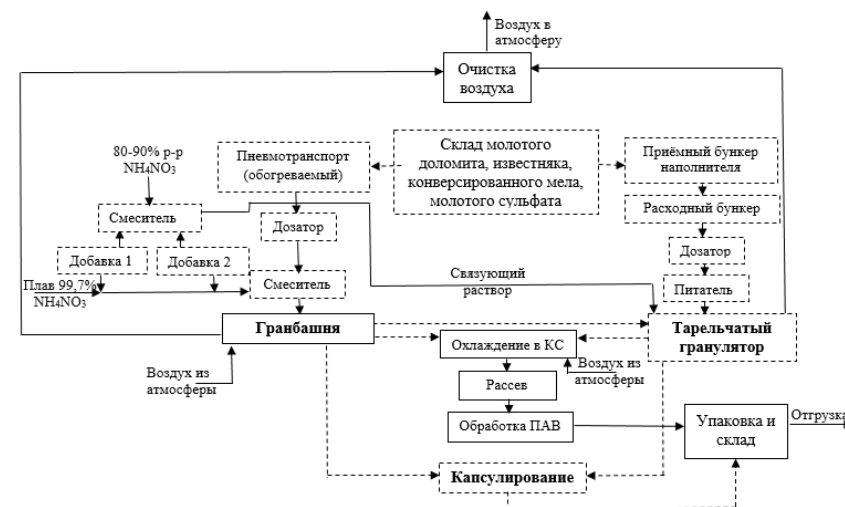


Рисунок 2. Схема реконструкции существующего производства приллированной АС под выпуск АС повышенного качества:

———— существующие блоки; - - - - - реконструируемые блоки

УДК 66.047

КИНЕТИКА СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ-НАГРЕВА DRYING KINETICS OF PARTICULATE MATERIALS COMBINED METHOD USING MICROWAVE HEATING

Д.С. Слижук*, П.В. Акулич**
 D.S. Slizhuk*, P.V. Akulich**

*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Академии наук Беларуси, Беларусь, Минск
 (e-mail: slizhuk@itmo.by).

**Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Академии наук Беларуси, Беларусь, Минск
 (e-mail: akul@hmti.ac.by).

Аннотация: Обсуждаются результаты экспериментальных исследований, устанавливающих влияние режимных параметров на кинетику процесса сушки дисперсных материалов при нагреве с помощью СВЧ-излучения при повышенном давлении и последующим сбросом давления.

Abstract: The paper discusses the results of experimental study specifying the influence of the operating parameters on the drying kinetics of disperse materials with microwave-radiation heating at an elevated pressure and followed the pressure relief.

Ключевые слова: тепло- и влагоперенос; сушка; кинетика сушки; дисперсные материалы; нагрев с помощью СВЧ-излучения.

Keywords: heat and moisture transfer; drying; drying kinetics; disperse materials; microwave-radiation heating.

В последнее время возобновился интерес к комбинированному термомеханическому способу сушки материалов (сбросом давления). Использование способа сушки путем нагрева материала под давлением с последующим сбросом давления при определенных условиях позволяет увеличить интенсивность процесса без ухудшения технологических свойств материала.

При термомеханическом способе влажный материал предварительно прогревается в герметичной камере, где при этом происходит рост давления. При быстром сбросе давления из камеры за счет аккумулированного тепла происходит активное парообразование в объеме материала. Молярный поток пара механически выбрасывает часть влаги в виде частиц жидкости (капель), в результате чего снижаются затраты энергии на удаление влаги. Эффект термомеханического удаления влаги из материала может реализовываться и при импульсно-вакуумной сушке, а также при сушке с микроволновым нагревом влажного материала. Первоначально этот способ был использован для обезвоживания и измельчения угля [1].

Положительные показатели описанного метода наблюдались при сушке крупномерной древесины в экспериментальных условиях [2, 3]. В работе [4] методом численного моделирования исследовалось влияние параметров процесса на неизоэнтальпический влаготермический перенос в цилиндрическом образце в условиях теплового и вакуумного воздействия.

Практический интерес представляет также возможность использования совмещенной технологии сушки и измельчения при подготовке сорбентов, использующихся в дисперсном виде. Комбинация метода сброса давления с СВЧ-нагревом материала позволяет заметно сократить время сушки при сохранении качества материала. Промышленное использование этой технологии сдерживается из-за отсутствия данных об эффективности ее применения для дисперсных материалов и методик определения оптимальных режимных параметров технологического процесса.

Для исследования комбинированного метода сушки с использованием сброса давления и СВЧ-нагрева была создана лабораторная установка и разработана методика экспериментальной работы.

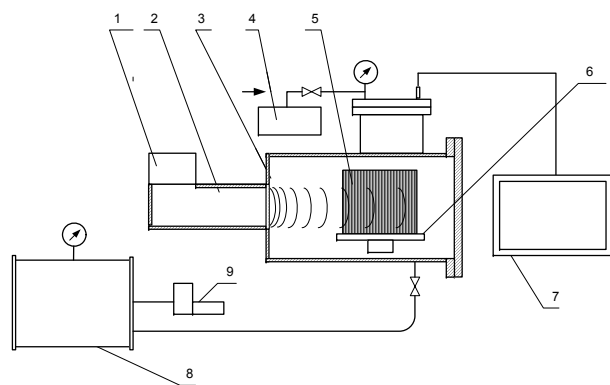


Рис. 1. Схема экспериментальной лабораторной установки УСДМ:

1 – магнетрон, 2 – волновод, 3 – камера сушки, 4 – компрессор, 5 – контейнер с дисперсным материалом (цеолитом), 6 – подставка с электроприводом, 7 – автоматическая система сбора данных с использованием ПК, 8 – ресивер, 9 – вакуумный насос.

В качестве высушиваемого материала использовался цеолит, исследования также проводились с верховым торфом со степенью разложения 20 – 25% и начальной влажностью 70%, гидролизным лигнином ТУ 100145188004-2006 ВУ влажностью 29%.

Исследование процесса сушки дисперсных материалов комбинированным способом проводилось на лабораторной установке УСДМ, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Основой установки является герметичная сушильная камера, в которой размещается исследуемый образец материала. Контейнер для дисперсного материала представляет собой керамическую емкость с отверстиями в дне для выхода воды, которая удаляется из материала в процессе сброса давления в жидком виде. Контейнер размещается на вращающейся подставке с электроприводом.

В камеру, имеющую радиопрозрачное окно из кварцевого стекла, волноводом подводится СВЧ-излучение от магнетрона. Камера снабжена системой подачи сжатого воздуха с автоматической поддержкой заданного давления. Для осуществления сушки методом сброса давления установка имеет систему вакуумирования, включающую вакуумный насос и ресивер. Установка позволяет нагревать образец под давлением до 0,4 МПа и осуществлять сброс давления в камере до величины – 0,085 МПа. Нагрев образца производится с помощью источника СВЧ-излучения частотой 2450 МГц и мощностью 1 кВт, частота вращения подставки составляет 6 об/мин.

Установка снабжена системой контроля и автоматического сбора данных показателей процесса нагрева и сушки. Основные показатели, позволяющие контролировать и управлять процессом сушки, являются температура материала и давление в камере сушки.

Предварительно взвешенный образец дисперсного материала в контейнере размещался на подставке в камере. Сушка образца производилась в осциллирующем режиме в течение нескольких циклов. В каждом цикле образец материала нагревался СВЧ-излучением до температуры кипения воды (~135 °С) при давлении 0,350 МПа. Затем осуществлялся сброс давления в камере сушки до величины – 0,085 МПа.

Длительность нагрева в каждом цикле определялась предварительными экспериментами, так как на них влияет ряд факторов: масса, влажность и температура образца.

В качестве образцов дисперсного материала использовался цеолит с диаметром гранул 4 мм, длиной 5 – 10 мм, начальной влажностью $W_n = 25\%$; лигнин с $W_n = 29,6\%$; торф – $W_n = 71\%$ и торф с начальной влажностью $W_n = 50\%$.

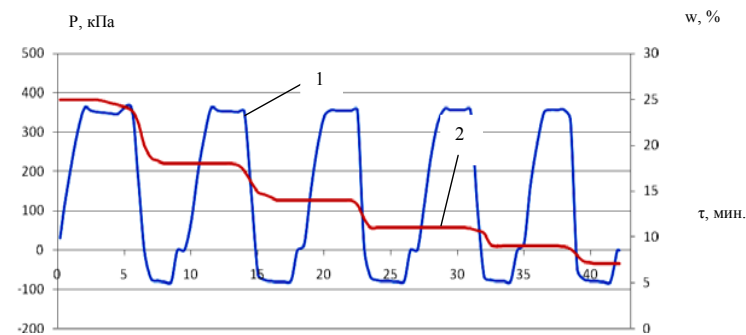


Рис. 2. Процесс комбинированной сушки цеолита:

1 – величина давления в камере, 2 – влажность материала

На рис. 2 представлены экспериментальные данные по комбинированной сушке цеолита. Как следует из приведенных данных процесс сушки состоял из пяти циклов, каж-

дый из которых состоял из следующих стадий: подъем давления до 350 – 370 кПа, СВЧ-нагрев до температуры 130 – 135 °С, сброс давления до величины – (75 – 85) кПа, выдержка в течение 5 – 7 минут, подъем давления до атмосферного. Для других исследованных материалов показатели процесса примерно такие же, изменялось только время нагрева образца материала в зависимости от его влажности. Чем выше влажность материала, тем большее время требуется для СВЧ-нагрева образца до температуры кипения воды при давлении в камере 350 – 370 кПа. Удаление влаги по циклам сушки (кривая 2) неравномерное с постепенным уменьшением количества удаляемой влаги, что связано со снижением влажности материала в процессе комбинированной сушки.

Для определения оптимального количества циклов нагрева и сброса давления при сушке материала проводились исследования влияния количества циклов на интенсивность сушки. Результаты исследований представлены на рис. 3.

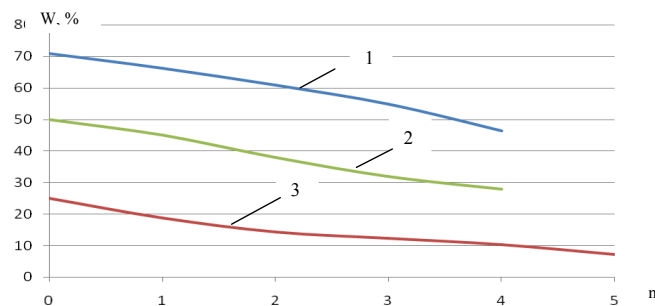


Рис. 3. Снижение влажности торфа различной начальной влажности и цеолита в зависимости от количества циклов комбинированной сушки: 1, 2 – торф, 3 – цеолит

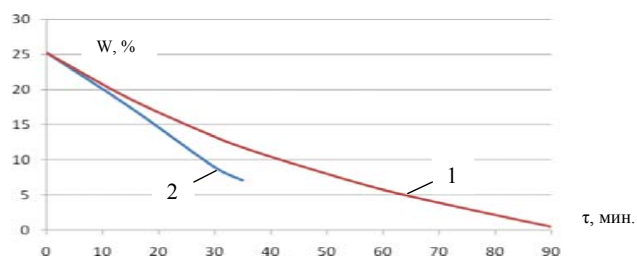


Рис. 4. Скорость сушки цеолита при конвективном и комбинированном методах сушки: 1 – конвективным методом, 2 – методом комбинированной сушки с СВЧ-нагревом

Как видно из приведенных данных, на первых циклах процесса удаляется больше влаги, чем на завершающих. Это можно объяснить тем, что при высокой влажности материала на первых циклах сушки удаляется слабосвязанная влага макропор, а также меньшим выделением теплоты при снижении влажности, вследствие уменьшения диэлектрических потерь при воздействии СВЧ-излучения. В результате в начале процесса при сбросе давления это приводит к более интенсивному испарению влаги и ее вытеснению в жидкой фазе. В начальных циклах процесса сушки, в соответствии с вышесказанным, расход СВЧ-энергии на нагрев материала выше, чем в завершающих

Таким образом, на число циклов при использовании комбинированного метода сушки главным образом влияет начальная и конечная влажность обезвоживаемого материала. Также важен выбор параметров процесса, так как при использовании более высокого давления в камере и соответственно более высокой температуры, до которой можно нагревать материал без вскипания воды, количество удаляемой за один цикл влаги увеличивается и для достижения заданной конечной влажности материала число циклов снизится.

Для оценки эффективности комбинированного метода сушки проводились сравнительные эксперименты по конвективной сушке образцов цеолита с удельными затратами энергии, примерно равными затратам при сушке методом сброса давления с использованием СВЧ-нагрева. Данные по скорости удаления влаги из цеолита представлены на рис. 4.

Как видно из приведенных данных, время сушки цеолита до влажности $W_k = 10\%$ конвективным способом составляет 41,5 мин, а способом сброса давления с СВЧ-нагревом 27 мин. Применение комбинированного метода сушки для цеолита с использованием СВЧ-нагрева позволяет сократить время сушки в 1,5 раза по сравнению с конвективным способом при одинаковом температурном режиме.

Таким образом, на основании данных экспериментальных исследований можно сделать вывод о возможности интенсификации процесса обезвоживания дисперсных материалов способом сброса давления и использованием СВЧ-нагрева.

Список литературы

1. Михайлов Ю.А. Сушка перегретым паром. М., 1967. С. 135.
2. Кожин В. П., Горбачев Н. М. Применение метода сброса давления при высокой температурной осциллирующей сушке крупномерной древесины //ИФЖ. 2011. Т 84, № 2. С. 223–229.
3. Н.М. Горбачев, Д.С. Слижук, И.В. Жавнерко. Разработка технологии комбинированной сушки крупномерной древесины с использованием СВЧ-нагрева. Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Проблемы ресурс- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК». Иваново, 2014. С. 301.
4. Акулич П. В., Гринчик Н. Н., Акулич А. В. Неизотермический влагоперенос в пористых телах при импульсных тепловых и вакуумных воздействиях // Материалы межд.-науч. техн. семинара «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов». Воронеж, 2010. С. 30 – 38.

УДК 532.516:536.24

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА, ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
И УСАДКИ В ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ
MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PHASE
TRANSFORMATIONS AND SHRINKAGE IN BELT DRYING**

**Наталья Н. Сорокова, Николай И. Никитенко, Юрий Ф. Снежкин
Natalia N. Sorokovaya, Nikolai I. Nikitenko, Yuri F. Snezhkin**

*Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины, Киев
(e-mail: n.sorokova@yandex.ua).*

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

Аннотация: Разработана математическая модель и численный метод расчета тепло-массопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел в прямооточной ленточной сушилке. Математическое моделирование позволяет определить поля температур, объемных концентраций и парциальных давлений жидкой, паровой и воздушной фаз в теле и изменение во времени средних значений этих параметров в сушильном агенте в зависимости от скорости движения материала и начальной скорости сушильного агента, геометрических параметров влажного тела и сушильной камеры, а также других физических параметров.

Abstract: A mathematical model and a numerical method for the calculation of heat and mass transfer, phase changes and shrinkage during drying of colloidal capillary-porous bodies in a co-current belt dryer are developed. Mathematical modeling allows us to determine the temperature field, the volume concentrations and partial pressures of liquid, steam and air phase in the body and the time variation of the average values of these parameters in drying agent, depending on the speed of material and of initial speed of the drying agent, the geometrical parameters of the wet body and drying chamber as well as other physical parameters.

Ключевые слова: непрерывная сушка, ленточная сушилка, коллоидные капиллярно-пористые материалы, интенсивность испарения, площадь контакта жидкой и газовой фаз.

Keywords: continuous dryers, belt dryers, colloidal capillary-porous materials, the evaporation rate, the contact area of the liquid and gaseous phases.

Математическое моделирование процесса сушки в конвективных аппаратах непрерывного действия связано с решением сопряженной задачи тепломассопереноса и фазовых превращений в высушиваемом материале и в сушильном агенте. Известные математические модели описывают кинетику процесса сушки в конвективных сушильных установках непрерывного действия и основываются на приближенных балансных методах моделирования, требующих значительного объема экспериментальной информации.

В работе представляется математическая модель динамики тепло- и массопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов в прямооточной ленточной сушилке. Она строится на базе уравнения переноса субстанции W (массы, импульса, энергии), полученного в [1] исходя из законов сохранения и основных положений механики деформируемого тела

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(W\mathbf{w}) = -\text{div} \mathbf{j}_W + I_W - \frac{W}{1+\varepsilon_V} \left[\frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon_V \mathbf{w}) \right]. \quad (1)$$

При нормальных условиях режим работы ленточной сушилки является стационарным, т.е. в каждой точке сушильной камеры $\partial W / \partial t = 0$ и $\partial \varepsilon_V / \partial t = 0$. Скорость перемещения

материала \mathbf{w}_L также не зависит от времени t , а скорость перемещения компонента относительно корпуса камеры $\mathbf{w} = \mathbf{w}_L + \mathbf{w}_\psi$, где \mathbf{w}_ψ – скорость фильтрации компонента ψ ($\psi = \text{ж, п, в}$).

Плотность потока \mathbf{j}_W субстанции представляется суммой $\mathbf{j}_W = \mathbf{j}_W^a + \mathbf{j}_W^\phi$. Плотность диффузионного потока энергии $\mathbf{j}^a = -\lambda \nabla T + \sum_\psi E_\psi \mathbf{j}_\psi^a$, массы компонента ψ :

$\mathbf{j}_\psi^a = -D_\psi (\nabla U_\psi + \delta_\psi^T \nabla T)$, где E_ψ , D_ψ , U_ψ , δ_ψ^T – внутренняя энергия, коэффициент диффузии, объемная концентрация, относительный коэффициент термодиффузии. Коэффициент диффузии пара ($\psi = \text{п}$) находится по формуле [2]: $D_p = D_v = \gamma_{Dn} T^{3/2} / P_r$, жидкости ($\psi = \text{ж}$) – по формуле Н.И. Никитенко [3]: $D_j = \gamma_{Dj} [\exp(A_D / RT) - 1]^{-1}$, где T – температура, R – универсальная газовая постоянная, A_D – энергия активации для процесса диффузии; γ_{Dn} , γ_{Dj} – диффузионные коэффициенты. Плотности фильтрационных потоков жидкости, пара и воздуха $\mathbf{j}_\psi^\phi = U_\psi \mathbf{w}_\psi$, $\mathbf{j}_p^\phi = U_p \mathbf{w}_p$ и $\mathbf{j}_v^\phi = U_v \mathbf{w}_v$, где скорости фильтрации находятся по формуле Дарси $\mathbf{w}_\psi = -K_\psi \nabla P_\psi / \eta_\psi$, $\psi = \text{ж, г}$, давления газовой и жидкой фаз в порах тела: $P_r = P_p + P_v$ и $P_j = P_r + P_k$. Парциальные давления пара P_p и воздуха P_v определяются из уравнения состояния, а капиллярное давление P_k рассчитывается как среднее капиллярное давление жидкости в порах [1]. Относительная объемная деформация ε_V находится из уравнения термоконцентрационного деформирования [4].

Система уравнений тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов в ленточной сушилке записывается в виде

$$\mathbf{w}_L \text{div} U_j + \text{div}(U_j \mathbf{w}_j) = \nabla [D_j (\nabla U_j + \delta_j^T \nabla T)] - I_V - \frac{U_j}{1 - \varepsilon_V} [\mathbf{w}_L \text{div} \varepsilon_V + \text{div}(\varepsilon_V \mathbf{w}_j)], \quad (2)$$

$$\mathbf{w}_L \text{div} U_p + \text{div}(U_p \mathbf{w}_p) = \nabla [D_p (\nabla U_p + \delta_p^T \nabla T)] + I_V - \frac{U_p}{1 - \varepsilon_V} [\mathbf{w}_L \text{div} \varepsilon_V + \text{div}(\varepsilon_V \mathbf{w}_p)], \quad (3)$$

$$\mathbf{w}_L \text{div} U_v + \text{div}(U_v \mathbf{w}_v) = \nabla [D_v (\nabla U_v + \delta_v^T \nabla T)] - \frac{U_v}{1 - \varepsilon_V} [\mathbf{w}_L \text{div} \varepsilon_V + \text{div}(\varepsilon_V \mathbf{w}_v)], \quad (4)$$

$$\mathbf{w}_L \text{div} T + \text{div}(T \mathbf{w}_{\text{эф}}) = \nabla (\lambda_{\text{эф}} \nabla T) - \sum_\psi c_\psi D_\psi (\nabla U_\psi + \delta_\psi^T \nabla T) \nabla T - L I_V, \quad (5)$$

$$\text{где } \mathbf{w}_{\text{эф}} = [\mathbf{w}_j c_{\text{ж}} U_j + \mathbf{w}_p (c_p U_p + c_v U_v)] / c_{\text{эф}},$$

$$c_{\text{эф}} = c_T U_T + c_j U_j + c_p U_p + c_v U_v,$$

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_T U_T / \rho_T + \lambda_j U_j / \rho_j + \lambda_p U_p / \rho_p + \lambda_v U_v / \rho_v.$$

Интенсивность испарения жидкости на внешней границе тела [5] пропорциональна разности потоков испаряющейся и конденсирующей жидкости

$$I = \gamma_c \left\{ \varphi_T (\exp[A / (R_y T|_{v=0})] - 1)^{-1} - \varphi_c (\exp[A / (R_y T_c)] - 1)^{-1} \right\}, \quad \gamma_c = \varepsilon_r \delta^* / 4. \quad (6)$$

Здесь ε – коэффициент излучения; δ^* – средняя длина диффузионного перескока активизированной частицы в конденсированном теле; φ_T – влажность парогазовой смеси, которой согласно изотерме сорбции отвечает объемная концентрация U_j в данной точке пористого тела; \mathbf{v} – нормаль к граничной поверхности; T_c и φ_c – температура и относительная влажность внешней среды; A – энергия активации; R_y – универсальная газовая постоянная.

Формула для интенсивности испарения в порах тела вытекает из (6) при условии, что температуры фаз в каждой точке тела совпадают

$$I_V = 0,25 \varepsilon_r \delta^* [\exp(A / RT) - 1]^{-1} (\varphi_T - \varphi) S, \quad (7)$$

где S – площадь контакта жидкости и газа в частично заполненных жидкостью порах, для нахождения которой получена формула [6]: $S = \frac{2\sqrt{1-\varphi_T}}{\rho_{ж}\delta^*} \frac{\partial U_{ж}}{\partial \varphi_T}$. Производная

$\partial U_{ж}/\partial \varphi_T$ определяется путем дифференцирования уравнения изотермы десорбции. Если изотерма задана в виде $U_{ж} = U_{\max} \varphi_T^g$, $g = const$, то $\partial U_{ж}/\partial \varphi_T = U_{\max} g \varphi_T^{g-1}$.

На входе в сушильную камеру все физические параметры материала и теплоносителя считаются известными. Для определения средних значений температуры T_c , давления P_c и объемных концентраций пара $U_{сн}$ и воздуха $U_{св}$ в сушильном агенте в сечении z по длине канала используются балансные уравнения для элементарного объема $dV = S_c dz$, S_c – площадь сечения канала, $S_c = XY$, X – высота канала.

Изменение давления ΔP_c в сечении z определяется по уравнению Бернулли для течения газа в канале [7]. Для участка канала, на котором местными сопротивлениями можно пренебречь, дифференциальное уравнение потери напора имеет вид

$$dP_c / dz = -\lambda_{тр} \rho_c w^2 / 2d_{эжв} + \rho_c \cos(g, z). \quad (8)$$

Коэффициент трения $\lambda_{тр}$ зависит от режима течения газа [7], эквивалентный диаметр $d_{эжв} = 2S_c / \Pi_c = XY / (X+Y)$, где $\Pi_c = 2(X+Y)$ – периметр сечения канала.

Средняя температура агента T_c в сечении z определяется из уравнения баланса энергии для элементарного объема $dV = S_c dz$ канала, контактирующего с агентом на площади $Y dz$:

$$dq_c / dz = [\alpha - \gamma_{пс} (U_{п|_{v=0}} - \rho_{пс} \Psi_{г}) c_{п} - \gamma_{вс} (U_{в|_{v=0}} - \rho_{вс} \Psi_{г}) c_{в}] (T_c - T|_{v=0}) - LI_c Y. \quad (9)$$

где q_c – поток энергии через сечение z канала, $q_c(z) = [G_{пс}(z)c_{п} + G_{вс}(z)c_{в}] T_c(z)$.

Средняя скорость парогазовой смеси в канале в сечении z , в соответствии с уравнениями состояния и неразрывности для пара и воздуха, находится по формуле

$$w_c(z) = [G_{пс}(z) / \mu_{п} + G_{вс}(z) / \mu_{в}] \frac{RT_c(z)}{P_c(z) S_c}. \quad (10)$$

Изменение расхода воздушной и паровой составляющей сушильного агента через сечение канала z определяются по уравнениям баланса массы

$$dG_{вс}(z) / dz = \gamma_{вс} [\rho_{в}(z, X) - \rho_{вс}(z) \Psi_{г}] Y, \quad dG_{пс}(z) / dz = \gamma_{пс} [\rho_{п}(z, X) - \rho_{пс}(z) \Psi_{г}] Y, \quad (11)$$

где парциальные плотности пара и воздуха в сушильном агенте $\rho_{пс} = U_{пс}$ и $\rho_{вс} = U_{вс}$.

Расходы паровой и воздушной фаз: $G_{пс}(z) = w_{с} S_c \rho_{пс}(z)$, $G_{вс}(z) = w_{с} S_c \rho_{вс}(z)$. Общий расход сушильного агента $G_{с0}$ через начальное сечение $z = 0$ канала считается заданным $G_{с0} = G_{пс0} + G_{вс0} = w_{с0} S_{с0} (U_{пс0} + U_{вс0})$, а его расход G_c через произвольное сечение канала z равен $G_c(z) = G_{пс}(z) + G_{вс}(z) = w_{с} S_c [\rho_{пс}(z) + \rho_{вс}(z)]$.

Расход материала $G_{м0}$ в сечении канала $z = 0$ определяется следующим образом

$$G_{м0} = G_{т0} + G_{ж0} + G_{п0} + G_{в0} = w_L S_M (U_{т0} + U_{ж0} + U_{п0} + U_{в0}), \quad (12)$$

где $S_M = X_M Y$ – площадь сечения слоя материала, а его расход $G_M(z)$ через сечение z

$$G_M(z) = w_L S_M [\bar{U}_T(z) + \bar{U}_ж(z) + \bar{U}_п(z) + \bar{U}_в(z)], \quad (13)$$

$\bar{U}_\psi(z)$ – среднее значение объемной концентрации компонента ψ ($\psi = т, ж, п, в$) тела по S_M .

Если поверхности $x = 0$, $y = 0$, $y = Y_M$ материала и $x = X_M + X$, $y = 0$, $y = Y$ канала непроницаемы, то суммарный расход материала и сушильного агента в произвольном сечении системы материал–сушильный агент остается неизменным, т.е.

$G_M(z) + G_c(z) = G_{м0} + G_{с0} = const$. При этом расход пара сушильного агента через сечение z согласно уравнению баланса массы равен

$$G_{пс}(z) = w_{с} S_c \rho_{пс}(z) = G_{м0} + G_{с0} - G_M(z) - G_{вс}(z).$$

Парциальные плотности пара $\rho_{пс}$ и воздуха $\rho_{вс}$ в сечении z находятся по уравнениям неразрывности: $\rho_{пс}(z) = G_{пс}(z) / [w_{с}(z) S_c]$, $\rho_{вс}(z) = G_{вс}(z) / [w_{с}(z) S_c]$. Парциальные давления пара $P_{пс}$ и воздуха $P_{вс}$ определяются по уравнениям состояния $P_{пс}(z) = R \rho_{пс}(z) T_c(z) / \mu_{п}$, $P_{вс}(z) = R \rho_{вс}(z) T_c(z) / \mu_{в}$, где μ – молярная масса.

Условия тепломассообмена на границе $x = X_M$ материала записываются следующим образом

$$D_{ж} \frac{\partial U_{ж}}{\partial v} \Big|_{v=0} = -I, \quad D_{п} \frac{\partial U_{п}}{\partial v} \Big|_{v=0} = I - \gamma_{пс} (U_{п|_{v=0}} - \rho_{пс} \Psi_{г}),$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial v} \Big|_{v=0} = \alpha (T_c - T|_{v=0}) - LI - [\gamma_{пс} (U_{п|_{v=0}} - \rho_{пс} \Psi_{г}) c_{п} + \gamma_{вс} (U_{в|_{v=0}} - \rho_{вс} \Psi_{г}) c_{в}] (T_c - T|_{v=0}).$$

Решение системы дифференциальных уравнений (2) – (5) может быть проведено численным методом на базе трехслойной явной разностной схемы Никитенко Н.И. [4] и процедуры расщепления алгоритма по физическим факторам.

На рис.1 показаны результаты численных экспериментов сушки керамического слоя столовой свеклы толщиной $H = 12,5$ мм при его обезвоживании в прямоточной ленточной сушилке.

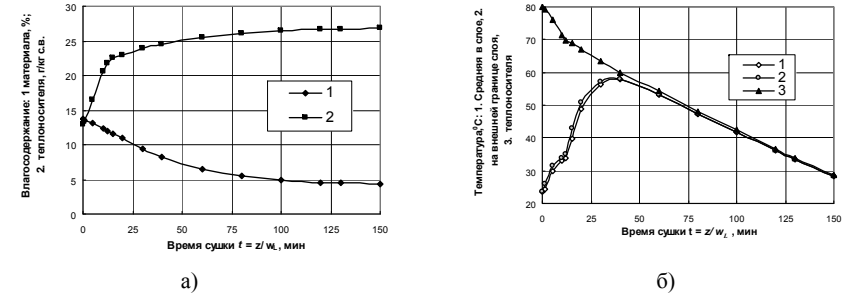


Рис 1. Графики изменения влагосодержания керамического слоя и сушильного агента (а), температуры материала (б) – на поверхности (кривая 1), средней по толщине слоя в сечении z (кривая 2) и сушильного агента (кривая 3) при сушке слоя в ленточной прямоточной сушилке нагретым воздухом. Толщина слоя $H = 16$ мм, скорость ленты $w_L = 0,005$ м/с, скорость и давление теплоносителя на входе в канал $w_{с0} = 5,5$ м/с, $P_{с0} = 103$ кПа

То, что в каждый момент времени значения T_c , d_c , $P_{пс}$ и φ_c соотносятся на $I-d$ диаграмме влажного воздуха, свидетельствует об адекватности математической модели и эффективности численного метода.

Список литературы

1. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки с целью оптимизации процесса сушки термолabileльных материалов // ИФЖ. 2005. – Т. 78, – № 1. – С. 74 – 87.
2. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. –М.: Химия. –1980. – 248 с.
3. Никитенко Н.И. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидких средах // ИФЖ. 2000. – Т. 73, – № 4. – С. 851 – 860.

4. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. – Киев: Наук. Думка. – 1983. – 352 с.
5. Никитенко Н.И. Исследование динамики испарения конденсированных тел на основе закона интенсивности спектрального излучения частиц// ИФЖ. 2002. – Т.75, – № 3, – С. 128 – 134.
6. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н., Кольчик Ю.Н. Молекулярно-радиационная теория и методы расчета тепло- и массообмена – Киев: Наук. Думка. – 2014. – 744 с.
7. Шлиппченко З. С. Насосы, компрессоры и вентиляторы. – Киев: Техника. – 1976. – 368 с.

УДК 631.812.12

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОКАТЫВАЕМЫЕ ГРАНУЛЫ ПРИ СОВМЕЩЕНИИ СУШКИ, КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

THERMAL COATING PROCESSES OF BAALING GRANULESWHEN DRYING, CRYSTALLIZING AND CHEMICAL CONVERSIONS ARE COMBINED

А.Л. Таран*, Р.В. Морозов**, А.В. Таран*, Р.Н. Иванов***
 A.L. Taran*, R.V. Morozov**, A.V. Taran*, R.N. Ivanov ***

* Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва (e-mail: capsula2@mail.ru)

** Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва (e-mail: morozovrv@list.ru)

*** Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва (e-mail: blink182rrom@mail.ru)
 Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies, Russia, Moscow

Аннотация: Гранулированные продукты широко используются в сельскохозяйственной, медицинской, пищевой отраслях промышленности, для производства промышленных взрывчатых веществ. Наиболее распространенным является получение гранул в грануляционных башнях. Однако, получаемые гранулы имеют ряд недостатков: малые размер и прочность, высокая слеживаемость, сложность получения многокомпонентных гранул. Для производства более укрупненных гранул, с лучшими механическими свойствами, для догранулирования и капсулирования гранул и для выпуска многослойных, структурированных, кондиционированных гранул с подготовленной поверхностью предполагается использовать процесс догранулирования по технологии "fattening". При этом гранулы, получаемые в грануляционных башнях, используются в процессе в качестве ретура.

Abstract: Granular products are widely used in agricultural, medical, food industries and for the production of industrial explosives. The most common is to obtain granules in granulation towers. However, the obtained granules have a number of disadvantages: small size and strength, a high caking, difficulty in obtaining multi-component granules. For the production of more aggregate granules with improved mechanical properties, for the overgranulation and encapsulation and for production multilayer, structured, conditioned granules with prepared surface we can use overgranulation by "fattening" technology. In that case granules obtained in the prilling tower are used as a retour.

Ключевые слова: гранулирование, тарельчатые грануляторы, грануляционные башни, математическое описание

Keywords: granulation, plate granulator, granulation tower, mathematic description

В ходе процесса нанесения покрытия на окатываемые гранулы при совмещении сушки, кристаллизации и химического превращения важно избегать как образования новых гранул, так и дробления имеющихся. В связи с этим важными являются физико-химические и температурные условия окатывания гранул в грануляторе. Линейная (массовая) скорость роста гранулы, температурный режим сушки, расход, вид и состав связующего, физико-механические параметры окатывания определяют качество гранул.

В лабораторной установке на тарелку подавали гранулы ретура и догранулирующее вещество. Через обогреваемую форсунку подавали связующее в случае догранулирования или раствор капсулянта в случае капсулирования. Тарелка имеет приспособление для сушки находящихся в ней гранул. Скорость вращения и угол наклона регулируются.

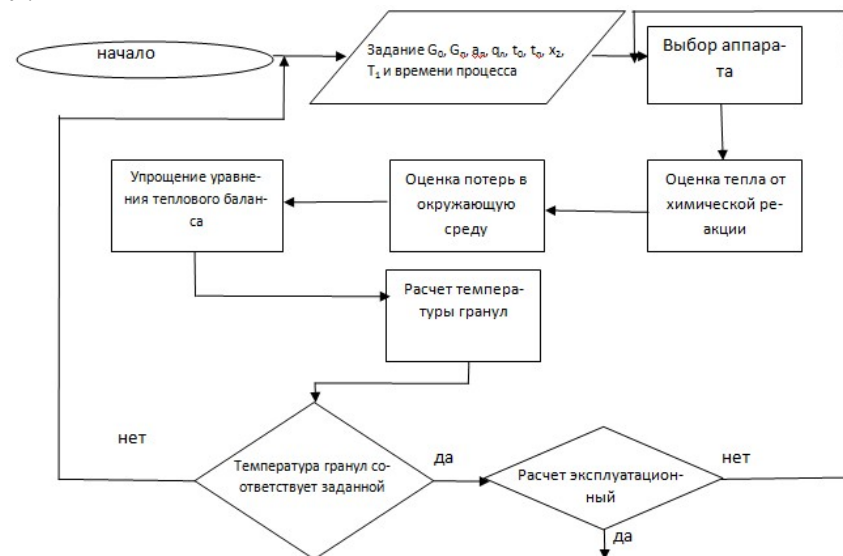


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма решения задачи.

Нами составлено уравнение для математического описания переноса тепла в тарельчатом грануляторе окатывания:

$$m_s c_s \frac{dt}{d\tau} + j \frac{d(m_{pk} c_{pk} t)}{d\tau} + \gamma \frac{d(m_{pn} c_{pn} t)}{d\tau} = q_a F_{эк} + j(L_{pk} I_1^{pk} - L_{pk} I_2^{pk}) + \gamma(L_{pn} I_1^{pn} - L_{pn} I_2^{pn}) + j \frac{dm_{pn}}{d\tau} r_{pk} + \gamma \frac{dm_{pn}}{d\tau} r_{pn} + j \frac{d\eta}{d\tau} \Delta h_k m_{pk} + \gamma \frac{d\eta}{d\tau} \Delta h_n m_{pn} + \alpha_c F_{yo} (t - t_c) \quad (1)$$

где – m_s , m_{pk} , m_{pn} – массы исходных гранул, раствора капсулянта и суспензии порошка для догранулирования, кг; c_s , c_{pk} , c_{pn} – теплоемкости материала частицы исходного (внешнего) ретура, капсулирующего и догранулирующего веществ, Дж/(кг·К); t – температура частицы, °С; q_a – плотность теплового потока инфракрасного излучения, Вт/м²; $F_{эк}$ – площадь облучаемой поверхности гранулы, м²; I_1 , I_2 – теплосодержания сушильного агента (воздуха) начальное и конечное, Дж/кг; r_{pk} , r_{pn} – удельные теплоты парообразования растворителя капсулянта и раствора связующего, Дж/кг; Δh_k , Δh_n – тепловые эффекты реакций образования (полимеризации) капсулянта и реакции между по-

рошком и связующим, Дж/кг; η – степень превращения реагента; α_c – коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающей среде, Вт/(м²·К); $F_{уд}$ – удельная поверхность аппарата, м²; t_c – температура окружающей среды. Здесь j относится к процессу капсулирования, а γ – догранулирования, на практике эти процессы проводятся отдельно.

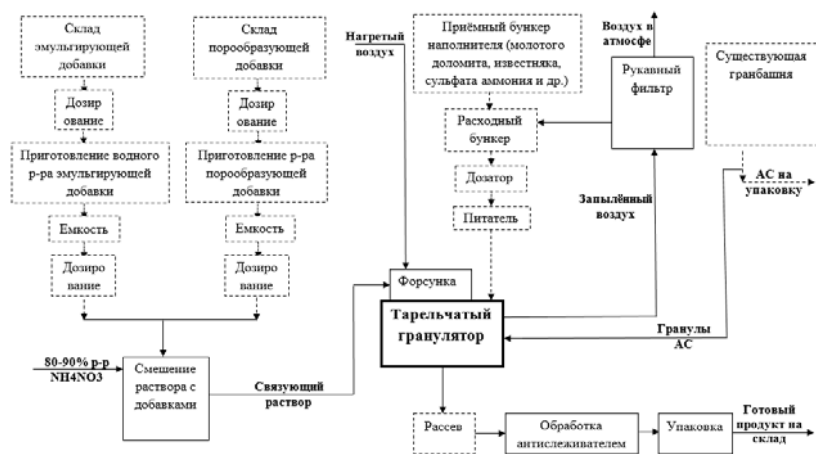


Рисунок 2. Схема производства аммиачной селитры по технологии догранулирования.

УДК 636.294.036.5

К РАСЧЕТУ СВЧ-НАГРЕВА ПАНТОВ ОЛЕНЯ FURTHER RESEARCH OF DEER ANTLERS MICROWAVE HEATING

Дмитрий А. Горин*, Станислав П. Рудобашта**

Dmitry A. Gorin*, Stanislav P. Rudobashta**

*ФГБОУВП «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Россия, Москва
(e-mail: digorin@yandex).

**ФГБОУВП «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Россия, Москва
(e-mail: rudobashta@mail.ru).

Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Russia, Moscow

Аннотация: Статья посвящена количественному расчету температурных полей при СВЧ-нагреве панта оленя, представленного в виде двухслойного цилиндра и анализу полученных данных. Получены данные по распределению температурного поля по сечению панта и кинетика его СВЧ-нагрева.

Abstract: This article describes quantitative calculation of the temperature fields generated by microwave heating of deer antler and analysis of the obtained data. Deer antler is presented in the form of a two-layer cylinder. Obtained data are parameters of temperature field in the deer antler cross section and kinetics of its microwave heating.

Ключевые слова: панты, СВЧ, нагрев, кинетика, температурное поле

Keywords: deer antlers, microwaves, heating, kinetics, temperature field.

Процесс сушки пантов обязательно предусматривает нагрев материала. Использование микроволновой энергии для нагрева имеет свои особенности, которые определяют электромагнитной мощностью выделяющейся в единице объема продукта. Ранее было получено аналитическое решение термической задачи процесса технологического СВЧ-нагрева пантов оленя [1].

Расчет температурных полей при СВЧ-нагреве панта по полученным ранее аналитическим соотношениям проводился с учетом теплофизических параметров внутренних тканей пантов и кожного покрова. Численные значения теплопроводности и теплоемкости пантов определялись усреднением результатов экспериментальных исследований теплофизических характеристик.

Радиус панта и толщина кожного покрова в расчетах принимались равными соответственно $2 \cdot 10^{-2}$ м и $1 \cdot 10^{-3}$ м. Учет влияния условий теплоотдачи на поверхности исследовался при предельном значении числа Нуссельта – $Nu = 2$ (свободная тепловая конвекция), а также при вынужденном движении воздуха при скоростях воздушного потока 3–8 м/с ($Nu = 20$). Начальные температуры внутренних тканей и кожного покрова принимались равными. Температура среды в расчетах составляла 20°C, при этом среднее значение теплопроводности среды составляло $\lambda_c = 0,0259$ Вт/(м·К).

Отметим, что в комплексе безразмерных величин отношение СВЧ-мощностей, поглощаемых в единице объема кожного покрова и внутренних тканей, определяет коэффициент β равный:

$$\beta = \frac{q_2}{q_1} = \frac{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_2 |E_2|^2 \operatorname{tg} \delta_2}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_1 |E_1|^2 \operatorname{tg} \delta_1} \quad (2)$$

С учетом равенства $\varepsilon'' = \varepsilon \operatorname{tg} \delta$, выражение (2) преобразуется к виду:

$$\beta = \frac{\varepsilon_2'' |E_2|^2}{\varepsilon_1'' |E_1|^2} \quad (3)$$

В данном случае разница в поглощении СВЧ-энергии определяется значением мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости ε'' и средним значением модуля напряженности электрического поля в материале. Значения ε'' для внутренних тканей и для кожного покрова имеют однозначные значения. Величина же $|E|$ в зависимости от размеров объекта является зависимой от линейных размеров и от глубины проникновения электромагнитной волны в материале. Среднее эффективное значение модуля напряженности электрического поля можно оценить интервалом между ближней и дальней к фронту координате падения ЭМВ поверхности материала.

Расчеты показывают, что на частоте электромагнитного поля $f = 2450$ МГц глубина проникновения составляет 0,5 - 0,8 см для внутренних тканей и 1,7 - 1,9 см для кожного покрова. Тогда с учетом геометрических размеров панта для модулей $|E_1|$ и $|E_2|$ и согласно равенства вектора электрической индукции для нормальных составляющих электрического поля на границе раздела диэлектрических сред при $x=R_1$ выражение (3) принимает вид:

$$\beta = 9,02 \frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon_1''} \left(\frac{\varepsilon_1'}{\varepsilon_2'} \right)^2$$

Как показывают расчеты, значение коэффициента на частоте 2450 МГц составляет 0,6–0,8 единиц, поэтому при оценке термического действия СВЧ, β принималось равным 0,7 единиц. Распределение температурного поля по сечению и кинетика нагрева панта практически не зависят от наличия кожного покрова. Графически полученные результаты расчетов для панта без кожного покрова представлены на рисунках 1 и 2. Заметим, что приведенные расчетные кривые справедливы для значений температуры среды в пределах 10 - 30°C.

В целом можно сказать, что температурное поле в объекте относительно равномерно и постепенно убывает к поверхности панта. Кинетика процесса на начальном этапе нагрева имеет практически линейную зависимость, но конечные температуры и скорость нагрева существенно зависят от условий теплообмена на поверхности, что определяется числом Нуссельта Nu .

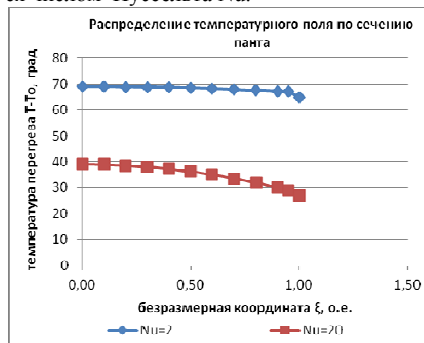


Рис. 1 – Распределение температурного поля по сечению панта при $t_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

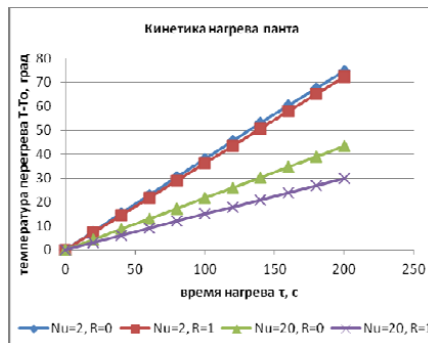


Рис. 2 – Кинетика нагрева панта при $t_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ полученных кривых показывает, что при СВЧ-нагреве пантов без принудительного обдува воздухом изменение температуры во времени практически линейно. При удельной поглощаемой СВЧ-мощности 1 кВт/кг скорость СВЧ-нагрева составляет $0,35 - 0,40\text{ }^{\circ}\text{C/с}$.

Распределение температурного поля по сечению (от центра к поверхности) имеет убывающий характер, однако, эта разница температур между центром и поверхностью практически не значима и составляет $3 - 3,5\%$ по отношению к наибольшей температуре в центре панта. При повышении эффективности теплоотдачи во время СВЧ-нагрева на поверхности панта за счет продувки воздухом имеет место снижение скорости нагрева как поверхностных, так и центральных тканей панта. Так при скорости потока воздуха $3 - 8\text{ м/с}$ и при удельной поглощаемой СВЧ-мощности 1 кВт/кг , скорость СВЧ-нагрева составляет $0,16 - 0,22\text{ }^{\circ}\text{C/с}$. В то же время наблюдается существенная разница температур между центром и поверхностью, которая составляет $28 - 30\%$ по отношению к наибольшей температуре в центре панта.

Теоретические расчеты СВЧ-нагрева панта при отсутствии кожного покрова показывают, что по сравнению с СВЧ-нагревом пантов с кожным покровом, наблюдается уменьшение скорости нагрева и снижается разница температур между центром и поверхностью. Это объясняется тем, что кожная ткань имеет меньшую теплопроводность по сравнению с внутренними тканями.

Список литературы

1. Горин Д.А., Рудобашта С.П. Аналитическое решение термической задачи процесса технологического СВЧ-нагрева пантов оленя. // Вестник ФГБОУ ВПО МГАУ – М.:ФГБОУ ВПО МГАУ, 2013. – С. 17 – 19.

УДК 66.021.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ГЕЛЯ ПРИ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОМ ПОДВОДЕ ТЕПЛОТЫ MODELLING OF PROCESS OF DEHYDRATION OF POLYMERIC GEL AT RADIATING AND convective HEAT EXCHANGE

А.Г. Липин, А.А. Липин, А.В. Железцов

A.G Liping, A.A Liping, A.V Zheleztssov

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

Аннотация: Приведены экспериментальные данные по кинетике сушки полимерного геля в терморadiационной сушилке. Предложена математическая модель, позволяющая прогнозировать рациональные технологические параметры процесса сушки.

Abstract: Experimental data on kinetics drying of polymeric gel in a thermoradiating dryer are resulted. The mathematical model, allowing to predict rational technological parameters of process of drying is offered.

Ключевые слова: полимерный гель, гипан, сушка, инфракрасное излучение, кинетика, моделирование

Keywords: polymeric gel, gipan, drying, infrared radiation, kinetics, modelling.

Основным средством регулирования свойств буровых растворов является химическая обработка их с помощью различных реагентов. Понижители водоотдачи стабилизируют дисперсную систему, снижают проницаемость фильтрационной корки и в зависимости от состава могут влиять на реологические свойства бурового раствора. К ним относятся: конденсированная сульфит-спиртовая барда, карбоксиметилцеллюлоза, модифицированный крахмал, полиакриламид, гидролизованный полиакрилонитрил (гипан) и др.

1. Гипан синтезируют в виде 10-15%-го водного раствора, представляющего собой легкоподвижный полимерный гель. Для получения реагента в твердой выпускной форме гель высушивают на вальцевых сушилках, характеризующихся низкой производительностью.

Повышение общей производительности технологической системы требует использования более производительного сушильного оборудования. В связи с этим актуально изучение возможностей применения других способов сушки гипана. Поскольку исходный продукт имеет высокое влагосодержание, рассмотрена целесообразность применения сушки с инфракрасным (ИК) подводом теплоты, так ИК-излучение позволяет обеспечить высокие значения удельного теплового потока.

На лабораторной установке получены кривые сушки (рис.1) тонкого слоя геля гипана в условиях ИК подвода теплоты. Вид данных кривых показывает, что основное количество влаги (до 90%) удаляется в период постоянной скорости сушки, когда скорость удаления влаги лимитируется интенсивностью подвода теплоты. Время сушки слоя геля толщиной 2 мм до влажности 5 % составляло 6 - 10 мин., в зависимости от плотности потока ИК-излучения.

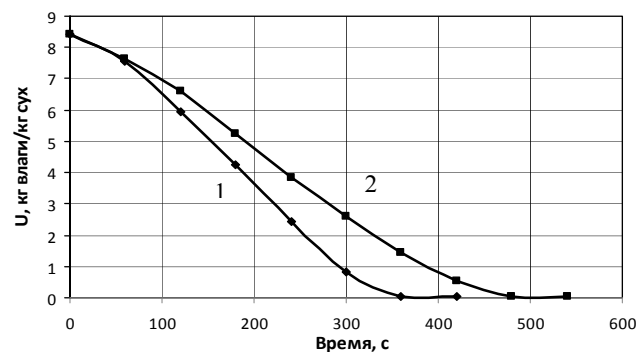


Рис. 1. Зависимость влагосодержания от времени процесса.

Плотность потока инфракрасного излучения, Вт/м²: 1 – 13300, 2 – 9220

2. Кроме того, в тех же условиях были проведены опыты по испарению воды. Совместная обработка результатов экспериментов позволила получить значения коэффициента массоотдачи и зависимость парциального давления водяных паров над гелем полимера от температуры и влагосодержания. Эти величины необходимо знать при проведении расчета процесса сушки.

3. Для сушки гипана можно рекомендовать ленточную инфракрасную сушилку со сплошной металлической лентой. В качестве источника ИК излучения целесообразно применить панели с газовым обогревом. В процессе инфракрасной сушки продукт подвергается воздействию ИК-излучения высокой плотности, что может привести к его перегреву и снижению качественных показателей. Поэтому прогнозирование профиля температуры материала по длине сушилки является актуальной задачей. Ранее [1,2], при моделировании сушки полимерного геля, температура излучателя принималась постоянной. В случае газового обогрева температура излучателя изменяется по длине сушилки.

4. Расчет изменения температуры излучающей панели $T_{\text{и}}$, топочных газов $t_{\text{г}}$, влагосодержания U и температуры $t_{\text{м}}$ высушиваемого материала по длине y сушильной камеры осуществляется путем решения системы уравнений (1) – (5).

$$\alpha_{\text{г}}(T_{\text{г}} - T_{\text{и}}) = c_{12}[(T_{\text{и}}/100)^4 - (T_{\text{м}}/100)^4], \quad (1)$$

$$dt_{\text{г}}/dy = -\alpha_{\text{г}} B(t_{\text{г}} - t_{\text{и}})/(G_{\text{г}} c_{\text{г}}), \quad (2)$$

$$dt_{\text{м}}/dy = \{c_{12}[(T_{\text{и}}/100)^4 - (T_{\text{м}}/100)^4] B + g^* \frac{dU}{dy} G_{\text{п}} + \alpha_{\text{с}}(t_{\text{с}} - t_{\text{м}}) B\} / [G_{\text{п}}(c_{\text{п}} + c_{\text{в}} U)] \quad (3)$$

$$dU/dy = \beta_{\text{п}} B(p_{\text{м}} - p_{\text{с}}) / G_{\text{п}}, \quad (4)$$

$$p_{\text{м}} = p_{\text{нас}}(t_{\text{м}}) \psi(U). \quad (5)$$

В этих уравнениях: $\alpha_{\text{г}}$, $\alpha_{\text{с}}$ – коэффициенты теплоотдачи от топочных газов к излучающей панели и от материала к воздуху в сушильной камере; c_{12} – коэффициент взаимоиизлучения; B – ширина ленты; $c_{\text{г}}$, $c_{\text{в}}$, $c_{\text{п}}$ – теплоемкости, соответственно, топочных газов, воды и сухого полимера; g^* – теплота парообразования; $G_{\text{п}}$ – массовый расход полимера; $G_{\text{г}}$ – расход топочных газов; $t_{\text{с}}$ – температура воздуха в сушильной камере; $p_{\text{м}}$, $p_{\text{с}}$ – парциальное давление паров воды над поверхностью слоя геля и в воздухе; $\beta_{\text{п}}$ – коэффициент массоотдачи; $p_{\text{нас}}$ – давление насыщенных паров воды; $\psi(U)$ – эмпири-

ческий коэффициент, учитывающий снижение парциального давления водяных паров при уменьшении влагосодержания полимерного геля.

На рис. 2, 3 приведены расчетные графики изменения температуры высушиваемого геля, излучающей панели, топочных газов и влагосодержания материала.

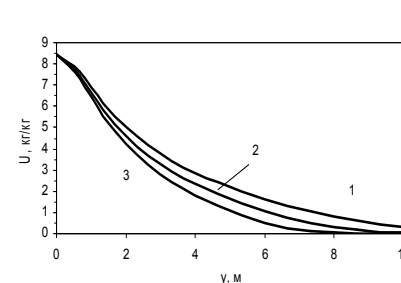


Рис. 2. Температурные профили: 1 – материала, 2 – излучателя, 3 – топочных газов. Начальная температура топочных газов 900 °C

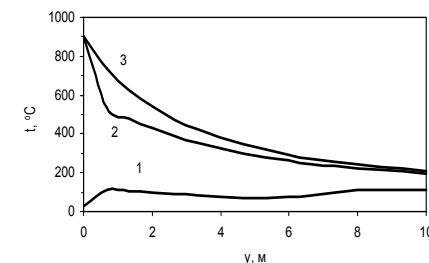


Рис. 3. Профиль влагосодержания. Начальная температура топочных газов, °C: 1 – 800; 2 – 850; 3 – 900

Анализ показывает, что температура материала не превышает 114 °C, что ниже границы начала деструктивных изменений. При начальной температуре топочных газов 800, 850 и 900 °C достигается конечное влагосодержание материала, соответственно, 40, 4,3 и 1,1 %.

Предложенная математическая модель отражает наиболее важные особенности процесса и может быть использована при расчете терморadiационной сушилки для геля гипана.

Список литературы

1. Лебедев В.В. Сушка полимерного геля, сопровождающаяся усадкой материала / В.В. Лебедев, А.Г. Липин, Д.В. Кириллов // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. - 2009, т.52, в. 12. – с.102-105.
2. Лебедев В.В. Моделирование процесса сушки водорастворимого полимера в терморadiационной сушилке / В.В. Лебедев, А.Г. Липин, Д.В. Кириллов // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2010, №1, с.57-62.

УДК 662.612

**СИСТЕМНО-СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД
К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПРИ КОНВЕКТИВНОМ ПРОГРЕВЕ НЕОГРАНИЧЕННОГО ЦИЛИНДРА
TO DETERMINING THERMOPHYSICAL PROPERTIES
IN CONVECTIVE HEATING OF UNLIMITED CYLINDER**

**Г.А. Зуева, Г.Н. Кокурина, А.М. Соболев
G.A. Zueva, G.N. Kokurina, A.M. Sobolev**

*Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново,
(e-mail: zueva_galina15@mail.ru)*

Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia, Ivanovo

Аннотация: Рассмотрен системно-структурный подход к определению коэффициента теплоотдачи при решении задачи теплопроводности неограниченного цилиндра, предложена структурная схема его идентификации на основе решения в области изображений по Лапласу.

Abstract: The system-structural approach to determining the heat transfer coefficient in solving the problem of heat conduction for an unlimited cylinder has been considered, the block diagram for its identification based on decision in the Laplace transform has been proposed.

Ключевые слова: коэффициент теплоотдачи, системно-структурный анализ, уравнение теплопроводности цилиндра, преобразования Лапласа.

Keywords: heat transfer coefficient, system-structural analysis, heat conduction equation for a cylinder, the Laplace transform.

Одной из актуальных тенденций развития теории теплопроводности в настоящее время является применение системно-структурного подхода, который находит всё более широкое применение для анализа теплообменных процессов в твердых телах различной формы, а также для идентификации теплофизических параметров и тепловых воздействий [1, 2]. Элементами схемы служат математические передаточные функции, которые устанавливают формальные правила преобразования тепловых, механических и других воздействий на объект в порождаемую ими реакцию. При решении задачи теплопроводности неограниченного цилиндра, возникает необходимость идентификации его теплофизических параметров. В работе рассмотрен системно-структурный подход к определению такого теплофизического параметра как коэффициент теплоотдачи, предложена структурная схема его оценки, учитывающая особенности его нахождения. Ранее в работе [3] построена структурную модель одномерной нестационарной задачи теплопроводности для неограниченного цилиндра, обменивающегося теплотой с окружающей средой по закону Ньютона. Для решения задачи идентификации коэффициента теплоотдачи используем ту часть структурной схемы, которая описывает формирование температуры на поверхности цилиндра (рис. 1).

Физическая модель задачи: предполагали, что начальная температура цилиндра была распределена равномерно и равна t_0 , температура газовой среды $t_c = \text{const}$, при этом температура окружающей среды была выше температуры цилиндра ($t_c > t_0$). Теплообмен газовой среды с поверхностью цилиндра происходил по закону Ньютона.

Температура цилиндра $t(r, \tau)$ являлась функцией координаты r и времени τ . Для удобства представили переменные величины в виде постоянных (стационарных) и переменных (зависящих от времени) составляющих: $t(r, \tau) = \Delta t(r, \tau) + t_0$; $t_c = t_0 + \Delta t_c$.

Требовалось идентифицировать коэффициент теплоотдачи α по результатам измерения температур среды Δt_c (приращения температуры) и поверхности цилиндра

$t(R, \tau)$, учитывая случайные погрешности измерения температур, которые неизбежно возникают при проведении реальных экспериментов. Другими словами необходимо было установить связь между погрешностями измерения температур на всем временном интервале наблюдения и определением коэффициента теплоотдачи.

Обозначили n_1 и n_2 случайные погрешности (или их математические ожидания) измерения температур Δt_c и $\Delta t(R, \tau)$. Коэффициент теплоотдачи α считали постоянной величиной. Схема идентификации значений коэффициента теплоотдачи α приведена на рис. 1. Она получена на основе решения в изображениях по Лапласу задачи о теплопроводности неограниченного цилиндра при граничных условиях третьего рода. Применили преобразование по Лапласу по временной переменной ($\tau \rightarrow s$):

$$L[t(r, \tau)] = \Delta \bar{t}(r, s); \quad L[t_c] = \frac{t_c}{s}.$$

Значение коэффициента теплоотдачи α может быть найдено с использованием решения задачи в изображениях, из условия минимизации среднеквадратичного отклонения e^2 измеренной и определяемой температуры

$$\Delta t(R, s) = \frac{\frac{\Delta t_c}{s} \alpha}{\alpha + \sqrt{\frac{s}{a}} \frac{I_1\left(\sqrt{\frac{s}{a}} R\right)}{I_0\left(\sqrt{\frac{s}{a}} R\right)}}. \quad (1)$$

Здесь a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; R – радиус цилиндра, м; r – текущий радиус цилиндра, м; $t(r, \tau)$ – поле температур цилиндра, К; τ – время, с; α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; t_0 – начальная температура цилиндра, К; t_c – температура окружающей среды, К; λ – коэффициент теплопроводности цилиндра, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; I_0, I_1 – модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков.

В соответствии с построенной схемой была получена расчетная формула для вычисления коэффициента теплоотдачи α с учетом погрешностей измерения температур (при $k=10$)

$$\alpha_{\text{расч}} = \frac{\sum_{i=1}^{k=10} \lambda \sqrt{\frac{s}{a}} \frac{\frac{\Delta t_i(R, s)}{\Delta t_{ci}(s)} \cdot \frac{\Phi\left(\sqrt{\frac{s}{a}}\right)}{\Psi\left(\sqrt{\frac{s}{a}}\right)}}{1 - \frac{\Delta t_i(R, s)}{\Delta t_{ci}(s)}}}{k}. \quad (2)$$

В решении (1) отношение функций Бесселя относительно $\sqrt{\frac{s}{a}}$ выражено в виде отношения полиномов относительно этой же величины:

$$\frac{I_1\left(\sqrt{\frac{s}{a}} R\right)}{I_0\left(\sqrt{\frac{s}{a}} R\right)} = \frac{\Phi\left(\sqrt{\frac{s}{a}}\right)}{\Psi\left(\sqrt{\frac{s}{a}}\right)}.$$

Ширина доверительного интервала $\delta\alpha$ для принятого числа реализаций эксперимента:

$$\delta\alpha = St_{k,\beta_0} \left\{ \frac{1}{k-1} \left\{ \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{\lambda \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot \frac{\Delta t_i(R,s)}{\Delta t_{ci}(s)} \cdot \frac{\Phi\left(\sqrt{\frac{s}{a}}\right)}{\Psi\left(\sqrt{\frac{s}{a}}\right)} \right)^2 - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \lambda \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot \frac{\Delta t_i(R,s)}{1 - \frac{\Delta t_i(R,s)}{\Delta t_{ci}(s)}} \right\} \right\}, \quad (3)$$

где St_{k,β_0} коэффициента Стьюдента для числа распределений k уровня значений β_0 .

$\beta_0=5\%$ - уровень значимости; $k=10$ - число реализаций эксперимента; $St_{10,5}=2,26$ -коэффициент Стьюдента для объема выборки $k=10$.

Таким образом, искомое значение коэффициента

$$\alpha = \alpha_{расч} \pm \delta\alpha. \quad (4)$$

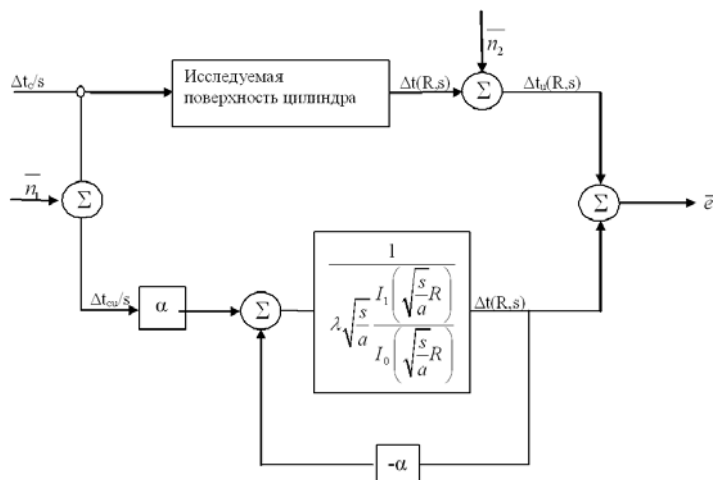


Рис.1. Структурная схема идентификации коэффициента теплоотдачи α с учетом погрешностей в определении температур.

Изложенный способ определения коэффициента теплоотдачи удобен в тех случаях, когда теплофизические свойства объекта требуется контролировать в процессе его работы или изготовления.

Список литературы

1. Шашков, Л.Г. Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1983. 279 с.
2. Кафаров, В.В., Дорохов, И.Н., Липатов, Л.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Статистические методы идентификации объектов химической технологии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, Л.Н. Липатов // М.: Наука, 1982. 344 с.

3. Зуева, Г.А., Падохин, В.А., Кокурина, Г.Н. Структурная модель теплопроводности неограниченного цилиндра// Изв. вузов. Химия и химич. технол. 2013. Т.56. Вып.12. - С.114-118.

УДК 536.24

К РЕШЕНИЮ НЕКОТОРЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ МЕТОДОМ РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ TO SOLVING SOME BOUNDARY-VALUE PROBLEMS OF UNSTEADY HEAT CONDUCTION IN A LAYERED MEDIUM BY SEPARATION OF VARIABLES

С.В. Вендин
S.V. Vendin

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

Аннотация: Рассмотрены вопросы нестационарной теплопроводности в многослойных объектах. Предложено решение краевой однородной задачи с нестационарными граничными условиями третьего рода. В основу решения положены: метод разделения переменных Фурье по собственным функциям задачи и интеграл Дюамеля. Предложенная форма решения имеет явный вид и благодаря рекуррентной форме записи основных соотношений может быть полезной при численных расчетах.

Abstract: The problems of non-stationary heat conduction in multilayer objects. The solution of the boundary of the homogeneous problem with unsteady boundary conditions of the third kind. The basis of the solutions put: the Fourier method of separation of variables in eigenfunctions of the integral of Duhamel. The proposed solution has the form of an explicit form and thanks to the recurrent form of recording basic relations can be useful in numerical calculations.

Ключевые слова: краевая задача, уравнение теплопроводности Фурье, многослойный объект, нестационарные граничные условия третьего рода.

Keywords: boundary value problem, the Fourier heat equation, multi-object, unsteady boundary conditions of the third kind.

Многие важные практические задачи расчета температурных полей в многослойных объектах могут рассматриваться как одномерные. Ранее автором было предложено аналитическое решение однородной задачи нестационарной теплопроводности в многослойных объектах при стационарных граничных условиях третьего рода [1].

Ниже приведено решение такой задачи при нестационарных граничных условиях третьего рода.

В общем случае математическая постановка одномерной задачи теплопроводности для многослойных объектов определяется следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial T_i(r,t)}{\partial t} = a_i \nabla^2 T_i(r,t), \quad x_{i-1} \leq r \leq x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где $T_i(r,t)$, a_i - соответственно температурное поле и коэффициенты теплопроводности i -го слоя; x_0 , x_n - соответственно координаты нижней и верхней геометрической (свободной) поверхности объекта.

Граничные условия на свободных поверхностях $r = x_0, r = x_n$ определим как нестационарные граничные условия третьего рода. В таком случае запишем:

$$\left[T_1(r, t) + h_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \right]_{r=x_0} = \varphi_1(t), \quad \left[T_n(r, t) + h_2 \frac{\partial T_n(r, t)}{\partial r} \right]_{r=x_n} = \varphi_2(t) \quad (2)$$

Граничные условия сопряжения температурных полей и тепловых потоков на границах раздела слоев в общем виде определяются следующими выражениями:

$$T_i(r, t) = T_{i+1}(r, t) \Big|_{r=x_i}, \quad \lambda_i \frac{\partial T_i(r, t)}{\partial r} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=x_i} \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (3)$$

где λ_i - теплопроводность i -го слоя.

Начальное распределение температурных полей в каждом слое имеет вид:

$$T_i(r, 0) = f_i(r), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Если представить искомое решение задачи в виде суммы

$$T_i(r, t) = f_i(r) + v_i(r, t), \quad (5)$$

то задача сводится к определению функций $v_i(r, t)$, которые являются решением задачи с нулевыми начальными условиями $v_i(r, 0) = 0$ и удовлетворяют уравнениям (1)-(3).

Решение задачи с неоднородными граничными условиями, зависящими от времени, $v_i(r, t)$ может быть определено интегралом Дюамеля [2, 3]:

$$v_i(r, t) = \int_0^t \frac{\partial}{\partial \tau} \dot{v}_i(r, \tau, t - \tau) d\tau, \quad \text{при } t > 0, \quad (6)$$

где $\dot{v}_i(r, \tau, t)$ - решение задачи при условии, что t является параметром.

В соответствии с полученным нами решением функции $v_i(r, t)$ имеют вид:

$$v_i(r, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \left[-\mu_{i,m}^2 a_i \int_0^t C_m(\tau) \exp(\mu_{i,m}^2 a_i \tau) d\tau \right] \dot{F}_{i,m}(\mu_{i,m} r) \exp(-\mu_{i,m}^2 a_i t), \quad (7)$$

где $\dot{F}_{i,m}(\mu_{i,m} r)$ - собственные функции задачи.

$$\dot{F}_{i,m}(\mu_{i,m} r) = \left[\prod_{k=1}^i Z_k \right] \times [Y_1(\mu_{i,m} r) + B_{i,m} Y_2(\mu_{i,m} r)], \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

$$B_{1,m} = -\frac{Y_1(\mu_{1,m} x_0) + h_1 Y_1'(\mu_{1,m} x_0)}{Y_2(\mu_{1,m} x_0) + h_2 Y_2'(\mu_{1,m} x_0)}, \quad (9)$$

$$B_{i,m} = \frac{\lambda_i \frac{Y_1'(\mu_{i,m} x_{i-1})}{Y_1(\mu_{i,m} x_{i-1})} - \lambda_{i-1} \frac{Y_1'(\mu_{i-1,m} x_{i-1}) + B_{i-1} Y_2'(\mu_{i-1,m} x_{i-1})}{Y_1(\mu_{i-1,m} x_{i-1}) + B_{i-1} Y_2(\mu_{i-1,m} x_{i-1})}}{\lambda_i \frac{Y_2'(\mu_{i,m} x_{i-1})}{Y_2(\mu_{i,m} x_{i-1})} - \lambda_{i-1} \frac{Y_1'(\mu_{i-1,m} x_{i-1}) + B_{i-1} Y_2'(\mu_{i-1,m} x_{i-1})}{Y_1(\mu_{i-1,m} x_{i-1}) + B_{i-1} Y_2(\mu_{i-1,m} x_{i-1})}} \times \frac{Y_1(\mu_{i,m} x_{i-1})}{Y_2(\mu_{i,m} x_{i-1})}, \quad (10)$$

$i = 2, 3, \dots, n.$

$$Z_1 = 1, \quad Z_i = \frac{Y_1(\mu_{i-1,m} x_{i-1}) + B_{i-1} Y_2(\mu_{i-1,m} x_{i-1})}{Y_1(\mu_{i,m} x_{i-1}) + B_i Y_2(\mu_{i,m} x_{i-1})}, \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (11)$$

$\mu_{i,m} = \mu_{n,m} \sqrt{a_n / a_i}$, $\mu_{n,m}$ - собственные числа задачи, определяемые согласно уравнению

$$Y_1(\mu_{n,m} x_n) + h_2 Y_1'(\mu_{n,m} x_n) + B_{n,m} Y_2(\mu_{n,m} x_n) + h_2 Y_2'(\mu_{n,m} x_n) = 0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (12)$$

$$C_m(\tau) = - \left[\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{a_i} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \psi_i(r, \tau) G(r) \dot{F}_{i,m}(\mu_{i,m} r) dr \right] / \sum_{i=1}^n j_i^2, \quad (13)$$

$$\psi_i(r, \tau) = \varphi_1(\tau) + [\dot{\alpha}_i(\tau) \varphi_2(\tau) - \varphi_1(\tau)] \times [\xi(r) + \dot{\beta}_i(\tau)], \quad (14)$$

$$\dot{\beta}_i(\tau) = -[\xi(x_0) + h_1 \xi'(x_0)] = 0, \quad \dot{\beta}_i(\tau) = \frac{\lambda_i}{\lambda_{i-1}} [\xi(x_{i-1}) + \dot{\beta}_{i-1}] - \xi(x_{i-1}), \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (15)$$

$$\dot{\alpha}_i = \frac{\lambda_n}{\lambda_{i+1}} \times \frac{1}{\xi(x_n) + \dot{\beta}_n(\tau) + h_2 \xi'(x_n)}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (16)$$

$$j_i^2 = \frac{\lambda_i}{a_i} \int_{x_{i-1}}^{x_i} G(r) \dot{F}_{i,m}^2(\mu_{i,m} r) dr \quad (17)$$

Таким образом, решение системы (1)-(4) однозначно определяется выражениями (5)-(17). Весовая функция $G(r)$ и функции $\xi(r)$, $Y_1(\mu_i r)$ и $Y_2(\mu_i r)$ в различных системах координат определяются приведенными ниже выражениями (18)-(20).

Весовая функция $G(r)$, а также вид функций $\xi(r)$, $Y_1(\mu_i r)$ и $Y_2(\mu_i r)$ в Декартовой (прямоугольной) системе координат

$$G(r) = 1, \xi(r) = r, Y_1(\mu_i r) = \sin(\mu_i r), Y_2(\mu_i r) = \cos(\mu_i r). \quad (18)$$

Весовая функция $G(r)$, а также вид функции $\xi(r)$, $Y_1(\mu_i r)$ и $Y_2(\mu_i r)$ в сферической системе координат

$$G(r) = r^2, \xi(r) = \frac{1}{r}, Y_1(\mu_i r) = \frac{1}{r} \sin(\mu_i r), Y_2(\mu_i r) = \frac{1}{r} \cos(\mu_i r). \quad (19)$$

Весовая функция $G(r)$, а также вид функции $\xi(r)$, $Y_1(\mu_i r)$ и $Y_2(\mu_i r)$ в цилиндрической системе координат

$$G(r) = r, \xi(r) = \ln r, Y_1(\mu_i r) = J_0(\mu_i r), Y_2(\mu_i r) = N_0(\mu_i r). \quad (20)$$

Список литературы

1. Вендин С.В. К расчету нестационарной теплопроводности в многослойных объектах при граничных условиях третьего рода // ИФЖ, 1993. - Т.65, №2. - С.249-251.
2. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел: Учеб. Пособие. - Изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 2001. — 550 с.: ил. — ISBN 5-06-004091-7
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1984. - 835 с.: ил.

УДК 66.047

**КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СУШКИ КАПЕЛЬ
ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ
KINETIC FEATURES OF DRYING OF DISPERSED DROPS
OF LIQUID PRODUCTS ON SUBSTRATES**

Андрей Н. Пахомов*, Наталия Ц. Гатапова,
Юлия В. Пахомова***
Andrew N. Pakhomov*, Natalya Ts. Gatapova**,
Yulia V. Pakhomova*****

**Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,
(e-mail: panpost@yandex.ru).*

*** Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,
(e-mail: postmaster@gzpril.tstu.ru).*

**** Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,
(e-mail: puvdom@yandex.ru)*

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

Аннотация: Статья посвящена описанию некоторых кинетических особенностей процесса сушки капель жидких дисперсных продуктов (на примере жидкой послеспиртовой барды и пластификатора бетона) на подложках при различных режимах сушки. Отмечено влияние возникающих в процессе сушки явлений структурообразования на характер термограмм. Приведены основные гипотезы, объясняющие влияние структурообразования на вид термограммы.

Abstract: The article describes some of the kinetic features of the process of drying of dispersed drops of liquid products (for example, liquid DDGS and plasticizer concrete) on substrates with different modes of drying. The influence arising in the process of drying phenomena of structure formation on the nature of thermograms is given. Presented the main hypothesis to explain the mechanism of formation of thermograms.

Ключевые слова: сушка, капля, подложка, термограмма, площадка, теплоподвод, структурообразование

Keywords: drying, droplet, substrate, thermogram, heat supply, gelation.

Для выявления механизма процесса сушки капель жидких дисперсных продуктов нами была исследована кинетика сушки жидкой послеспиртовой барды и жидкого пластификатора бетона, нанесенных в виде капель на горизонтальные диффузионно-непроницаемые подложки, в диапазоне скоростей и температур сушильного агента, характерных для промышленных сушилок. Высушиваемые продукты являются сложными дисперсными системами, твердая фаза которых состоит из частиц размером от 0.1 до 250 мкм в определенном соотношении, а жидкая представляет собой истинный раствор. Влажность исследуемых продуктов составляет от 86% (пластификатор) до 92% (барда). Фракционный состав жидкой послеспиртовой барды более неоднороден: доля крупных частиц (размером от 10 до 250 мкм) может составлять до 30% [1]. Жидкий пластификатор практически представляет собой коллоидный раствор с размером частиц от 0.1 до 1 мкм.

Исследования проводились на специально разработанной экспериментальной установке, позволяющей наносить и высушивать капли жидкости весом от 0.01 до 0.2 г, с контролем температуры, веса, формы, размера и цвета поверхности в процессе сушки. Диапазон исследуемых температур сушильного агента составил от 40 до 200 °С, диапазон скоростей обдува – от 1 до 7 м/с. Отдельно исследовалась кинетика сушки капель при кондуктивном теплоподводе к подложке [2, 3].

Как следует из анализа кривых сушки и термограмм, характерной особенностью кинетики сушки капель исследуемых продуктов является деформация (фактически вырождение) площадки мокрого термометра, характеризуемая монотонным ростом температуры высыхающей капли, с увеличением температуры сушильного агента. Следует отметить, что практически на всех режимах классической постоянной по температуре площадки мокрого термометра не наблюдается. Соответственно наблюдается и уменьшение интенсивности испарения влаги с поверхности высыхающей капли уже в первом периоде [3].

При сушке на подложках при конвективном и кондуктивном теплоподводе наблюдается принципиальная разница в поведении капли воды и исследуемых жидких дисперсных продуктов. При этом характерной особенностью является то, что для всех режимов сушки исследуемых продуктов наблюдается постоянство положения линии контакта жидкость–твердое тело во времени. Для высыхающей на подложке капли воды такого постоянства положения линии контакта жидкость–твердое тело во времени нет.

Проведенными исследованиями выявлено образование на поверхности высыхающей капли определенной структуры — тонкой пленки. Это явление хорошо визуально наблюдается при анализе видеосъемки поверхности высыхающей капли с разных углов зрения. Тонкая пленка на поверхности высушиваемой капли формируется при всех исследованных режимах сушки. При этом на термограмме в районе первого периода сушки, наблюдается наличие характерной точки перегиба. Эта точка перегиба отмечается при всех исследованных режимах сушки и характеризует начало монотонного роста температуры образца уже в первом периоде сушки. Обработка экспериментальных данных выявила, что появление на термограмме точки перегиба соответствует окончанию формирования пленки на поверхности высыхающей капли [5, 6].

Снижение интенсивности испарения, вызываемое образованием пленки, а затем и твердой корки, компенсируется увеличением температуры поверхности, что наблюдалось во всех без исключения экспериментах при вырождении 1-й температурной площадки. Положение точки перегиба, предшествующей и последующей точек максимальной кривизны температурной кривой определено связаны с рассчитываемой температурой мокрого термометра и могут использоваться для идентификации температурно-влажностных зависимостей и выявления типа кинетической кривой, формируемой в процессе сушки капли жидкой дисперсной системы на подложке [4]. Связь типа кривой с режимом сушки и свойствами высушиваемого материала дает возможность прогнозирования типа кинетической кривой для заданной жидкости, что позволяет проводить расчет кинетики сушки жидких дисперсных систем на подложках [7].

Список литературы

1. Пахомова, Ю.В. Кинетика сушки капель жидких дисперсий на диффузионно-непроницаемых подложках: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08: защищена 23.12.2011 : утв. 23.12.2012 / Пахомова Юлия Владимировна. – Тамбов, 2011. – 283 с.
2. Пахомов, А.Н. Кинетика сушки дисперсий на твердых подложках : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена : 16.03.2001 / Пахомов Андрей Николаевич. – Тамбов, 2000. – 225 с.
3. Пахомов, А.Н. Сушка капель жидких дисперсных продуктов [текст] / А.Н. Пахомов, Ю.В. Пахомова – М.: Издательство «Перо», 2013. – 122с.
4. Гатапова, Н.Ц. Кинетика и моделирование процессов сушки растворителей, покрытий, дисперсий, растворов и волокнистых материалов: единый подход : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 : защищена 10.06.2005 / Гатапова Наталья Цибиковна. – Тамбов, 2005. – 554 с.
5. Пахомова, Ю.В. Особенности механизма и кинетики сушки капель дисперсий (на примере сушки послеспиртовой барды) / Ю.В. Пахомова, В.И. Коновалов, А.Н. Пахомов // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 70–82.

6. Коновалов, В.И. Геометрия, циркуляция и тепломассоперенос при испарении капли на подложке/ В.И. Коновалов, А.Н. Пахомов, Ю.В. Пахомова// Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 371–387.

7. Пахомов, А.Н. Типы кинетических кривых, получаемых при сушке капель жидких дисперсных продуктов/ А.Н. Пахомов, Ю.В. Пахомова // Химическая технология. 2014. № 10. С. 620–623.

УДК 636.085

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ СУСПЕНЗИИ ПРОТЕИНОВОГО ЗЕЛЁНОГО КОНЦЕНТРАТА (ПЗК) **ANALYTICAL STUDY OF GREEN PROTEIN SUSPENSION CONCENTRATE (PGC) SPRAY DRYING PROCESS**

А.А. Шевцов*, А.В. Дранников, А.А. Коротаева***, А.С. Муравьев******
A.A. Shevtsov*, A.V. Drannikov, A.A. Korotaeva***, A.S. Muravev******

**Воронежский государственный университет инженерных технологий,
 Россия, Воронеж
 (email:shevalol@rambler.ru)*

***Воронежский государственный университет инженерных технологий,
 Россия, Воронеж
 (email:drannikov@list.ru)*

****Воронежский государственный университет инженерных технологий,
 Россия, Воронеж
 (email:alisa-korotaeva@mail.ru)*

*****Воронежский государственный университет инженерных технологий,
 Россия, Воронеж
 (email: 79204104299@yandex.ru)*

Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh

Аннотация: Рассмотрена постановка математической модели распылительной сушки суспензии протеинового зелёного концентрата. Получены уравнения для определения коэффициентов конвективного тепло- массопереноса в период постоянной и убывающей скорости сушки.

Abstract: Formulation of green protein suspension spray-drying mathematical model are considered. Equations for coefficients of convective heat and mass transfer between constant and decreasing drying rate determining are obtained.

Ключевые слова: кормопроизводство, протеиновый зелёный концентрат, распылительная сушка, математическое моделирование, уравнения тепломассопереноса.

Keywords: forage production, green protein concentrate, spray drying, mathematical modeling.

В последние годы наблюдается возросший интерес к математическому моделированию процессов, связанных с тепло- массопереносом частиц. Одним из таких направлений является распылительная сушка, которая широко распространена в разных отраслях промышленности и используется для получения мелкодисперсных частиц путём быстрого испарения влаги распыляемой жидкости. Распылительная сушка включает сложные многофазные явления переноса между сушильным агентом, каплями и частицами. Таким образом, исключительно экспериментальные исследования являются недостаточными, чтобы понять физику процесса, предсказать параметрическое поведение капли и оптимизировать энергоёмкий процесс распылительной сушки. В настоящее время

мы отмечается значительный недостаток отечественного кормового белка. Для решения этой проблемы разработана ресурсосберегающая технология производства протеинового зелёного концентрата (ПЗК) из листостебельной массы высокобелковых растений [1, 2].

Процесс распылительной сушки состоит из двух периодов, – постоянной скорости сушки и убывающей скорости сушки. Рассмотрим постановку задачи математического моделирования для двух периодов сушки единичной капли суспензии ПЗК[3].

Дифференциальные уравнения распылительной сушки в период постоянной скорости:

$$\forall \quad 0 < \xi < \xi_{\text{вн}}, \quad t > 0 \quad \alpha'_1 \frac{\partial T_{\text{св}}}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{\text{св}}}{\partial \xi^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_{\text{св}}}{\partial \xi}$$

MERGEFORMAT

Начальные и граничные условия уравнения :

$$\forall \quad 0 \leq \xi \leq \xi_{\text{вн}}, \quad t = 0 \quad T_{\text{св}} = T(0)$$

где T – температура, К.

$$\forall \quad \xi = 0, \quad t > 0 \quad -\lambda_{\text{св}} \frac{\partial T_{\text{св}}}{\partial \xi} = 0$$

$$\forall \quad \xi = \xi_{\text{вн}}, \quad t > 0 \quad T_{\text{св}} = T_{\text{в}}$$

$$\forall \quad \xi_{\text{вн}} < \xi < \xi_{\text{внеш}}(t), \quad t > 0 \quad \alpha'_2 \frac{\partial T_{\text{в}}}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{\text{в}}}{\partial \xi^2} + \frac{2}{\xi} \frac{\partial T_{\text{в}}}{\partial \xi}$$

MERGEFORMAT

Начальные и граничные условия уравнения :

$$\forall \quad \xi_{\text{вн}} \leq \xi \leq \xi_{\text{внеш}}(t), \quad t = 0 \quad T_{\text{в}} = T(0)$$

$$\forall \quad \xi = \xi_{\text{вн}}, \quad t > 0 \quad -\lambda_{\text{св}} \frac{\partial T_{\text{св}}}{\partial \xi} = -\lambda_{\text{св}} \frac{\partial T_{\text{в}}}{\partial \xi}$$

$$\forall \quad \xi = \xi_{\text{внеш}}(t), \quad t > 0 \quad L_{\text{в}} \frac{\partial \xi_{\text{внеш}}}{\partial \xi} = \alpha'_3 (T_{\text{в}} - T_{\text{св}}) + \alpha'_4 \frac{\partial T_{\text{в}}}{\partial \xi}$$

$$\forall \quad \xi = \xi_{\text{внеш}}(t), \quad t > 0 \quad \frac{\partial \xi_{\text{внеш}}}{\partial t} = -\alpha'_5 (C_{\text{н}} - C_{\text{св}})$$

MERGEFORMAT

Начальное условие уравнения

$$\forall \quad \xi = \xi_{\text{внеш}}(t), \quad t = 0 \quad \xi_{\text{внеш}}(t) = 1$$

Уравнения второго периода сушки,

$$\forall \quad 0 < \xi < s'(t), \quad t > 0 \quad m'_1 \frac{\partial T_{\text{св}}}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{\text{св}}}{\partial \xi^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_{\text{св}}}{\partial \xi}$$

MERGEFORMAT

Начальные и граничные условия уравнения :

$$\forall \quad 0 \leq \xi \leq s'(t), \quad t = 0 \quad T_{\text{св}} = T(t)$$

$$\forall \quad \xi = 0, \quad t > 0 \quad -\lambda_{\text{св}} \frac{\partial T_{\text{св}}}{\partial \xi} = 0$$

$$\forall \quad \xi = s'(t), \quad t > 0 \quad T_{\text{св}} = T_{\text{во}}$$

$$\forall s'(t) < \xi < 1, t > 0 \quad m'_2 \frac{\partial T_{\text{во}}}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{\text{во}}}{\partial \xi^2} + \left(\frac{2}{\xi} + m'_3 \frac{\partial C_n}{\partial \xi} \right) \frac{\partial T_{\text{во}}}{\partial \xi} + \left(\frac{2m'_3}{\xi} + \frac{\partial C_n}{\partial \xi} + m'_3 \frac{\partial^2 C_n}{\partial \xi^2} \right) T_{\text{во}}$$

MERGEFORMAT

Начальные и граничные условия уравнения :

$$\begin{aligned} \forall s'(t) \leq \xi \leq 1, \quad t = 0 \quad & T_{\text{во}} = T(t) \\ \forall \xi = s'(t), \quad t > 0 \quad & L_b \frac{ds'}{dt} = -m'_4 \frac{\partial T_{\text{во}}}{\partial \xi} + m'_5 \frac{\partial T_{\text{св}}}{\partial \xi} \\ \forall \xi = 1, \quad t > 0 \quad & -\lambda_{\text{во}} \frac{\partial T_{\text{во}}}{\partial \xi} = R_{\text{вн}} \alpha (T_{\text{во}} - T_{\text{св}}) \\ \forall s'(t) < \xi < 1, \quad t > 0 \quad & m'_6 \frac{\partial C_n}{\partial t} = \frac{\partial^2 C_n}{\partial \xi^2} + \frac{2}{\xi} \frac{\partial C_n}{\partial \xi} \end{aligned}$$

MERGEFORMAT

Начальные и граничные условия уравнения :

$$\begin{aligned} \forall s(t) \leq \xi \leq 1, \quad t = 0 \quad & C_n = \frac{P^n(T(t))}{R_{\text{св}} T(t)} \\ \forall \xi = s'(t), \quad t > 0 \quad & C_n = \frac{P^n(T_{\text{во}})}{R_{\text{св}} T_{\text{во}}} \\ \forall \xi = 1, \quad t > 0 \quad & -D_{\text{во}} \frac{\partial C_n}{\partial \xi} = R_{\text{вн}} \beta (C_n - C_{\text{св}}) \\ \forall \xi = s'(t), \quad t > 0 \quad & \frac{ds'}{dt} = m'_7 \frac{\partial C_n}{\partial \xi} \end{aligned}$$

MERGEFORMAT

Начальное условие уравнения :

$$\forall \xi = s'(t), \quad t = 0 \quad s'(t) = 1$$

Решение полученных уравнений методом конечных разностей позволяет получить зависимости кривых сушки ПЗК и кривых нагрева (рисунок 1).

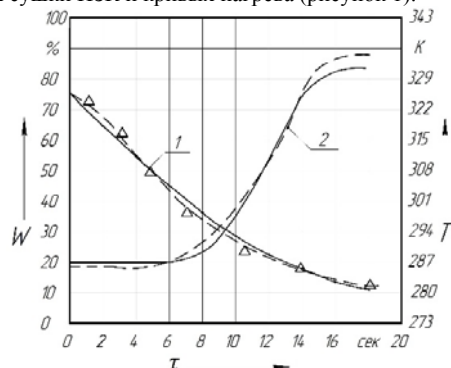


Рисунок 3 Сравнение расчетных и экспериментальных кривых сушки ПЗК и кривых нагрева при $T_{\text{св}} = 373\text{K}$, $W_{\text{н.пзк}} = 75\%$: 1 – кривые сушки ПЗК, 2 – кривые нагрева; – модель; - - эксперимент

Таким образом, решение данной модели позволяет определять изменение влажности и температуры по радиусу капли в процессе распылительной сушки концентрата ПЗК, что необходимо как для выбора геометрических размеров сушилки, так и для управления технологическими параметрами сушки.

Обозначения:

α – коэффициент теплопередачи, Вт/м²К; ξ – безразмерное расстояние; ε – объемная доля воды в области твердых веществ; ρ – плотность, кг/м³; C – теплоемкость, Дж/кг; λ – теплопроводность, Вт/м·К; L – скрытая теплота парообразования; m – коэффициент массопереноса Дж; $s'(t)$ – безразмерный радиус области связанной влаги; C – концентрация водяного пара. Индексы: v, m и mv – влага, твердые вещества и область твердых частиц; $внеш$ – внешнее расстояние капли; $n, ca, см$ – пар, сушильный агент, смесь пара и сушильного агента; $во, св$ – высушенная область, связанная влага.

Список литературы

1. Дерканосова А.А., Коротаева А.А. Перспективы использования протеинового зеленого концентрата (ПЗК) в кормопроизводстве // Наука и технологии в современном обществе, материалы Международной научно-практической конференции: в 2 частях. Уфа. – 2014. – С. 142-143.
2. Пат. № 2528027 РФ, МПК А23К 1/14 Способ комплексной переработки протеинсодержащих зеленых растений [Текст] / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, А. А. Дерканосова, А. И. Ключников, А. А. Коротаева; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т инж. технол. - № 2013117658/13; заявл. 16.04.13; опубл. 10.09.14, Бюл. № 25.
3. Моделирование процесса распылительной сушки суспензии протеинового зеленого концентрата (ПЗК) [Текст] / А.А. Шевцов, А.А. Дерканосова, А.А. Коротаева, А.С. Муравьев // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2015. – №1 (63). – С.51–57.

УДК 66.083.4

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПАРОВЗРЫВНОЙ
ОБРАБОТКИ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО МАТЕРИАЛА
MATHEMATICAL MODELING OF STEAM EXPLOSION TREATMENT
OF LIGNOCELLULOSIC MATERIAL**

**Д.Б. Просвирников, И.Р. Ахметшин, Д.Ш. Гайнуллина, Т.Д. Просвирникова
D.B. Prosvirnikov, I.R. Ahmetshin, D.Sh. Gainullina, T.D. Prosvirnikova**

*Казанский научно-исследовательский технологический университет, Россия, Казань
(e-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru)
Kazan national research technological university, Russia, Kazan*

Аннотация: Описана математическая модель процесса паровзрывной обработки лигноцеллюлозного материала.

Abstract: The mathematical model of steam explosion treatment of lignocellulosic material is described.

Ключевые слова: целлюлоза, лигнин, паровзрывной метод, математическая модель.

Keywords: cellulose, lignin, steam explosion, mathematical model.

Паровзрывная обработка может применяться в процессах получения технической целлюлозы, сахаров и лигнина практически в чистом виде, пригодном для дальнейшей переработки в ценные продукты, такие как порошковая целлюлоза, фильтрующие материалы [2], сельскохозяйственные корма, биопластики [3]. Основными стадиями данного процесса являются: 1) пропитка лигноцеллюлозного материала водой или раствором кислоты; 2) термообработка и физико-химические превращения в реакторе высокого давления; 3) разгерметизация системы; 4) выгрузка пара и волокнистого полуфабриката из реактора.

Стадия предварительной пропитки описывается уравнением влагопереноса:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = k_m \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$U(0, x) = U_{\text{нач}} \quad (2)$$

и граничными условиями:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=0} = - \frac{j_{\text{ж}}}{k_m \cdot \rho_{\text{одп}}} \quad (3)$$

Стадия термообработки паром описывается общеизвестными уравнениями.

Изменение давления в реакторе при подаче насыщенного пара:

$$\frac{dp_n}{d\tau} = Q_{\text{пр}} \cdot \rho_{\text{н.пг.}} \cdot \frac{R \cdot T_{\text{п}}}{M_{\text{н}} \cdot V_{\text{р}}} \quad (4)$$

Изменение температуры материала при нагреве паром [1]:

$$\frac{dt_{\text{мат}}(x, \tau)}{d\tau} = a_x \cdot \frac{\partial^2 t_{\text{мат}}(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (5)$$

с начальными условиями:

$$T_{\text{сл}}(0, x) = T_{\text{нач}} \quad (6)$$

и граничными условиями:

$$r_t j_{\text{к}} = -\lambda_{\text{сл}} \left. \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (7)$$

Изменение массы конденсата, образующегося на поверхности частицы:

$$\frac{dm_{\text{к}}}{d\tau} = - \frac{\alpha_{\text{к}} \cdot \pi \cdot d_{\text{р}} \cdot H \cdot (t_{\text{пов}} - t_{\text{мат}})}{r_t} \quad (8)$$

где

$$\alpha_{\text{к}} = 2,04 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{ж}}^3 \cdot \rho_{\text{ж}}^2 \cdot g}{\mu_{\text{ж}}}} \cdot \left(\frac{r_t}{L \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{мат}})} \right)^{0,25} \quad (9)$$

Уравнение скорости гидролиза гемицеллюлоз:

$$\frac{dC_{\text{хгмц}}}{d\tau_{\text{обр}}} = k_{\text{Г}} \cdot C_{0\text{гмц}} \cdot e^{-k_{\text{Г}} \cdot \tau_{\text{пр}}} \quad (10)$$

Уравнение сохранения массы лигнина:

$$\frac{dC_{\text{хлиг}}}{d\tau_{\text{обр}}} = -k_2 \cdot C_{0\text{лиг}} \cdot m_{\text{сух}} \quad (11)$$

Жидкость, находящаяся в материале после пропитки, приходит в состояние термодинамического равновесия с паром, то есть перегревается. Продукты гидролиза являются центрами паороборазования (вскипания). Стадия разгерметизации системы и выгрузки продукта описывается следующими уравнениями.

Рост пузырька в объеме перегретой жидкости при сбросе давления запишется с использованием уравнения Рэлея:

$$\frac{dr}{d\tau} = \left\{ \frac{2}{\rho' r^3} \int_0^{\tau} r^2 \frac{dr}{d\tau} [p'' - p'] dt \right\}^{1/2} \quad (12)$$

Давление на поверхности пузырька равно:

$$p = p_0 + \frac{\rho_0 R_0^2}{3} \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{2/3} \left[\frac{11}{6} \left(\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\tau} \right)^2 - \frac{d^2 \rho}{d\tau^2} \right] \quad (13)$$

Плотность пара внутри пузырька:

$$\rho(\tau) = \rho_0 [1 - \beta T - (1 - \frac{\rho''}{\rho'}) v''] \quad (14)$$

Скорость роста объема пузырька, возникшего в момент времени t :

$$\frac{dv}{d\tau} = kb[p(\tau)](\tau - t)^{k-1} \quad (15)$$

Таким образом, чем больше скорость сброса давления (т. е. чем меньше время сброса), тем больше будет частота образования центров вскипания J в перегретой жидкости, находящейся внутри лигноцеллюлозного материала.

$$\ln J = 88 - G \quad (16)$$

где $G = \frac{W_*}{RT}$ – свободное число Гиббса, W_* – работа образования критического пузырька:

$$W_* = \frac{16\pi\sigma^3}{3(p_s - p')^2(1 - v'/v'')^2} \quad (17)$$

Таким образом, с уменьшением времени перепада давления, увеличивается интенсивность парообразования, количество расширяющегося внутри материала пара, и, следовательно, запасенная перегретой жидкостью энергия.

Средняя скорость выхода продукта при разгерметизации реактора:

$$v_{\text{вых.ср.}} = 91,5 \cdot \sqrt{p_{\text{н}} \cdot V_{\text{р}} - V_{\text{кон}} \cdot p_{\text{атм}}} \quad (18)$$

Изменение давления при открытии сбросного клапана реактора:

$$dp_{\text{кон}} = -\xi \cdot \frac{\rho_{\text{н}} \cdot v_{\text{вых.ср.}}^2 \cdot S_{\text{к}}}{S_{\text{апп}}^2} dS_{\text{к}} \quad (19)$$

Нестационарная фильтрация пара внутри частицы опишется уравнением:

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = \frac{n_{\text{к}}}{m_{\mu}} p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (20)$$

с граничными $p|_{x=0} = \varphi(t)$ (21) и начальными условиями $p|_{t=0} = \psi(x)$ (22).

Явления вскипания перегретой жидкости, находящейся внутри капиллярно-пористого материала, при сбросе давления весьма сложно охарактеризовать, однако, понимание механизма взрывного вскипания дает представление о характере разрушения такого материала [4].

Изменение растягивающего усилия в частице:

$$dF_{\text{разр.}} = \frac{E \cdot V_1}{\sigma_{\text{р}} \cdot a_{\text{ч}} \cdot \Pi} dp \quad (23)$$

Условие разрыва частицы:

$$\Delta P \geq \frac{\sigma_{\text{р}}^2 \cdot V_{\text{ч}} \cdot \Pi}{E \cdot V_1} \quad (24)$$

Удельная поверхность получаемого продукта:

$$\bar{A}_{уд} = f(\Delta P, \tau_{дек}) \quad (25)$$

В уравнениях (1), (5), (10), (11), (23), (25) величины k_m , a_x , k_Γ , k_2 , σ_p , $\bar{A}_{уд}$ определяются экспериментальным путем. Результаты математического моделирования, как и экспериментальные исследования, хорошо согласуются и представлены в [4]. Разработанная математическая модель может быть использована при технологических расчетах процессов переработки древесных отходов паровзрывным методом.

Список литературы

1. Тимербаев, Н.Ф. Утилизация твердых отходов деревопереработки, содержащих токсичные вещества / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 4. – С. 79-83.
2. Просвирников Д.Б. Получение фильтрующего материала на основе порошковой целлюлозы / Просвирников Д.Б., Ахметшин И.Р. // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 3-2 (8-2). С. 411-414.
3. Тунцев Д.В. Биопластики на основе лигнина / Д.В. Тунцев, И.Н. Ковернинский, Ф.М. Филиппова, Р.Г. Хисматов, М.Р. Хайруллина, И.Ф. Гараева // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 15. Т17-С. 192-194.
4. Просвирников Д.Б. Совершенствование техники и технологии процесса высокотемпературной паровзрывной обработки древесных отходов: дисс. ... канд. тех. наук: Д.Б. Просвирников – Казань, 2013. – 209 с.

УДК 66.096.5

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ МАТЕРИАЛА И СУШИЛЬНОГО АГЕНТА В АППАРАТЕ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ THEORETICAL STUDY OF THE MOISTURE CONTENT OF MATERIAL AND DRYING AGENT IN THE APPARATUS WITH FLUIDIZED BED

А.В. Бараков*, А.П. Бырдин**, А.А. Надеев***
A.V. Barakov*, A.P. Byrdin**, A.A. Nadeyev***

*Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж,
(e-mail: pt_vstu@mail.ru).

**Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж.
***Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж,
(e-mail: alekn85@mail.ru).

Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh

Аннотация: В статье на основе полуэмпирической модели процесса массопереноса при сушке в центробежном псевдоожигенном слое получены аналитические соотношения для определения влагосодержания дисперсного материала и сушильного агента в периоде падающей скорости, критического влагосодержания материала и продолжительности периода постоянной скорости сушки.

Abstract: In article obtained analytical expressions for determination of moisture content of loose material and drying agent in the falling-rate period, critical moisture content of material and the length of the constant-rate period on the basis of semi-empirical model of the mass transfer process during drying in a centrifugal fluidized bed.

Ключевые слова: массоперенос, влагосодержание, псевдоожигенный слой, сушильный агент, дисперсный материал.

Keywords: mass transfer, moisture content, fluidized bed, drying agent, loose material.

Согласно работе [1] весь процесс высушивания можно разделить на два основных периода: постоянной скорости сушки (первый) и падающей скорости сушки (второй). Получим временные зависимости влагосодержания фаз центробежного псевдоожигенного слоя (дисперсного материала и сушильного агента) для этих периодов.

Принятая в работе математическая модель относится к классу полуэмпирических. В качестве базовых уравнений модели выбраны соотношения баланса влаги для материала и сушильного агента [2, 3], а также эмпирические соотношения А.В. Лыкова [1]. Принимаются также упрощающие допущения, указанные в работе [4].

Дифференциальные уравнения модели процесса массообмена, вытекающие из соотношений баланса массы по влаге в материале и теплоносителе, можно представить в виде [4]:

$$\begin{cases} \dot{\bar{W}}(\tau) = \hat{B} \cdot \bar{W}(\tau) + \bar{b}, \\ \bar{W}(0) = \bar{0}, \end{cases} \quad (1)$$

где точка над буквой обозначает дифференцирование по безразмерной переменной $\tau = j \cdot (\tau' - \tau'_{кр})$; τ' - время сушки, с; $\tau'_{кр}$ - время, соответствующее критическому влагосодержанию материала w_{10} , с;

$$\bar{W}(\tau) = \text{colon}(W_1(\tau), W_2(\tau)), \quad W_k(\tau) = w_k(\tau) - w_{k0}, \quad w_{k0} = w_k(0) \quad (k = 1, 2);$$

$$\bar{0} = \text{colon}(0, 0), \quad \bar{b} = \text{colon}\left(-\frac{k \cdot S_1}{j}(w_{10} - w_{1p}), 0\right),$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} -\beta & 0 \\ -\frac{1}{\gamma} \frac{G_1}{G_2} & -\frac{1}{\gamma} \end{bmatrix}; \quad \beta = \frac{G_1 + kF_1}{G_2}; \quad \gamma = \frac{M_2}{M_1}; \quad S_1 = \frac{F_1}{M_1}; \quad j = \frac{G_2}{M_1}.$$

Здесь M_1, M_2 – масса материала и сушильного в слое, кг; G_1, G_2 – массовый расход материала и сушильного агента, кг/с; w_1, w_2 – влагосодержание материала и газа, кг/кг; w_{1p} – равновесное влагосодержание материала, кг/кг; k – интенсивность сушки, кг/(с · м²); F_1 – площадь поверхности дисперсного материала в слое, м².

Из вида матрицы \hat{B} следует, что могут реализоваться два типа решения уравнения (1) в зависимости от величины отношения параметров $(G_1/M_1 + k \cdot S_1)$ и (G_2/M_2) . В том случае, когда это отношение отличается от единицы, решение уравнения (1) имеет вид:

$$W_1(\tau) = -W_{11} \cdot (1 - e^{-\beta \cdot \tau}); \quad W_2(\tau) = W_{21} \frac{(1 - e^{-\beta \cdot \tau}) - \gamma \cdot \beta (1 - e^{-\tau/\gamma})}{1 - \gamma \cdot \beta}, \quad (2)$$

$$W_{11} = \frac{k \cdot S_1 \cdot w_{10} - w_{1p}}{j \cdot \beta}; \quad W_{21} = \frac{G_1}{G_2} \cdot W_{11}$$

где

Если отношение указанных параметров равно единице, получаем решение уравнения (1) в виде:

$$W_1(\tau) = -W_{12} \cdot (1 - e^{-\tau/\gamma}); \quad W_2(\tau) = W_{22} \cdot \left(1 - \left(\frac{\tau}{\gamma} + 1 \right) e^{-\tau/\gamma} \right), \quad (3)$$

$$W_{12} = \gamma \cdot \frac{k \cdot S_1}{j} \cdot (w_{10} - w_{1p}); \quad W_{22} = \frac{G_1}{G_2} \cdot W_{12}$$

где

Для определения влагосодержания w_{10} и времени τ_{kp} запишем уравнения кривых скорости сушки для первого и второго периодов, модифицированные на случай направленного перемещения материала. Из первого дифференциального уравнения системы (1) для влагосодержания материала во втором периоде сушки и аналогичного уравнения, описывающего изменение влагосодержания материала в первом периоде, учитывая условия их гладкого сопряжения, имеем:

$$dw_1(\tau)/d\tau = \begin{cases} -\frac{G_1}{G_2} (w_1(\tau) - w_{1n}) - N_0, & 0 \leq \tau \leq \tau_{kp}; \\ -\left(\frac{G_1}{G_2} - K_0 \right) (w_1(\tau) - w_{10}) - K_0 (w_{10} - w_{1p}), & \tau_{kp} \leq \tau, \end{cases}$$

$$w_1(0) = w_{1n}, \quad \lim_{\tau \rightarrow \tau^{*-}} w_1(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow \tau^{*+}} w_1(\tau), \quad \lim_{\tau \rightarrow \tau^{*-}} \frac{dw_1(\tau)}{d\tau} = \lim_{\tau \rightarrow \tau^{*+}} \frac{dw_1(\tau)}{d\tau}. \quad (4)$$

Здесь $N_0 = N/j$; $K_0 = K/j = k \cdot S_1/j$; N – скорость сушки в первом периоде, с⁻¹; K – коэффициент сушки во втором периоде, с⁻¹; w_{1n} – влагосодержание материала в начале процесса сушки; $\tau = j \cdot \tau'$.

Параметры τ_{kp} и w_{10} определяются в результате интегрирования дифференциального уравнения (4) и применения условий сращения левого и правого решений. Решение (4) имеет вид:

$$w_{10} = w_{1n} - N_0 \frac{G_2}{G_1} \left[1 - \exp \left(-\frac{G_1}{G_2} \tau_{kp} \right) \right]. \quad (5)$$

Из условия непрерывности производной получаем выражение для определения продолжительности первого периода сушки в безразмерном виде:

$$\tau_{kp} = \frac{G_2}{G_1} \ln \left[1 + \frac{G_1}{G_2} \cdot \frac{\tau_{kp}^0}{1 - \left(\tau_{kp}^0 + \frac{1}{K_0} \right) \frac{G_1}{G_2}} \right], \quad (6)$$

где τ_{kp}^0 – продолжительность первого периода сушки в слое без учёта направленного перемещения материала в безразмерном виде,

$$\tau_{kp}^0 = \frac{w_{1n} - w_{1p}}{N_0} - \frac{1}{K_0}. \quad (7)$$

Необходимо отметить, что ограничения на применимость выражений (5) и (6) вытекают из принятой феноменологической модели для изменения влагосодержания материала, опирающейся на эмпирические уравнения А.В. Лыкова. Последние же базируются на обработке большого массива экспериментальных данных.

Список литературы

1. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Шишацкий Ю.И., Бырбыткин В.А., Лавров С.В. Математическое описание процесса сушки дисперсных материалов в псевдооживленном слое // Вестник ВГТУ. 2006. Т. 2. № 6. С. 56-61.
3. Баумштейн И.П., Лыков А.В., Людмирский М.И., Майзель Ю.А. Исследование сушильных установок с помощью математического моделирования // Тепло- и массоперенос в процессе сушки и термообработки: сб. ст. Минск: Наука и техника, 1970. С. 53-79.
4. Надеев А.А., Агапов Ю.Н., Бырдин А.П. Процессы тепло- и массопереноса в псевдооживленном слое для второго периода сушки // Вестник ВГТУ. 2012. Т. 8. № 11. С. 132-137.

УДК 674.04

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА
ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PROCESS TERMOMODIFICATION
WOOD RAW MATERIAL IN THE PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIALS**

**Руслан Р. Хасаншин, Ралия Т. Хасаншина
Ruslan R. Khasanshin, Raliya T. Khasanshina**

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия,
Казань*

(e-mail: olambis@rambler.ru)

Kazan national research technological university, Russia, Kazan

Аннотация: В статье представлено математическое описание процесса термомодифицирования древесного сырья для создания влагостойкой фанеры. Использован В-план второго порядка с полными факторными планами в ортогональной части.

Abstract: The article presents a mathematical description of the process of termomodification raw wood to create plywood. Used In plan of the second order with a complete factorial plans into orthogonal parts.

Ключевые слова: Древесно-композиционный материал, математическая модель, степень термомодифицирования, влагостойкая фанера, шпон.

Keywords: Wood-composite material, mathematical model, the degree of termomodification, water-resistant plywood, veneer.

В последние годы можно наблюдать возрастающий интерес к улучшению качества пиломатериалов при помощи термообработки. При этом, как известно термомодифицированная древесина благодаря изменениям, прошедшим с ней на молекулярном, приобретает такие уникальные свойства, как повышенная водоотталкиваемость, низкая гигроскопичность. Кроме того, в последние годы активно ведутся исследования в области создания композиционных материалов на основе термомодифицированного древесного сырья [1].

В связи с этим следует считать актуальной задачу исследования процесса контактного термомодифицирования шпона с последующим изготовлением из нее влагостойкой фанеры.

Целью математического описания процесса термомодифицирования древесины является установление математической зависимости степени термомодифицирования березового шпона (Q) от температуры и времени обработки и от толщины образца [1].

Для математического описания процесса термомодифицирования лущеного шпона, был использован В-план второго порядка с полными факторными планами с помощью которых можно получить математическое описание объектов в виде полинома второго порядка [2].

Уравнение регрессии для трех факторной системы

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (1)$$

Из уравнения (1) определим зависимость выходной величины от каждого фактора.

Учитываемые факторы и их промежутки, а также степени и уровни варьирования при расчете процесса термомодифицирования березового шпона показаны в табл. 1.

Таблица 1. Учитываемые факторы и уровни их варьирования

Фактора	Обозначение		Интервалы	Уровень варьирования фактора		
	Натур.	Норм.		(-1)	13. (0)	14. (+1)
Продолжительность обработки, (мин)	τ	x_1	10	10	20	30
Температура обработки, °C	T	x_2	30	200	230	260
Толщина материала, мм	δ	x_3	0,5	1	1,5	2,0

Формулы, связывающие нормализованные и натуральные обозначения имеют вид:

$$x_1 = (\tau - 20)/10; x_2 = (T - 230)/30; x_3 = (\delta - 1,5)/0,5.$$

Матрица этого плана для нормализованных факторов приведена в табл. 2.

Таблица 2. Матрица планирования ПФЭ 2³

№ опыта	x_1	x_2	x_3	$Y_{\text{исп.н}}$	№ опыта	x_1	x_2	x_3	$Y_{\text{исп.н}}$
1	-1	-1	-1	0,35	8	+1	0	0	0,78
2	-1	-1	+1	0,18	9	0	-1	0	0,44
3	-1	+1	-1	0,84	10	0	+1	0	0,95
4	+1	-1	-1	0,61	11	+1	+1	+1	0,99
5	0	0	-1	0,72	12	+1	+1	-1	1
6	0	0	+1	0,65	13	+1	-1	+1	0,4
7	-1	0	0	0,44	14	-1	+1	+1	0,7

Таблица 3. Рассчитанные коэффициенты регрессии

Обозначение коэф-фициента регрессии	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{23}	b_{13}
Оценка коэф-фициента регрессии	0,6783	0,127	0,25	-0,06	-0,0681	-0,0169	-0,0069
Обозначение коэф-фициента регрессии	b_{11}	b_{22}	b_{33}				
Оценка коэф-фициента регрессии	-	0,02875	0,01125				

Рассчитанные коэффициенты регрессии приведены во второй строке табл. 3.

Рассчитываем оценки дисперсий и ковариаций коэффициентов регрессии:

$$s^2 \{ b_0 \} = (0,40624/3) \cdot 0,0036 = 0,0005; s^2 \{ b_i \} = (0,1/3) \cdot 0,0036 = 0,0001;$$

$$s^2 \{ b_{ij} \} = ((0,5 - 0,09375)/3) \cdot 0,0036 = 0,0005; s^2 \{ b_{ij} \} = (0,125/3) \cdot 0,0036 = 0,0001.$$

В соответствии с методикой оценки определено табличное значение t-критерия Стьюдента для числа степеней свободы $f_y=28$ [2] для $q=0,05$ найдено $t_{\text{табл}}=2,05$.

Для коэффициента b_0 имеем:

$$s \{ b_0 \} = (s^2 \{ b_0 \})^{1/2} = 0,0224; t_{\text{табл}} s \{ b_0 \} = 2,05 \cdot 0,0224 = 0,0459.$$

Множитель b_0 является значимым вследствие $b_0 \leq t_{\text{табл}} s \{ b_0 \}$.

После подстановки учитываемых факторов получено следующее уравнение регрессии:

$$Q = 0,6783 + 0,127x_1 + 0,25x_2 - 0,06x_3 + 0,0275x_2x_3 - 0,0169x_1^2 \quad (2)$$

В итоге проверки, созданной математической модели, были получены зависимости, которые представлены на рис. 1.

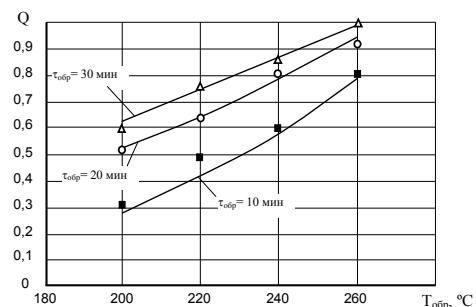


Рис. 1. Степень термомодифицирования шпона в зависимости от температуры обработки при толщине 0,95 мм

Полученная модель (2) позволяет прогнозировать процесс термомодифицирования шпона в зависимости от времени, температуры обработки и толщины материала. Из анализа уравнений регрессии следует, что при увеличении значений принятых переменных факторов увеличивается значения степени термомодифицирования.

Список литературы

1. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Ахметова Д.А. Исследование термомодифицирования древесины сосны в условиях вакуумно-кондуктивных аппаратов // Дизайн и производство мебели, 2008. – № 2. – С. 36-39.
2. Пижурич А.А. Пижурич А.А. Основы научных исследований в деревообработке: учебник для вузов, М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. – 305 с.

УДК 66.011: 678.675

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУШКИ ПОЛИАМИДА-6, СОВМЕЩЕННОЙ С УДАЛЕНИЕМ МОНОМЕРА MATHEMATICAL MODELING OF POLYAMIDE-6 DRYING COMBINED WITH MONOMER REMOVAL

Андрей А. Липин*, Александр Г. Липин**
Andrey A. Lipin*, Aleksandr G. Lipin**

*Ивановский государственный химико-технологический университет,
Россия, Иваново,
(e-mail: lipin.a@mail.ru).

** Ивановский государственный химико-технологический университет,
Россия, Иваново,
(e-mail: 157lipin@mail.ru).

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo

Аннотация: В статье предложена математическая модель процесса сушки гранулята полиамида-6, совмещенного с процессом удаления остаточного мономера из гранулята в одном аппарате. Рассматривается периодический процесс. Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать изменение содержания капролактама и воды в гранулах полиамида-6 и в газовой фазе, температуру полимера и газа.

Abstract: The mathematical model of drying polyamide-6 combined with monomer removal in one device is performed. The process in batch device is taking into account. The mathematical model developed allows predicting the change of caprolactam and water concentrations in polyamide-6 granules and in gas phase, and also the polymer and the gas temperatures.

Ключевые слова: математическая модель; полиамид-6; сушка; капролактam; деполимеризация.

Keywords: mathematical model; polyamide-6; drying; caprolactam; monomer removal.

Сушка является завершающей стадией технологического цикла в производстве гранулированного полиамида-6 (ПА-6). Для получения качественного полимера, пригодного для переработки в нити, необходимо высушивать гранулят ПА-6 до остаточного влагосодержания не более 0,05 мас.%. Вместе с тем важен такой показатель как остаточное содержание мономера в гранулах полимера. Его значение не должно превышать 1 мас.%. Авторы работы [1] предлагают совместить процессы сушки и удаления остаточного мономера из гранулята ПА-6 в одном аппарате. Предполагается конвективная сушка и сублимация мономера с удалением образующихся паров потоком азота. Однако сложность совмещенного процесса затрудняет подбор режимных и конструктивных параметров аппарата. Поэтому задача построения математической модели совмещенного процесса сушки и деполимеризации (удаление остаточного мономера) полиамида-6, адекватно описывающей процесс и достаточно простой с инженерной точки зрения, весьма актуальна.

В данной работе рассматривался периодический процесс. При построении математической модели совмещенного процесса сушки и деполимеризации ПА-6 в аппарате периодического действия принимались допущения о режиме идеального вытеснения для газовой фазы, равномерном распределении температуры по объему гранулы. В качестве геометрической модели гранулы принята сфера с эквивалентным диаметром, вычисляемым из условия равенства отношений поверхности к объему у модельной и реальной гранулы.

Рассмотрим физическую картину процесса. Слой гранул высотой H расположен в аппарате на неподвижной сетке. Под сетку подается горячий азот со скоростями меньшими, чем скорость начала псевдооживления, поэтому процесс идет в режиме филь-

рующего слоя. Для построения математической модели разобьем слой высотой H на n более мелких слоев (назовем их элементарными), высота каждого из которых соответствует диаметру гранулы ПА-6. Поскольку принято допущение о режиме идеального вытеснения для газовой фазы, а слой гранул неподвижен, то справедливо считать, что параметры газа и гранулята будут одинаковыми по всему сечению каждого элементарного слоя. Далее математическое описание строится по блочному принципу и включает два уровня иерархии: одиночная частица и объем гранул в элементарном слое.

На первом уровне иерархии рассматривается массоперенос внутри гранулы ПА-6. Изменение влагосодержания $C_{w,i}$ и концентрации капролактама $C_{k,i}$ в грануле, находящейся на i -м слое, описывается дифференциальными уравнениями массопроводности:

$$\partial C_{w,i} / \partial \tau = D_w \left(\partial^2 C_{w,i} / \partial r^2 + 2/r \cdot \partial C_{w,i} / \partial r \right), \quad 0 < r < R, \quad (1)$$

$$\partial C_{k,i} / \partial \tau = D_k \left(\partial^2 C_{k,i} / \partial r^2 + 2/r \cdot \partial C_{k,i} / \partial r \right), \quad 0 < r < R, \quad (2)$$

с начальными условиями: $C_{w,i}(r, 0) = C_{w,0}$, $C_{k,i}(r, 0) = C_{k,0}$,
условиями симметрии поля концентрации: $\partial C_{w,i}(0, \tau) / \partial r = 0$, $\partial C_{k,i}(0, \tau) / \partial r = 0$,

граничными условиями: $J_{w,i} = -D_w \cdot \rho \cdot \partial C_{w,i}(R, \tau) / \partial r = \beta_w (P_{p,w,i} - P_{g,w,i}) F_i$,
 $J_{k,i} = -D_k \cdot \rho \cdot \partial C_{k,i}(R, \tau) / \partial r = \beta_k (P_{p,k,i} - P_{g,k,i}) F_i$.

В этих уравнениях: D_w, D_k – эффективные коэффициенты массопроводности воды и капролактама, соответственно; ρ – плотность гранул полиамида-6; β_w, β_k – коэффициенты массоотдачи; r – текущий радиус; R – радиус гранулы; F_i – поверхность гранул в i -м слое; τ – время. Выражения для расчета коэффициентов массопроводности и массоотдачи приведены в работах [2-3].

На втором уровне иерархии рассматривается объем элементарного слоя гранул. Математическое описание на этом уровне включает в себя выражения для расчета парциальных давлений паров воды и капролактама над поверхностью гранул $P_{p,w,i}, P_{p,k,i}$ (3) и в газовой фазе $P_{g,w,i}, P_{g,k,i}$ (4), выражения для расчета среднеемкостных концентраций компонентов в грануле, находящейся в i -м слое $C_{w,av,i}, C_{k,av,i}$ (5), уравнения теплового баланса для i -го слоя гранул (6) и уравнения теплового баланса для потока газа на i -м слое (7).

$$P_{p,w,i} = \gamma_w C_{w,i}(R, \tau) 617 \cdot e^{(17.25 t_i / (t_i + 238))},$$

$$P_{p,k,i} = \gamma_k C_{k,i}(R, \tau) 10^{(10.23 - 2958.22 / (t_i + 273))} \quad (3)$$

$$P_{g,w,i} = (28 x_{w,i} P / M_w) / (1 + 24 x_{w,i} / M_w), \quad P_{g,k,i} = (28 x_{k,i} P / M_k) / (1 + 24 x_{k,i} / M_k), \quad (4)$$

$$C_{w,av,i} = 3 / R^3 \int_0^R C_{w,i}(r, \tau) \cdot r^2 dr, \quad C_{k,av,i} = 3 / R^3 \int_0^R C_{k,i}(r, \tau) \cdot r^2 dr \quad (5)$$

$$c_p m dt_i / d\tau = \alpha F_i (t_{w,a} - t_i) - (r_w^* J_{w,i} F_i + r_k^* J_{k,i} F_i) + \alpha_A F_i (t_{A,i} - t_i), \quad (6)$$

$$c_A G_A dt_{A,i} / d\tau = \alpha_A F_i (t_{w,a} - t_{A,i}) + \alpha_A F_i (t_{A,i} - t_i), \quad (7)$$

где γ_w, γ_k – коэффициенты активности воды и капролактама; $C_{w,i}(R, \tau), C_{k,i}(R, \tau)$ – концентрация воды и капролактама на поверхности гранулы; M_w, M_k – молекулярные массы воды и капролактама; $x_{w,i}, x_{k,i}$ – относительные массовые концентрации компонентов в газе на i -ом слое; P – давление в аппарате; c_p, c_A – удельные теплоемкости ПА-6 и азота, соответственно; α, α_A – эффективные коэффициенты теплоотдачи; $t_{w,a}$ – температура

тура стенки аппарата; r_w^*, r_k^* – удельные теплоты парообразования воды и капролактама, соответственно; G_A – расход азота.

Начальные условия для уравнений (6) и (7): $t_i(0) = t_0$, $t_{A,i}(0) = t_{A,0}$.

Уравнения (1) – (7) составлены для i -го слоя. Связь между слоями осуществляется за счет потока азота. Относительные массовые концентрации компонентов в газе в каждом новом слое могут быть найдены как сумма концентрации на предыдущем слое и изменения концентрации, обусловленного массовым потоком компонентов с поверхности гранул слоя:

$$x_{w,i} = x_{w,i-1} + J_{w,i} / G_A, \quad x_{k,i} = x_{k,i-1} + J_{k,i} / G_A, \quad i = 1 \dots n, \quad (8)$$

где $J_{w,i}, J_{k,i}$ – массовые потоки компонентов с поверхности гранул в i -ом слое. Параметры газа на входе в аппарат соответствуют нулевому слою.

Система уравнений (1) – (8) представляет собой математическое описание совмещенного процесса сушки-демономеризации полиамида-6 в i -м слое. Для аппарата решалось n таких систем численным методом. Решение уравнений (1), (2) осуществлялось конечноразностным методом с использованием неявной схемы.

Путем сопоставления расчетных и опытных данных была подтверждена адекватность разработанной математической модели. С помощью данной модели можно прогнозировать изменение концентраций капролактама и воды в гранулах полимера (рис.1) и в газовой фазе, температуру полимера и газа, парциальные давления паров компонентов над гранулами и в газовой фазе.

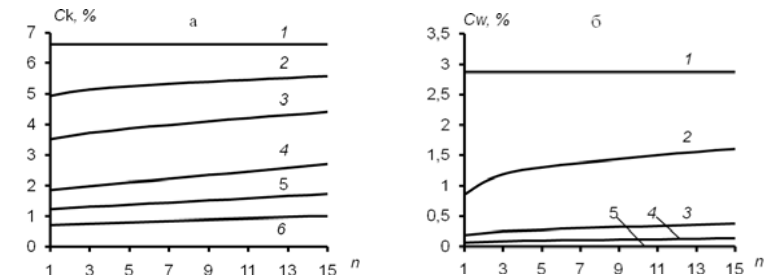


Рис. 1. Профили концентраций в полимере по слоям n в различные моменты времени τ , ч: а) капролактама, τ : 1 – 0; 2 – 3; 3 – 6; 4 – 12; 5 – 18; 6 – 30; б) воды, τ : 1 – 0; 2 – 0.5; 3 – 1; 4 – 1.5; 5 – 3

Работа выполнена при поддержке гранта по программе УМНИК (договор №503ГВ1/2013).

Список литературы

1. Мизеровский Л.Н., Базаров Ю.М. Твердофазный синтез полиамида-6 // Хим. волокна. 2006. № 4. С. 40.
2. Липин А.А., Липин А.Г., Кириллов Д.В. Моделирование процесса сушки и деполимеризации полиамида в аппарате с кипящим слоем // Изв. Вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 55. Вып. 2. С. 85.
3. 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.

УДК 536.2.001.24

**СЕДИМЕНТАЦИЯ МАЛОКОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ВЗВЕСИ
СТОКСОВСКИХ ЧАСТИЦ В СЛОЕ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ
СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ
SEDIMENTATION LOW-CONCENTRATION SUSPENDED
STOKES PARTICLES IN PLANE LAYER WITH MOVING
FREE BOUNDARY**

В.И. Рязжских*, А.В. Рязжских
V.I. Ryazhskikh*, A.V. Ryazhskikh****

*Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж
(e-mail: ryazhskih@scientist.com)

**Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж
(e-mail: ryazhskihav@bk.ru)
Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh

Аннотация: На основе конвективно-диффузионных представлений о переносе твердой фазы в суспензиях сформулирована и решена задача об осаждении малоконцентрированных стоксовских частиц в перемешиваемом плоском слое с равномерно движущейся по нормали свободной границей дисперсионной среды в направлении "смоченной" поверхности.

Abstract: Based on the convection-diffusion of ideas about transferring solids in suspensions formulated and solved the problem of the low-concentration Stokes particle deposition in stirred plane layer uniformly moving along the normal free surface of the dispersion medium in the direction-lenii "dipped" surface.

Ключевые слова: седиментация; стоксовские частицы; перемешивание; осадок; свободная граница

Keywords: sedimentation; Stokes particles; agitation; sediment; free boundary

Установление закономерностей перераспределения дисперсной фазы в малоконцентрированных взвесах с движущейся свободной границей необходимо для обоснования рациональных технологических режимов, например, при концентрировании суспензий выпариванием дисперсионной среды [1], фильтровании [2], переливе криожидкостей из резервуара с наличием в них взрывоопасных высококипящих отвержденных микропримесей [3] и т.д. Имеющиеся математические формулировки задач с движущимися границами и методы их решения [4,5] ориентированы, в основном, на гомогенные среды с фазовыми переходами на самой движущейся границе в виде задачи Стефана и ее модификаций и не позволяют учесть конвективную составляющую переноса твердой фазы в объеме взвеси. С другой стороны применение в этом случае подходов механики гетерогенных сред [6] вызывает пока ряд непреодолимых трудностей – корректная постановка условий на межфазной границе, существенная нелинейность интегродифференциальных уравнений высокого порядка и т.п. Альтернативой для решения такого класса задач является синтез и анализ математических моделей в рамках конвективно-диффузионных представлений о переносе твердой фазы в суспензиях [7], который апробирован при описании различных процессов в дисперсных системах [8-10].

В связи с вышесказанным рассматривается сначала постановка задачи для монодисперсной твердой фазы. Пусть в начальный момент времени свободная граница плоского слоя малоконцентрированной однородной суспензии монодисперсных частиц, осаждающихся по закону Стокса в условиях перемешивания, начинает двигаться с постоянной скоростью по нормали в направлении поверхности осаждения, проникаемой только для несущей среды. В предположении, что проскальзывание фаз не существен-

но, и используя конвективно-диффузионные представления о переносе твердой фазы в слое суспензии [11], сформулирована математическая модель:

$$\frac{\partial N(X, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial N(X, \theta)}{\partial X} + \frac{1}{Bo} \frac{\partial^2 N(X, \theta)}{\partial X^2}; \quad (1)$$

$$N(X, 0) = 1; \quad (2)$$

$$(1-K)N(0, \theta) + \frac{1}{Bo} \frac{\partial N(0, \theta)}{\partial X} = 0; \quad (3)$$

$$N[H(\theta), \theta] + \frac{1}{Bo} \frac{\partial N[H(\theta), \theta]}{\partial X} = 0; \quad (4)$$

$$H(\theta) = 1 - \alpha\theta, \quad (5)$$

где $\theta = (w+v)t/h_0$; $X = x/h_0$; $Bo = (w+v)h_0/D$; $K = k/(w+v)$; $N(X, \theta) = n(x, t)/n_0$; $\alpha = v/(w+v)$; t - время; x - координата; h_0 - высота слоя при $t=0$; w - Стоксовская скорость осаждения частиц взвеси; v - скорость движения свободной границы; D - коэффициент перемешивания; k - скорость встраивания частиц в структур осадка.

Считая $H(\theta)$ параметром и применяя одностороннее интегральное преобразование Лапласа по θ , получено аналитическое решение системы (1) – (5). Для нивелирования ошибки допущения о том, что $H(\theta)$ параметр в данный момент безразмерного времени θ , потребовано выполнение балансового соотношения частиц в системе

$$K \int_0^\theta N(0, \theta) d\theta + \frac{1}{H(\theta)} \int_0^{H(\theta)} N(X, \theta) dX = 1,$$

из которого определена нормирующая невязка к решению $\Omega(K, Bo, \theta)$. Окончательное решение записывается в виде

$$\tilde{N}(X, \theta) = \Omega(K, Bo, \theta) N(X, \theta), \quad (6)$$

которое является приближенным в том смысле, что оно удовлетворяет граничным условиям (2) – (4), а уравнению (1) с точностью до

$$N(X, \theta) \frac{d \ln \Omega(K, Bo, \theta)}{d\theta} \ll 1.$$

Для подтверждения корректности предложенного метода решения было проведено численное интегрирование системы (1) – (5), которая путем замены

$$N(X, \theta) = \Phi(X, \theta) \exp \left[-\frac{Bo}{2} \left(X + \frac{1}{2} \theta \right) \right]$$

и введения функционального преобразования

$$\xi = \frac{X}{1 - \alpha\theta}, \quad \eta = \frac{\theta}{1 - \alpha\theta}$$

с якобианом, отличным от нуля, сведена к задаче с неподвижными границами

$$\frac{\partial \Psi(\xi, \eta)}{\partial \eta} = -\frac{\alpha\xi}{1 + \alpha\eta} \frac{\partial \Psi(\xi, \eta)}{\partial \xi} + \frac{1}{Bo} \frac{\partial^2 \Psi(\xi, \eta)}{\partial \xi^2}, \quad (7)$$

$$\Psi(\xi, 0) = \exp\left(\frac{Bo}{2}\xi\right), \quad (8)$$

$$\left(\frac{1}{2} - K\right)\Psi(0, \eta) + \frac{(1 + \alpha\eta)}{Bo} \frac{\partial \Psi(0, \eta)}{\partial \xi} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{1}{2}\Psi(1, \eta) + \frac{(1 + \alpha\eta)}{Bo} \frac{\partial \Psi(1, \eta)}{\partial \xi} = 0, \quad (10)$$

где $\Psi(\xi, \eta) = \Phi[X(\xi, \eta), \theta(\xi, \eta)]$.

Линейный характер системы (7) – (10) позволил адаптировать в расчетах устойчивую и сходящуюся классическую маршевую конечно-разностную схему первого порядка точности по η и второго по ξ на равномерной сетке с аппроксимацией граничных условий односторонними конечными разностями третьего порядка точности.

Вычислительный эксперимент подтвердил правомочность приближенного аналитического решения (6). Это позволило обобщить модель (1) – (5) на случай малокоцентрированной полидисперсной взвеси применением принципа суперпозиции концентрированных полей различных размеров частиц в предположении выполнения гипотезы сплошности в виде локальной функции плотности распределения частиц по размерам

$$\tilde{F}[X, L, \theta(L, t)] = F_0(L) \Omega[(K(L), Bo(L), \theta(L, t))] N[X, L, \theta(L, t)],$$

где под $N[X, L, \theta(L, t)]$ понимается $N(X, \theta)$, в котором учтена зависимость Bo , K и θ от относительного размера частиц $L = l/\bar{l}$; l , \bar{l} – текущей и среднечисленный размер дисперсной фазы; $F_0(L)$ – функция плотности распределения частиц по размерам при $t = 0$.

Для проведения расчетов Bo и K идентифицированы из следующих соображений. Т.к. перемешивание дисперсной фазы характеризуется конвективным механизмом и броуновской диффузией, то согласно [12, 13]

$$D(l) = (1 + \varepsilon_c) \frac{k_B T}{3\pi l \nu \rho},$$

где ε_c – коэффициент конвекции; k_B – постоянная Больцмана; T – температура; ν, ρ – кинематическая вязкость и плотность несущей среды. Кинетический коэффициент k определен по аналогии с [14]: приблизившись к поверхности осаждения, частицы взвеси утрачивают конвективную составляющую движения, но сохраняют броуновскую и седиментационную, т.е.

$$k(l) = \frac{k_0(l)}{1 + [k_0(l) - w(l) - v]/u_V},$$

где

$$k_0(l) = \left[2\pi/\bar{v}_b^2(l)\right]^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}[w(l) + v]^2/\bar{v}_b^2(l)\right\} + \frac{1}{2}[w(l) + v] \left\{1 + \operatorname{erf}\left\{[w(l) + v]/[2\bar{v}_b^2(l)]^{1/2}\right\}\right\},$$

$$\bar{v}_b(l) = \frac{6kT}{\pi l \rho}, \quad u_V = (1 + \varepsilon_c) \frac{k_B T}{3\pi l \nu \rho h_0} = \frac{D(l)}{h_0}, \quad w(l) = \frac{g(\rho_T - \rho)}{18\rho\nu} l^2;$$

g – ускорение свободного падения; ρ_T – плотность частиц.

Синтезированная модель позволила определить локальную массовую концентрацию частиц по высоте слоя и ответить на вопрос о влиянии скорости движения свободной границы на кинетику ее изменения в процесс осаждения.

Список литературы.

1. Таубман Е.И. Выпаривание (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии). – М.: Химия, 1982. – 328с.
2. Ельшин А.И. Теоретические и технологические аспекты разделения дисперсных систем фильтрованием. – Новополюцк: ПГУ, 1994. – 96с.
3. Flynn M.T. Cryogenic engineering. – New York: Marcel Dekker, 2005. – 873p.
4. Crank J. Free and moving boundary problems. – Oxford: Clarendon Press, 1984. – 425p.
5. Terzia D.A. A bibliography on moving – free boundary problems for the heat-diffusion equation. The Stefan and related problems // NAT, Serie A: - 2000. - №2. – pp. 297-301.
6. Нигматулин Р.Н. Основы механики гетерогенных сред. – М.: Наука, 1978. – 336с.
7. Броунштейн В.Б. Диффузионная модель классификации частиц в разряженных суспензиях // Журн. прикл. химии. – 1983. – Т.56. - №8. – с. 1788-1793.
8. Веригин А.Н., Васильев С.В. Диффузия и седиментация мелкодисперсной однородной взвеси в отстойниках // Теор. основы хим. технол. – 1982. – Т.16. - №3. – с. 374-380.
9. Пономаренко В.Г. и др. Математическая модель процесс гидроклассификации суспензии в кристаллизаторах // Теор. основы хим. технол. – 1980. – Т.11. - №4. – с. 582-589.
10. Харин В.М., Рязжских В.И., Завадских Р.М. Кинетика осаждения примесей при испарительном охлаждении криогенных жидкостей // Теор. основы хим. технол. – 1996. – Т.30. - №5. – с. 453-457.
11. Харин В.М., Рязжских В.И. К теории осаждения // Теор. основы хим. технол. – 1989. – Т.23. - №5. – с. 651-658.
12. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. – М.: Химия, 1974. – 688с.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10т. Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736с.
14. Седунов Ю.С. Некоторые вопросы броуновской диффузии стоксовских частиц в пространственно-неоднородном внешнем поле // Изв. АН СССР, Сер. геофиз. – 1964. - №4. – с.1093-1102.

УДК 530.2.001.24

**ЛАМИНАРНОЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ
ОСТВАЛЬДА-ДЕ-ВИЛЯ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ
КОЛЬЦЕВОГО КАНАЛА
LAMINAR ISOTHERMAL FLUID FLOW OF
OSTWALD-DE-VILYA IN THE INITIAL SECTION
ANNULUS**

А.В. Ряжских*, Е.А. Кожухова**

A.V. Ryazhskikh, E.A. Kozhukhova

*Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж
(e-mail: ryazhskihav@bk.ru)

**Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж
(e-mail: zheni4echka@mail.ru)
Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh

Аннотация: На основе уравнений Навье-Стокса численно решена задача течения жидкости Оствальда-де-Вилиа во входном участке кольцевого канала без учета теплообмена. Для ньютоновской жидкости получено аналитическое решение.

Abstract: The Navier-Stokes equations numerically solved the problem of fluid flow Ostwald-de-Vilya in the input section of the annular channel without heat. For a Newtonian fluid obtained analytically decision.

Ключевые слова: ньютоновская жидкость; начальный участок; кольцевой канал; ламинарное течение

Keywords: Newtonian fluid; the initial section; annular channel; laminar flow

Корректный анализ функционирования компактных устройств (теплообменные аппараты, формирующие каналы экструдерных систем и др.), применяемых в энергетике, ракетно-космической технике, химической и пищевой технологиях [1], невозможен без учета влияния фактора входного участка на процессы переноса при течении сред различной реологической природы [2]. Кольцевая геометрия, наряду с цилиндрическими трубами и плоскими каналами, наиболее часто встречается в различных технических системах [3]. Достаточно полное исследование гидродинамики на начальном участке кольцевых при течении ньютоновских жидкостей с использованием линеаризации Лангхаара [4] приведено в [5]. Однако для неньютоновских сред и, в частности, для жидкости Оствальда-де-Вилиа (степенной жидкости) [6], систематическое исследование этой задачи до последнего времени отсутствовало [7], если не считать наличие труднодоступных отчетов [8] и попыток численного интегрирования обобщенных уравнений полностью развитого ламинарного течения без учета начального участка [9].

В связи с этим рассматривается осесимметричный случай, т.е. когда вектор скорости зависит только от радиальной r и аксиальной z цилиндрических координат и полагая действие внешних объемных сил несущественным, уравнения Навье-Стокса в изотермическом случае при течении жидкости Оствальда-де-Вилиа с постоянными теплофизическими параметрами таковы:

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \eta \left(\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varphi \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \right.$$

$$\left. -\frac{2\varphi v_r}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\varphi \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} +$$

$$+ \eta \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \varphi \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\varphi \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right\}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\varphi = \left\langle \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \frac{v_r^2}{r^2} + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 \right\} / \dot{\gamma}_0^2 \right\rangle^{\frac{n-1}{2}},$$

где v_r, v_z - радиальная и аксиальная компоненты вектора скорости; p - давление; $\rho, \eta, n (n > 0)$ - плотность, коэффициент консистенции и индекс течения; t - время; $\dot{\gamma}_0$ - приведенная скорость сдвига, принимаемая обычно 1.

Для замыкания системы (1) – (3) она должна быть дополнена уравнением Пуассона для давления и соответствующими начальными и граничными условиями. В такой постановке решение сформулированной задачи представляет значительную трудность. Поэтому проведена ее линеаризация в предположении однонаправленности течения по всей длине канала, что приводит к нелинейной начально-краевой задаче вида:

$$\frac{\partial V}{\partial T} = 1 + \frac{Br}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial V}{\partial R} \left| \frac{\partial V}{\partial R} \right|^{n-1} \right); \quad (4)$$

$$V(R, 0) = V_0, \quad V(R_1, T) = V(R_2, T) = 0; \quad (5)$$

$$\frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} R V(R, T) dR = V_0; \quad (6)$$

где $R = r/d$; $T = t/\bar{t}$; $V = v_z/\bar{v}$; $V_0 = v_0/\bar{v}$; $\bar{v} = \dot{\gamma}_0 d$; $\bar{t} = \rho \bar{v} / (-\partial p / \partial z)$; $Br = \dot{\gamma}_0 \eta / [d (-\partial p / \partial z)]$; $d = r - r_1$; v_0 - скорость жидкости во входном сечении кольцевого канала; $R_{1,2} = r_{1,2}/d$; $r_{1,2}$ - радиусы внутреннего и внешнего соосных цилиндрических каналов.

Интегрирование задачи (4) – (6) осуществлялось численно на основе конечно-разностных представлений. Непрерывная область решения $[R_1, R_2] \times [0, \infty)$ заменялось дискретной с шагами ΔR и ΔT . Центральный трехточечный шаблон по геометрической координате позволил аппроксимировать уравнение (4) явным конечно-разностным аналогом. При практической реализации построенной схемы начальное условие представлено в квазипостоянном виде из соображений сохранения расхода жидкости через входное сечение канала для $R \in [R_1, R_*]$ и $R \in [R_*, R_2]$, где R_* - координата максимальной скорости, которая находится из уравнения

$$\int_{R_1}^{R_*} \left(\frac{R_*^2 - R^2}{R^2} \right)^{\frac{1}{n}} dR = \int_{R_*}^{R_2} \left(\frac{R^2 - R_*^2}{R^2} \right)^{\frac{1}{n}} dR,$$

полученного из (6) и решения соответствующего стационарного уравнения (4).

Для случая $n=1$ (ньютоновская жидкость) получено аналитическое решение системы (4) – (6):

$$V(R, T) = \frac{1}{4Br} \left[- (R^2 - R_1^2) + \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \ln \frac{R}{R_1} \right] - \frac{2}{Br} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - \omega \mu_n^2) \left\{ [N_0(R_1 \mu_n) - N_0(R_2 \mu_n)] J_0(R \mu_n) + [J_0(R_2 \mu_n) - J_0(R_1 \mu_n)] N_0(R \mu_n) \right\} \exp(-\mu_n^2 \overline{Br} T) / \left\{ \mu_n^3 [-R_1 J_1(R_1 \mu_n) N_0(R_2 \mu_n) - R_2 J_0(R_1 \mu_n) N_1(R_2 \mu_n) + R_2 J_1(R_1 \mu_n) N_0(R_1 \mu_n) + R_1 J_0(R_2 \mu_n) N_1(R_1 \mu_n)] \right\}, \quad (7)$$

где μ_n - корни уравнения

$$J_0(R_1 \mu_n) N_0(R_2 \mu_n) - J_0(R_2 \mu_n) N_0(R_1 \mu_n) = 0,$$

$J_{0,1}$, $N_{0,1}$ функции Бесселя и Вебера;

$$\omega = \frac{1}{8} \left[R_1^2 + R_2^2 - \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln(R_2/R_1)} \right], \quad \overline{Br} = \omega / V_0.$$

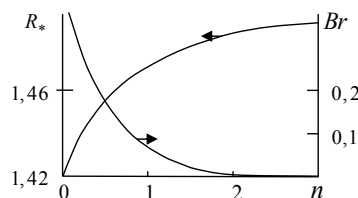


Рисунок 1 – Изменение геометрического и гидродинамического факторов в зависимости от индекса течения при $Re=1$, $R_1=1$, $R_2=2$

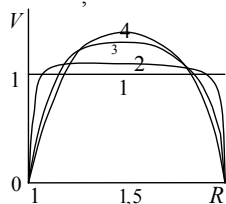


Рисунок 3 – Профили скорости при $n=0,75$ в различные моменты T : 1-0; 2-5·10⁻³; 3-0,05; 4-0,1

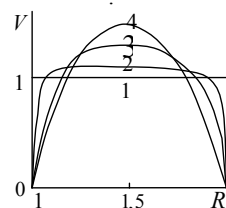


Рисунок 2 – Профили скорости при $n=1$ в различные моменты T : 1-0; 2-5·10⁻³; 3-0,05; 4-0,229

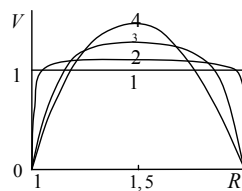


Рисунок 4 – Профили скорости при $n=1,75$ в различные моменты T : 1-0; 2-5·10⁻³; 3-0,1; 4-0,3

В результате проведения расчетов установлено, что R_* с увеличением n приближается к 1,5, а $Br \rightarrow 0$ (рис. 1). Тестирование предложенной вычислительной схемы при $T \rightarrow \infty$ показало ее работоспособность при $n=1$ (рис. 2). Кроме того, найдено условие ее устойчивости ($\Delta T \approx 10^{-3} \Delta R$) для практически важного диапазона изменения индекса течения $0,1 \leq n \leq 3$. Точность алгоритма позволяет регистрировать различие в физической картине течения при достаточно близких реологических параметрах (рис. 3,4). Разработанный инструментальный для моделирования гидродинамической обстановки на начальном участке кольцевого канала позволили получить данные о его длине коррелирующие с известными экспериментальными данными [10].

Список литературы.

1. Mahmoud M. Engineering thermofluids: thermodynamics, fluid mechanics and heat transfer. – NY: Springer, 2005. – 1132p.
2. Latif M. Heat convection. – NY: Springer, 2009. – 552p.
3. Kakaç S., Yener Y. Convective Heat Transfer. – FL.:CRC, 1995. – 432p.
4. Kays W.M., Crawford M.E. Convection Heat Transfer. – NY: McGraw – Hill, 1993. – 621p.
5. Heaton H.S., Reynolds W.C., Kays W.M. Heat transfer in annular passages. Simultaneous development of velocity and temperature fields in laminar flow // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1964. – V.7. – pp. 763-781.
6. Bird R.B., Armstrong R.C., Hassager O. Dynamics of polymers liquids / In: Fluid Mechanics, vol.1. – NY: Wiley, 1987. – 672p.
7. Harnett J.P., Cho Y.Z. Non-Newtonian fluids / In: Handbook of Heat Transfer. Chapter 10. – NY: McGraw – Hill, 1998. – pp. 73-784.
8. Fang P., Manglik R.M. Numerical investigation of laminar forced convection in Newtonian and non-Newtonian flow in eccentric annuli / Report № TFTPL-3, Thermal-Fluids & Thermal Processing Laboratory, University of Cincinnati: - Cinc.: OH, 1998. – 205p.
9. Maglik R.M., Fang P. Thermal processing of viscous non-Newtonian fluids in annular ducts: effects of power-law rheology, duct eccentricity, and thermal boundary conditions // Int J. of Heat and Mass Transfer. – 2002. – V.45. – №4. – pp. 803-814.
10. Mehrotra A.K., Patience G.S. Unified entry length for Newtonian and power-law fluids in laminar pipe flow // The Canadian J. of Chem. Eng. – 1990. – V.68. – p.529-533.

УДК 674.047

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАДИИ СУШКИ
ПРИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ
MATHEMATICAL MODELING OF THE DRYING STEP DURING
THERMOCHEMICAL PROCESSING OF WOOD MATERIAL**

Лилия М. Исмагилова*, Алмаз Р. Садртдинов**, Диляра Зиятдинова***
Liliya M. Ismagilova*, Almaz R. Sadrtidinov**, Dilyara Ziatdinova***

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань,
(e-mail: lilya_777_09@mail.ru).

** Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань,
(e-mail: dog_home@list.ru).

*** Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань,
(e-mail: ziatdinova@rambler.ru)

Kazan national research technological university, Russia, Kazan

Аннотация: Приведено математическое описание стадии высокотемпературной сушки при газификации древесного сырья.

Abstract: The mathematical description of the stages of high temperature drying the gasification of wood raw material

Ключевые слова: древесное сырье; диметиловый эфир; газификация; высокотемпературная сушка, математическая модель

Keywords: raw wood, dimethyl ether, gasification, high temperature drying, mathematical model

В настоящее время во многих странах проводятся исследовательские работы по созданию новых видов моторных топлив. В рамках этих работ вырабатываются концепции производства и использования альтернативных моторных топлив и создаются соответствующие двигатели. И одним из перспективных направлений утилизации древесных отходов является производство моторного топлива - диметилового эфира.

При изучении данной темы была разработана установка термохимической переработки древесных отходов в диметиловый эфир. Одной из основных стадий разработки оборудования является теоритический расчет, описание и получение данных процессов, протекающий в блоке высокотемпературной обработки установки, с протеканием стадий прогрева и сушки с переходом на стадию пиролиза.[1]

В результате была составлена физическая картина описывающая процесс прогрева, сушки и пиролиза для разработанной установки, представленная на рисунке 1 и предложено математическое описание данных процессов с учетом взаимосвязей между ними.

Изменение температуры материала по слоям в процессе прогрева, сушки и пиролиза описывается дифференциальным уравнением теплопереноса (1)[2]

$$\rho_{cl} \cdot c_{cl} \cdot \frac{\partial T_{cl}}{\partial \tau} = \frac{\partial T_{cl}}{\partial x} \cdot \left(\lambda_{cl} \frac{\partial T_{cl}}{\partial x} \right) + q_{cl} \quad (1)$$

где ρ_{cl} и c_{cl} – плотность и теплоемкость слоя материала соответственно; λ_{cl} – эффективный коэффициент теплопроводности слоя; q_{cl} – сток (приток) тепла определяемый прогревом материала $q_{п}$, испарением влаги при сушке $q_{исп}$ и химическими реакциями при пиролизе $q_{хр}$

$$q_{cl} = q_{п} + q_{исп} + q_{хр} \quad (2)$$

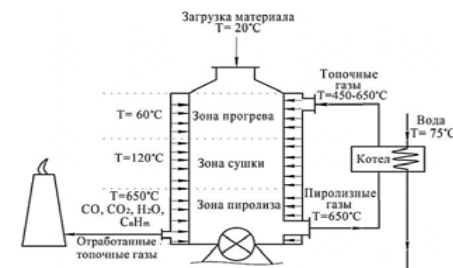


Рисунок 1 – Физическая картина процесса пиролиза

Процесс сушки материала сопровождается изменением влажности материала и описывается системой дифференциальных уравнений тепло-массопроводности (3-4) с краевыми условиями (5-9)

$$\rho_{cl} \cdot c_{cl} \cdot \frac{\partial T_{cl}}{\partial \tau} = \frac{\partial T_{cl}}{\partial l} \cdot \left(\lambda_{cl} \frac{\partial T_{cl}}{\partial l} \right) + \rho_{cl} \cdot \Gamma \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial U_{cl}}{\partial \tau} \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_{cl}}{\partial \tau} = \frac{k_p}{\rho_o} \cdot \frac{\partial^2 P_q}{\partial l^2} \quad (4)$$

$$U_{cl}(0; l) = U_{cl,нач} \quad (5)$$

$$T_{cl}(0; l) = T_{cl,нач} \quad (6)$$

$$P_q(0; l) = P_{атм} \quad (7)$$

$$T_{cl} \Big|_{l=L} = T_{cl} \quad (8)$$

$$P_q \Big|_{l=L} = P_{атм} \quad (9)$$

где k_p , c_{cl} , λ_{cl} – коэффициенты молярного переноса, теплоемкости и теплопроводности слоя соответственно, U_{cl} – влагосодержание слоя; P_q – давление внутри частицы в слое.

При достижении слоя материала абсолютно сухого состояния, он продолжает нагреваться и достигнув 150°C, начинает термохимически разлагаться (начало процесса пиролиза), что сопровождается образованием парогазовой смеси и убылью массы.

В данной работе древесина рассматривается как смесь, состоящая из трех главных составляющих: гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина с заданными массовыми долями.[3] С учетом принятой схемы изменение массы в единице объема исходной древесины для каждого из указанных компонентов запишется в следующем виде

$$\text{Для гемицеллюлозы: } \frac{\partial m_{гц}}{\partial \tau} = -k_{гц} \cdot m_{гц} \frac{\partial m_{гц}}{\partial \tau} = \gamma_{гц} \cdot k_{гц} \cdot m_{гц} - k_{по} \cdot m_{по}$$

$$\text{Для целлюлозы: } \frac{\partial m_{ц}}{\partial \tau} = -k_{ц} \cdot m_{ц}$$

$$\text{Для лигнина: } \frac{\partial m_{л}}{\partial \tau} = -k_{л} \cdot m_{л}$$

Изменение удельной массы образующегося угля запишется уравнением (10)

$$\frac{\partial m_y}{\partial \tau} = \gamma_{по} \cdot k_{по} \cdot m_{по} + \gamma_{гц} \cdot (-k_{гц} \cdot m_{гц}) + \gamma_{л} \cdot (-k_{л} \cdot m_{л}) \quad (10)$$

Изменение массы газовой фазы в единице объема (11) представлена как сумма массовых потоков за счет конвекции и реакций пиролиза

$$\frac{\partial (\varepsilon \cdot m_{гг})}{\partial \tau} = - \frac{\partial (W_{гг} \cdot m_{гг})}{\partial l} + (1 - \gamma_{гц}) \cdot k_{гц} \cdot m_{гц} + (1 - \gamma_{по}) \cdot k_{по} \cdot m_{по} + (1 - \gamma_{ц}) \cdot k_{ц} \cdot m_{ц} + (1 - \gamma_{л}) \cdot k_{л} \cdot m_{л} \quad (11)$$

Предполагаем, что при пиролизе температура слоя будет равна температуре образующихся газов, а между газовой и твердой фазами установлено термодинамическое равновесие. Тогда уравнение сохранения энергии (4) запишется в виде

$$(c_{гц} m_{гц} + c_{ц} m_{ц} + c_{л} m_{л} + c_y m_y + c_{гг} m_{гг}) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial l} \left(\lambda_{гг} \frac{\partial T}{\partial l} \right) - m_{гг} c_{гг} W_{гг} \frac{\partial T}{\partial l} + q_{хр},$$

где $W_{гг}$ – скорость газового потока.

Представленное математическое описание позволяет рассчитать основные параметры установки и определить режимы эксплуатации.

Представленные результаты получены в рамках реализации гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых на тему МК-3434.2015.8 «Разработка теоретических основ, технологии и оборудования комплексной термохимической переработки древесных отходов и растительной биомассы в сырье для химического синтеза и компоненты моторных топлив» (договор № 14.256.15.3434-МК от 16.02.2015 г.).

Список литературы

1. Садртдинов А.Р. Технология переработки древесной биомассы в диметилловый эфир / А.Р. Садртдинов, Л.М. Исмаилова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. - 2014. - Т. 2. - № 3-4 (8-4). - С. 309-311.
2. Тимербаев Н.Ф. Кондуктивный теплообмен дисперсного материала в установке для производства древесного угля / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Садртдинов, И.И. Хуснуллин // Вестник Казанского технологического университета. - 2011. - № 18. - С. 69-75.
3. Садртдинов, А.Р. Влияние предварительной тепловой обработки древесных отходов на процесс газификации и качество синтез-газа / А.Р. Садртдинов, А.Н. Николаев, А.С. Торопов, В.А. Салдаев // Вестник Казанского технологического университета. - 2014. - Т. 17. - № 1. - С. 89-90.

УДК 536.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ МИКРОВОЛНОВОГО ПОЛЯ

И.Л. Бошкова*, Н.В. Волгушева**
I.L. Boshkova*, N.V. Volgusheva**

*Одесская национальная академия пищевых технологий
(e-mail: ira_boshkova@mail.ru)

** Одесская национальная академия пищевых технологий
(e-mail: n-volgusheva@mail.ru)

Odessa National Academy of Food Technologies

Аннотация: Анализируется возможность применения существующих аналитических моделей теплопроводности в теле при действии внутренних источников теплоты к решению задач нагрева в микроволновом поле. Исследована математическая модель, описывающая температурное поле полуограниченного массива в условиях микроволнового нагрева.

Ключевые слова: внутренние источники теплоты; математическая модель; нагрев; сушка; температурное поле; глубина проникновения.

Abstract: Applicability of existing analytical models of thermal conductivity in a body under action of internal heat sources for problems of microwave heating is analysed. Mathematical model describing temperature field of a half-limited massive under microwave heating has been investigated.

Key words: internal heat sources, mathematical model, heating, drying, temperature field, penetration depth.

Метод нагрева материалов в микроволновом электромагнитном поле рекомендовал себя как высокоэффективный в отношении скорости, энергозатрат и качества конечной продукции в процессах нагрева и сушки, о чем свидетельствуют результаты анализа экспериментальных данных. Дальнейшее изучение процесса микроволнового

нагрева целесообразно дополнить аналитическими исследованиями, среди которых наиболее важны данные по температуре материала, являющиеся базовыми для оценки эффективности действия микроволнового поля и влияния входных характеристик на технологический процесс. Составление математических моделей, адекватно отражающих физическую сущность протекающих явлений под действием микроволнового поля, сопряжено с определенными трудностями, связанными с многофакторностью взаимодействия электромагнитного поля с полярными диэлектриками и необходимостью при переходе к тепловой схеме исключения вторичных элементов. Анализ подходов к составлению моделей взаимодействия микроволнового поля с материалом показал, что корректные математические модели теплопроводности для рассматриваемой области исследований, можно получить, основываясь на моделях А.В. Лыкова, приведенных в [1], в основе которых лежит уравнение теплопроводности с учетом внутренних источников теплоты, которые могут быть как положительными, так и отрицательными. Объемный характер нагрева материала в микроволновом поле позволяет рассматривать материал как среду, в которой действуют внутренние положительные источники теплоты. Следует отметить, что решения, приведенные в [1], справедливы для условия, когда температура окружающей среды (при граничном условии III рода) или температура поверхности (при граничном условии I рода) больше температуры материала: $t_c > t_0$. Предварительно проведенный переход к безразмерным избыточным температурам путем замены переменной с целью приведения к форме, соответствующей задаче охлаждения при условии $t_c < t_0$, не привел к получению данных, адекватно отражающих процесс нагрева от действия внутренних источников, при котором температура окружающей среды не превышает температуру материала. Именно такие условия реализуются при нагреве материала в микроволновом поле.

Таким образом, для аналитического исследования температурного поля в условиях микроволнового нагрева и изменений температуры материала при условии $t_c < t_0$ необходимы соответствующие математические модели. Для полуограниченного массива с учетом действия положительного (микроволновое поле) и отрицательного (определяемого потоком испарившейся влаги) получена зависимость при ГУ I рода [2]:

$$t(x, \tau) = (1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}) t_0 + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \cdot t_{нов} - \\ - \frac{q_{v10}}{c\rho a \gamma^2} \left[e^{-\gamma x} - \frac{1}{2} e^{\gamma^2 a \tau - \gamma x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \gamma \sqrt{a\tau} \right) + \frac{1}{2} e^{\gamma^2 a \tau + \gamma x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \gamma \sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right] - \\ - \frac{q_{v20}}{c\rho a \beta^2} \left[e^{-\beta x} - \frac{1}{2} e^{\beta^2 a \tau - \beta x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \beta \sqrt{a\tau} \right) + \frac{1}{2} e^{\beta^2 a \tau + \beta x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \beta \sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right] \quad (1)$$

где a - коэффициент температуропроводности, γ - коэффициент поглощения (электромагнитной энергии), β - коэффициент затухания отрицательного внутреннего источника, обусловленного испарением влаги, нижний индекс 0 при удельных мощностях показывает, что величина относится к максимальному значению. На рис. 1 приведены кривые, полученные по результатам расчетов температуры с помощью зависимости (1) при $q_{v20} = 0$ (период прогрева). Материал - зерно пшеницы и вода. Исходные данные для расчета следующие: начальные температуры материала и среды равны: $t_c = t_0 = 20^\circ\text{C}$, коэффициент поглощения воды $\gamma_v = 125 \text{ м}^{-1}$, коэффициент поглощения зерна $\gamma_z = 30 \text{ м}^{-1}$.

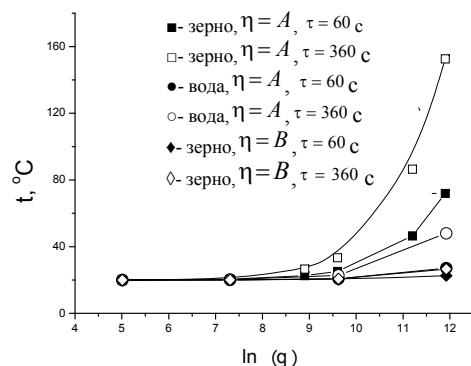


Рис. 1 – Изменение температуры материала в зависимости от удельной мощности внутренних источников и вида материала

Расчет для воды и зерна при одинаковой эффективности преобразования микроволновой энергии во внутреннюю энергию тела ($\eta \equiv A=1$) показал, что температурные кривые для воды располагаются ниже кривых для зерна. Это объясняется тем, что для корректного сопоставления температур следует учитывать значение диэлектрических характеристик материала (так, для воды при 20°C $\epsilon''=82$, для зерна $\epsilon''=2,6$). С этой целью целесообразно использовать данные по КПД микроволновой камеры η . Экспериментальные зависимости, полученные для определения КПД камеры при ее загрузке зерном, приведены в [2]. Расчет температур зерна, проведенный при $\eta \equiv B=0,47$ Вт/м³, привел к верному распределению температурных кривых. В этом случае температура зерна ниже, чем температура воды, и их значения коррелируются с экспериментальными. Расчет изменения температуры по глубине массива также показал соответствие аналитической модели реальному физическому процессу, что доказывает возможность описания нагрева материалов в микроволновом поле точными аналитическими методами.

Список литературы

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., 1967. 559 с.
2. Волгушева, Н. В. Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты: дисс... канд. техн. наук: 05.14.05. Одесса, 2005. 225 с.

УДК. 664.723.011

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ СУШКИ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К СУШКЕ СЛОЯ ЗЕРНА С КОНДУКТИВНЫМ ЭНЕРГОПОДВОДОМ THE DRYING PROCESSES THEORETICAL ANALYSIS AND ITS APPLICATION TO CONDUCTIVE GRAIN DRYING

Генрих Ф. Смирнов*, Александр В. Зыков**
Henry F. Smirnov*, Aleksandr V. Zykov**

*Одесская национальная академия пищевых технологий; Украина, Одесса,
(e-mail: g.smirnov@e-mail.ua)

**Одесская национальная академия пищевых технологий; Украина, Одесса,
(e-mail: zav380@yahoo.com)

Odessa national academy of food technologies, Ukraine, Odessa

Аннотация: Это начало анализа физического представления процессов сушки. Авторы пытаются сделать некоторые новые шаги по развитию этого представления и его теоретического описания. Основной идеей авторов является существование минимум двух форм торможения во время сушки. Первая проявляется, когда влага на поверхности начинает исчезать. Вторая проявляется, когда начинает испаряться влага из внутреннего объема, в том числе происходит углубление зоны испарения. Торможение в первой форме связано с элементами влаги остающимися в углах в мест контакта. В результате, это приводит к возрастанию капиллярного давления и, соответственно, уменьшению давления паров над поверхностью материала и, соответственно, движущей силы. Авторы полагают, что этот подход имеет смысл и может быть использован в дальнейшем, на следующих этапах разработки подходов к описанию процесса.

Abstract: This is an initial part of drying processes physical imagination overview. The authors are trying to do some new steps to develop this processes imaginations and theoretical prescriptions. The authors' key idea is the minimum two forms of decelerations exist during drying processes. The first one appears, when moisture on the dried surface external part is beginning to disappear. The second one is appearing, when moisture starts to vaporize from the seeds internal volume, including the liquid - vapor phase border deepening inside internal channels. The deceleration in the first form is connected with last elements of the moisture are beginning to get deeper in the some corners in the contact seeds places. As the result, it is leading to the surface tension pressure increasing and correspondingly decreasing of acting pressure, which ensures the vapor removing. The authors suggest that this approach has a sense and can be used for the next steps of the approach development.

Ключевые слова: сушка; термосифон; моделирование; капиллярное торможение; теплоперенос.

Keywords: drying; thermosyphon; simulation; capillary deceleration, heat transfer.

1. Введение.

В обстоятельной монографии [1] приводится объективный анализ современных взглядов на закономерности процессов сушки. Приведем то, что пишет в [1], на эту тему автор: «Фундаментальные основы теории сушки сложились в середине прошлого столетия и базируются на работах А.В.Лыкова и П.А.Рабиндера [2,3]. Основываясь на этих положениях, развиваются несколько научных направлений в теории сушки. Аналитические исследования посвящаются моделям градиентного переноса и термодинамическим моделям. Феноменологическая модель А.В.Лыкова дополнена Луциком П.П. соотношениями для учёта деформации в материале [4]. Углубленный анализ кинетики сушки проводится в центре сушки ИТТФ под руководством А.А. Долинского [5]. В работах Ю.Ф. Снежкина и Н.И. Никитенко предложена оригинальная модель влаго - об-

мена [6]». Такая краткая характеристика дана автором [1] в Введении. Далее в нём же приводится перечень многочисленных направлений экспериментальных исследований процессов сушки, их авторов и оценки их значимости. В завершении в этом Введении автор пишет: «В данной монографии [1], не ставилась цель глубокого исследования теории сушки. Стержневым вопросом была энергетика технологии обезвоживания продуктов». Таким образом, опираясь на приведенную информацию и её объективную оценку существующего положения в теоретическом анализе процессов сушки можно считать, что существующие взгляды и концепции на физическую природу и принципиальные внутренние механизмы процессов сушки нуждаются в углубленном подходе, вскрывающем сущность тех механизмов процесса, которыми объясняются главные его особенности. **В настоящей работе авторами предпринимается попытка сделать в этом направлении свой шаг.** Так как необходимо сравнение с данными опытов для объективной оценки справедливости предлагаемого подхода, то для этого использовались полученные под руководством проф. Бурдо О.Г. данные опытов по сушке зернового слоя. В предлагаемом подходе, как указано в названии, рассматривается сушка нагреваемого, но не деформируемого материала. Принимается, что нагрев осуществляется через контакт греющей поверхности с нагреваемым материалом. Эта схема отвечает реальным условиям опытов, результаты которых используются для сопоставления с расчётами по предлагаемой модели, а условия опытов изложены в [7,8]. Принципиальная схема подхода авторов состоит в следующем:

1. Принимается, что на первом этапе построения математических моделей процессов сушки следует сформировать ту часть общей структуры, в которой, на основе учёта типа источника энергии и тепловых связей с ним объекта сушки решаются проблемы расчёта нестационарных температурных полей в объекте. В рамках этого этапа также записываются условия равновесия на границах раздела фаз, т.е. на поверхностях испарения.

2. На следующем этапе формируются те части моделей, в которых на основе данных о структуре среды (пористость, размеры пор, их стабильность или не стабильность и т.д.) записываются те уравнения, которые определяют режимы и законы движения массы удаляемой в процессе сушки влаги. При этом принимается, что в зависимости от типа объекта (сплошное пористое тело; слой зёрен; слой порошков; ткань; плёнка и т.д.) выбираются модели движения как для удаляемой влаги из внутренних поверхностей мини – или микро – каналов, так и из внутренних объёмов (в особенности для пищевых продуктов).

3. Далее записываются основные соотношения, связывающие распределения температур с величинами, которыми определяются «движущие силы» локальных процессов переноса массы. Принимается, что в пределах элементарных ячеек или объёмов, для определения массы удаляемой влаги, допустимо использовать известные формулы массоотдачи, в которых присутствуют найденные величины «движущих сил», удельные поверхности испарения и коэффициенты массоотдачи. При этом формулы для расчёта локальных коэффициентов массоотдачи принимаются из известных или принятых критерийных формул. Этот элемент построения общей схемы расчёта содержит наибольший уровень неизвестности. Поэтому, авторы полагают, что вначале допустимы различные формы выбора этих расчётных формул, например, допуская аналогию с процессами переноса тепла и принимая необходимые расчётные формулы и др.

4. На завершающем этапе предполагается совместное объединение расчётных соотношений в некую единую общую модель и осуществление расчётных упражнений, в которых в качестве основной цели служит величина убыли влаги. При этом возможен различный уровень этой величины, в зависимости от требований технологии: (удаление заданного количества влаги, при котором не достигается полное осушение; более глубокий уровень осушения, при котором удаляется вся или почти вся влага с внутренних поверхностей структуры; полное осушение не связанное с удалением влаги принадле-

жащей материалу объекта; полное удаление всей влаги, включающей ту, что принадлежит самому материалу объекта и т.д.).

5. По результатам предыдущих этапов может возникнуть необходимость в корректировках соотношений в первоначальных этапах (1, 2 и др.) по результатам конечного этапа (4). Так, например, может оказаться необходимым в исходных уравнениях для расчётов нестационарных температурных полей, учитывать затраты энергии, связанные с испарением влаги и т.д. Проявится необходимость организации соответствующей процедуры последовательных приближений. Авторы попытались осуществить этот подход, используя в качестве объекта слой зерна, который нагревается путём контакта этого слоя с внешней поверхностью вращающегося испарительного термосифона как [7,8].

2. Модели распределений нестационарных температур и связанных с ними «движущих напоров» массоотдачи при заданных условиях сушки.

Уравнение, определяющее изменение средней температуры нагреваемого слоя зерна заданных размеров, может быть получено как уравнение энергии при нестационарном нагреве системы, состоящей из греющего устройства (испарительный вращающийся термосифон имеющий массу M_1 и удельную теплоёмкость C_1 , а, также массу заправки теплоносителя M_2 и её теплоёмкость C_2 , объём V_2 и теплоту фазового перехода r), зернового слоя с своей массой $M_3 = \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3$ и теплоёмкостью C_3 , в котором и осуществлялся процесс сушки. Это уравнение не учитывает затраты тепла на сам процесс сушки, так как для этого необходимо знание результата сушки (массы удалённой влаги в динамике), и имеет следующий вид:

$$Q = (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) \cdot dt_1 / d\tau + \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3 \cdot dt_3 / d\tau + r \cdot V_2 \cdot dp_2 / d\tau$$

Между текущими значениями температур $t_1; t_3$ существует связь, определяемая условиями тепло – массопереноса. Учёт этой связи и сопоставление масштабов отдельных слагаемых показали, что в начальные моменты времени эта формула может иметь такой вид:

$$dt_1 / d\tau = Q / [(M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2 + M_3 \cdot C_3)]$$

Из этого следует, что весь начальный период сушки по этой технологии связан с нестационарным режимом нагрева, когда основные температуры греющей поверхности и зернового слоя будут изменяться в времени. Это обстоятельство следует учитывать в расчётах процессов массоотдачи. Следует также в уравнении энергии учитывать затраты тепла, связанные с его отводом от внешних поверхностей ИТС в окружающую среду. Такой учёт приводит к следующему уравнению:

$$Q = (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2 + M_3 \cdot C_3) \cdot dt_1 / d\tau + \alpha_3 \cdot [t_1 - t_{oc}] \cdot S_{32} \quad (1)$$

здесь: $S_{32} = (1 - k_3) \cdot S_3$ - масштаб внешней поверхности ИТС, от которой отводится тепло в окружающую среду. Поскольку, как отмечалось, уравнение (1) становится за-

метно проще. Его решение принимает вид: $t_1 - t_{oc} = \frac{A_1}{B_1} \cdot [1 - \exp(-B_1 \cdot \tau)]$, где:
 $A_1 = Q / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2 + M_3 \cdot C_3) \cdot dt_1 / d\tau$ $B_1 = \alpha_3 \cdot S_{32} / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2 + M_3 \cdot C_3)$,
 α_3 – коэффициент теплоотдачи от ИТС к зерну.

Важным моментом расчёта является анализ распределения в части зернового слоя, в которой осуществляется нагрев. Это часть слоя толщиной: $\delta_0 = \sqrt{C_0 \cdot a_0 \cdot \tau_i}$ (2), где a_0 – эффективный коэффициент температуропроводности, τ – время нагрева.

Учёт перемешивания слоя было предложено сделать по аналогии тому, как влияет турбулентное перемешивание на интенсивность переноса тепла в жидкостных турбулентных струях [13]. Нужная формула из [13] имеет такой вид: $a_0 = a_0 + \varepsilon_0 \cdot W_i \cdot L$, где a_0

– коэффициент температуропроводности, ε_0 – эмпирический коэффициент, W – скорость вращения. Для определяющего размера принято, что он равен полной толщине слоя: $L = \delta_{30}$. Система расчётных формул теплопроводности данной задачи имеет следующий вид:

$$T_{li} = T_{oc} + Z_{li} \cdot (T_{li} - T_{oc}),$$

$$Z_{li} = \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo_i}}\right) - \exp\left[\frac{\alpha_{22}}{\lambda_{\phi}} \cdot L_i \cdot \frac{(a_{22})^2}{(\lambda_{\phi})^2} \cdot a_g \cdot \tau_i\right] \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{2\sqrt{Fo_i}} + \frac{\alpha_{22}}{\lambda_{\phi}} \sqrt{a_g \cdot \tau_i}\right]$$

Где Fo_i – текущее значение числа Фурье, α_{22} – коэффициент теплоотдачи, L_i – линейный размер, λ_{ϕ} – коэффициент эквивалентной теплопроводности зернового слоя.

Знание температур в местах, в которых возможно испарение, даёт основы для расчётов парциальных давлений и определения «движущих сил» процессов массоотдачи.

Ключевым служит уравнение: $P_{li} = P_0 \cdot \exp(Z_{li})$ $Z_{li} = (r/Rl) \cdot \left(\frac{1}{T_{oc}} - \frac{1}{T_{li}}\right)$. Тут: r – теплота испарения, Rl – газовая постоянная, P_i , P_0 – парциальные давления на i -ых поверхностях испарения и в внешней среде, T_{oc} , T_{li} – её температура и температуры испарения на i -ых поверхностях, соответственно.

3. Модели движения паровоздушной смеси из внутренних объёмов и процесса массоотдачи при испарении, реализующих сам процесс сушки.

Предполагается, что первоначальным источником удаления испарённой влаги является повышение давления в паровоздушной смеси под действием перепада давлений между избыточным давлением, возникающим как следствие испарения с влажной поверхности и давлением в окружающей тело внешней среде. Предлагается использовать известное уравнение фильтрации, отвечающее линейному закону Дарси и имеющему

следующий вид: $W_{li} = \frac{\Delta P_{li} \cdot K_{fi}}{S_{li} \cdot \mu_{li}}$ где: ΔP_{li} – перепад давления в зерновом слое, S_{li} – площадь поверхности фронта прогретого слоя, μ_{li} – вязкость влажного воздуха в прогретом слое.

Определение проницаемости при известных данных по структуре слоя (размер зёрен D_0 , пористость слоя ε_i и пр.) возможно, если использовать расчётные формулы Кармана – Козени или им подобные, имеющие вид:

$$K_{fi} = \operatorname{const} \cdot \varepsilon_i^3 \cdot D_0^2 / (1 - \varepsilon_i)^2$$

Для расчётов процессов массоотдачи при испарении внутри слоя необходимы коэффициенты массоотдачи. Обычно, для них зависимости не известны, а в многих случаях трудно определяемы. Авторы полагают, что на рассматриваемом этапе, зависимости можно найти из [11], используя имеющиеся формулы для процесса внутренней теплоотдачи в виде: $Nu_D^1 = 2,35 \cdot Pe_D^{0,38} \cdot (L/D_i)^{0,4}$, характерная скорость движения в слое, погружённом в вращающейся греющей объём ИТС радиусом R_0 и скоростью вращения n оборотов в минуту равна: $W_{сл} = n \cdot 2\pi R_0$.

Плотность потока массы в «движущейся нагретой зоне» определяется из известного уравнения массоотдачи: $j_{E1} = \beta_p \cdot (P_W - P_{E1}) \cdot S_y \cdot (2 \cdot \delta_{bi} \cdot \pi \cdot D_i + \delta_{bi}^2) \cdot L_i$. Здесь: j_{E1} – плотность потока массы влаги, переносимой из зернового слоя от внешней поверхности ИТС к внешней движущейся границе перегретой зоны; β_p – коэффициент массоотдачи; P_W , P_{E1} – парциальные давления паров воды у стенки ИТС и в внешней среде (т.е. у условной движущейся границы нагретой зоны); $F = S_y \cdot L_i$ – поверхность массоотдачи, включая в первой стадии сушки всю внешнюю поверхность зёрен в пределах нагретой зоны, участвующей в процессе.

На основе положений изложенных в параграфах 2 и 3 сформирован алгоритм расчёта процесса сушки. Существенным дополнительными элементами этого расчёта явля-

ются процедуры, учитывающие как в самом процессе сушки возникают механизмы, подавляющие интенсивность этого процесса, вызывающие **торможение**.

4. Модель формирования «капиллярного механизма торможения» процесса сушки зернового слоя.

Предполагается, что первый такой механизм связан с удалением влаги, находящейся на внутренней, но внешней поверхности испарения. В различных объектах этот механизм проявляется различным образом. В случае, который изучался авторами и относился к сушке слоя зерна, по представлениям авторов, испарение влаги с внешней поверхности зёрен приводит к снижению её объёма и, как следствие, к утонению соответствующей плёнки жидкости, что ведёт к её перемещению к узким местам слоя: к местам контактов отдельных зёрен. Так как это имеет место при испарении, то в этих местах контактов возникают «углубляющиеся» по мере испарения криволинейные границы раздела фаз пар + жидкость. При этом кривизна этих границ раздела возрастает, что ведёт к появлению существенного по величине «капиллярного давления» снижающего «движущую силу» процесса массоотдачи. Схема расчётов отвечающих этому поло-

жению имеет следующую форму: $V_i = M_i / \rho_0 = [(M_0 - M_{2i}) - \Sigma (\Delta M_i)] / (N_{li} \cdot m \cdot \rho_0)$. Здесь: V_i – остаток внешней влаги к моменту начала этапа «капиллярного» механизма торможения; M_0 – исходное количество (масса) влаги в слое; M_{2i} – та масса влаги, что находится внутри зёрен; $\Sigma (\Delta M_i)$ – сумма всех уменьшений массы влаги от начального 0 нулевого момента до данного i – ого; ρ_0 – плотность влаги, N_{li} – число зёрен в i – ой части слоя, m – среднее число узлов, в которых формируются границы раздела фаз жидкость – пар.

Исходя из знания остатка поверхностной влаги, и полагая, что он распределяется, главным образом, в местах контакта элементов (зёрен) слоя, можно сделать оценку радиуса кривизны криволинейной границы раздела фаз, полагая, что этот радиус связан с масштабом объёмов жидкости в местах её размещения кубическим законом, т.е. : $R_{0i}^3 \approx \operatorname{const} \cdot V_i$. Знание радиуса позволяет вычислить отвечающее ему «капиллярное дав-

ление»: $\Delta P_{ci} = 2 \cdot \frac{\sigma}{R_{0i}}$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Когда этот радиус кривизны становится близким к радиусам внутренних каналов среды, которая осушается, тогда наступает переход к испарению влаги из внутренних каналов, этот процесс авторами не рассматривался по целому ряду причин: 1. В столь малых по размерам каналах движение паровоздушной смеси перестаёт быть сплошным, т.е. оно подчиняется закономерностям молекулярных течений; 2. На внутренних поверхностях этих каналов при испарении должны иметь место скачки температур и давлений; 3. Нам не известна необходимая исходная информация по таким расчётам, включая сведения о размерах этих каналов, их распределении и т.д. Можно полагать, что результаты названных исследований и развитие, на их основе анализа соответствующих процессов тепло массопереноса, приведут к обнаружению своих механизмов торможения процесса сушки. Развернутый алгоритм и важные результаты для испарения поверхностной влаги представлены ниже.

5. Алгоритм расчета процесса с учетом механизма капиллярного торможения.

Алгоритм расчета основан на определении для каждого момента времени толщины прогретого слоя, в пределах которого происходит испарение, по формуле (2) и решении системы уравнений материального баланса, учитывающей материальные потоки в прогретом слое — испарение с поверхности G1, фильтрация сквозь слой материала G2, диффузия водяного пара G3 и воздуха G4:

$$\begin{cases}
 \frac{dG1}{d\tau} = \beta [P_n - (P_{pv} + dP_{pv})] \cdot V \cdot S_y \\
 \frac{dG2}{d\tau} = \frac{K_f}{\delta_{30} \cdot \mu} \cdot [(P_{sl} + dP_{sl}) - P_0] \cdot \rho_a \cdot S_y \cdot V \\
 \frac{dG3}{d\tau} = \frac{D_{op}}{R_a T1} \cdot \frac{(P_{pv} + dP_{pv}) - P_{pv0}}{D_t - \frac{\delta_e}{2}} \cdot \pi \cdot L_t \cdot (D_t + 2\delta_e) \\
 \frac{dG4}{d\tau} = \frac{D_{op}}{R_a T1} \cdot \frac{(P_{pv} + dP_{pv}) - P_{pv0}}{D_t - \frac{\delta_e}{2}} \cdot \pi \cdot L_t \cdot (D_t + 2\delta_e) \\
 dM = dG1 - dG2 - dG3 + dG4 \\
 dM = dM_a + dM_v \\
 dM_a = -\frac{1}{1+x} dG2 + dG3 \\
 dM_v = dG1 - \frac{x}{1+x} dG2 - dG3
 \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая, что:

$$P_{sl} = P_{pv} + P_{pa} \quad dP_v = \frac{R_v \cdot T1}{V_a} \cdot dM_v \quad dP_a = \frac{R_a \cdot T1}{V_a} \cdot dM_a \quad dP_{sl} = dP_a + dP_v \quad (4)$$

где P_n - давление водяного пара над поверхностью зерна, P_{pv} , P_{pa} - парциальное давление водяного пара и сухого воздуха в прогретом слое, $T1$ - температура прогретого слоя, M , M_a , M_v - масса влажного воздуха, масса сухого воздуха и масса водяного пара в прогретом слое, V_a - объем воздуха в прогретом слое, x - влагосодержание воздуха в прогретом слое, размеры ИТС

Система (3) может быть преобразована к виду

$$ZX28 \cdot dM_a^4 + ZX33 \cdot dM_a^3 + ZX34 \cdot dM_a^2 + ZX35 \cdot dM_a + ZX36 = 0 \quad (5)$$

корнем которого является изменение массы сухого воздуха в слое за время Δt . Решение уравнения 5 позволяет определить изменение массы водяного пара в прогретом слое и количество удаленной влаги

$$dG1 = \left[dG3 + dM_v - \frac{dM_a \cdot (M_v + dM_v)}{M_a + dM_a} \right] \quad (6)$$

Так как, изменение массы слоя происходит только за счет удаления влаги ($\Delta M = dG1$), то используя зависимости 2-6 можно определить снижение движущей силы процесса испарения влаги с поверхности за счет капиллярного торможения. Это снижение движущей силы учитывается при расчете процессов в прогретом слое в следующий момент времени.

6. Основные результаты моделирования.

Результаты моделирования представлены на следующих графиках

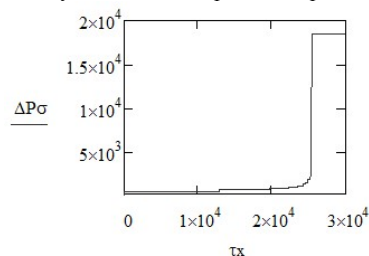


Рис. 1. Изменение капиллярного давления за время tx

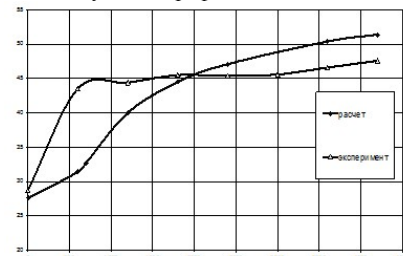


Рис. 2. Изменение температуры прогретого слоя за время tx

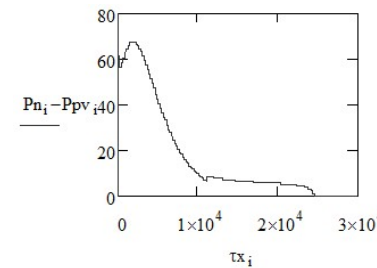


Рис. 3. Изменение движущей силы за время tx

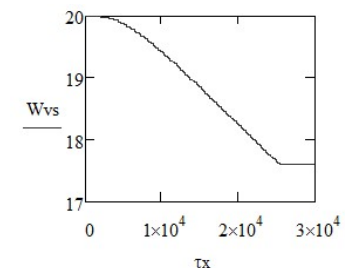


Рис. 4. Изменение влагосодержания во времени

Как можно заметить, количество влаги на внешней поверхности уменьшается, что приводит к уменьшению радиуса кривизны на границе фаз, а это сопровождается увеличением капиллярного давления и соответствующим снижением "движущей силы" переноса массы в этот момент, что приводит к резкому сокращению скорости удаления влаги. На рисунке 2 приведено сравнение результатов расчета температуры прогретого слоя с экспериментальными данными. Результаты сравнения показывают более высокую интенсивность прогрева зернового слоя на начальном этапе по сравнению с расчетной. Для устранения такого расхождения необходимо учесть влияние вращения на параметры теплового режима сушки. Примем следующие начальные предположения: при вращении некоторая часть зернового слоя, имеющая температуру нагретой зоны перемещается в верхние слои и повышает их температуру. Это означает, что в последующем развитии процессов переноса, температурные перепады в нагретой зоне будут определяться не разностями температур: температура контакта – температура окружающей среды, а в значении последней следует вводить коррекцию, учитывающую повышение температуры в внешних элементах зернового слоя, как результат их смешения с элементами нагретой зоны, поступившими, в следствие перемешивания.

Выводы: Предложенный подход является новым шагом в описании внутренних механизмов процесса сушки. Он полезен для углубления анализа внутреннего механизма процессов сушки. Полагаем, что он может быть развит для разных объектов сушки, с учётом конкретных их особенностей. В будущем предполагаем такие пути исследований:

1. Необходимо разработать подходы, связанные с испарением в некоторых внутренних мини или даже микро каналах в средах, для которых изучается сушка.
2. Разные объекты потребуют развития этого подхода и выполнение специальных экспериментов. Это может быть связано, например, с такими проблемами как: 2.1.Определение распределения количество влаги внутри высушиваемой среды. 2.2.Определение размеров внутренних каналов и их распределения и т. д.
3. Основной целью этой работы являлось не получение формул для технических расчетов, но, попытка улучшить понимание многих особенностей процессов сушки и на этой основе улучшить обобщение расчётов характеристик процесса.
4. Авторы также считают, что такой подход является новой формой построения общей теории различных процессов сушки.

Список литературы

1. Бурдо О.Г. «Эволюция сушильных установок», Одесса., 2010, — 368стр.
2. Лыков А.В. «Теория сушки». М., Энергия, 1968г., — 472стр.
3. Ребиндер П.А. «О формах связи влаги с материалами в процессе сушки.», В кн. Всесоюзное научно – техническое совещание по сушке.,Проф.,1958, — с.286.

4. Луцик П.П. «Массопроводность деформируемого в процессе сушки твердого пористого тела.» Промышленная теплотехника. 1987. Т.9. №5, с.29-34.
5. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. «Оптимизация процессов распылительной сушки», Киев. Наукова думка. 1984. – 240с.
6. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. «Математическая модель и метод расчёта тепломассопереноса и фазовых превращений в процессах сушки» // «Промышленная теплотехника», 2001, Т.23, №3. – С.65- 73.
7. Безбах И.В., Бурдо О.Г. Термомеханический агрегат для дисперсных продуктов □/ Наукові праці ОДАХТ. – 1999. Вип. 21. – С. 234–237.
8. Воскресенская Е.В. Особенности кинетики процесса сушки в термосифонно-механическом агрегате // – Одеса, – Наукові праці, – вип.37, –2010р., –81–84с.
9. H.F. Smirnov, E.V. Voskresenskaya THE GRAIN LAYER DRYING APPROXIMATED MODEL // 8th Minsk International Seminar Heat Pipes Heat Pumps Refrigerators Pover Sources, –September12-15, –2011, –Belarus, –Vol.2, –2011, – р.203-208
10. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.И. ««Сушіння зерна», Из –во «Либідь», 1997,352стр.
11. Горбис З.Р. «Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков», Из –во «Энергия», Мос. 1970г. 424с.
12. Гинзбург А.С. и др. «Влага в зерне» 1969г. 224стр.
13. В.П.Исаченко «Теплообмен при конденсации», Изво «Энергия», Мос. 1977год, 240 стр.

УДК 637.002.69

ТЕПЛОЕМОСТЬ ПОРИСТЫХ СРЕД, НАСЫЩЕННЫХ СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ HEAT CAPACITY POROUS SUBSTANCES, SATURATED WITH SUPERCRITICAL HYDROCARBONS

Михаил А. Кузнецов*, Павел О. Овсянников*, Павел А. Нестеров**
Mikhail A. Kuznetsov*, Paul O. Ovsyannikov* Paul A. Nesterov**

*Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,

* Tambov State Technical University, Russia, Tambov,
(e-mail: kuznectam@mail.ru).

** ООО Тамбовский завод "Электроприбор"

** ООО Tambov Plant "Elektroprigor"

Аннотация: Разработан способ расчета теплоемкости углеводородов в сверхкритической области максимумов при $0,7 < \tau \leq 1,2$ и $1,05 < \pi < 2$ и программа его численной реализации методом интерполяции с помощью многочлена Лагранжа переменной степени. Разработаны прогнозные методы оценки теплоемкости песчаных и карбонатных пород в реальных условиях их залегания с помощью литологических треугольников. Предложена методика оценки влияния характера насыщения породы углеводородными флюидами на ее теплоемкость.

Abstract: The method of calculation of the specific heat hydrocarbons in the super-critical range highs at $0,7 < \tau \leq 1,2$ and $1,05 < \pi < 2$ program and its numerical implementation of the method of interpolation using Lagrange polynomial of variable degree. Developed methods for evaluating forward-looking heat capacity of sand and carbonate rocks in real conditions of their occurrence using litho-logical triangles. A method for assessing the impact of the nature of saturation in delivery of hydrocarbon fluids in its heat capacity

Ключевые слова: сверхкритический углеводород, насыщенная порода, литологический треугольник.

Keywords: supercritical hydrocarbon, saturated rock, lithology triangle.

Определение тепловых свойств флюидонасыщенных пластов, создание геотепловой модели месторождения углеводородов, решение комплекса энерготехнологических задач проектирования и разработки нефтяных и газовых месторождений, определения теплового режима скважины и оборудования, решение теоретических и прикладных задач нефтегазовой терморазведки невозможно без достоверных знаний о теплофизических свойствах сухих и насыщенных флюидами горных пород при условиях их залегания. Важнейшими в этом отношении являются теплопроводность и удельная теплоемкость.

Анализ статистических данных по опыту разработки и эксплуатации месторождений показал, что около 60 % запасов углеводородов в мире приурочено к песчаным пластам и песчанникам, 39 % – к карбонатным отложениям, 1 % – к выветренным метаморфическим и изверженным породам. В связи с этим, и учитывая сложность номенклатуры осадочных образований по их вещественному составу и структуре, при разработке метода мы ограничились рассмотрением карбонатных и песчаных пород.

Предложен следующий алгоритм прогнозирования теплоемкости углеводородонасыщенной породы. В образце породы выделяются три основных компонента и по литологическим треугольникам (рис. 1) определяется его теплоемкость при заданной температуре. Влияние температуры на теплоемкость при построении литологических треугольников нами оценивалось по уравнению Майера-Келли:

$$C_p = A + B \cdot T - C/T^2 \quad (1)$$

где A, B, C – индивидуальные константы для каждого типа породы.

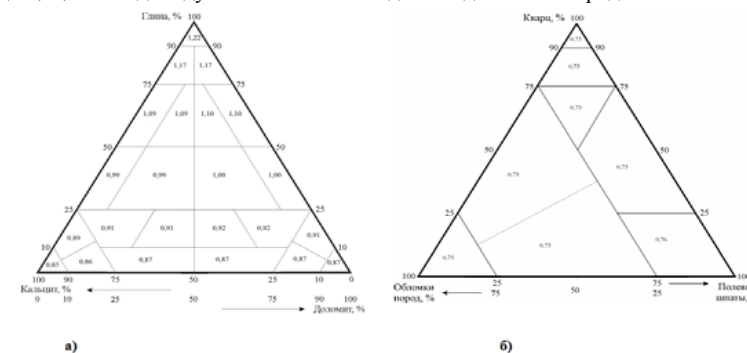


Рис. 1. Значение теплоемкости (кДж/кг·К) известняковой (а) и песчаной (б) породы при 300К

Численные значения A, B, C в уравнении (1) определялись по единственному найденным нами в литературных источниках данным (справочники Н.Н. Акинфиев, С.С. Епифанова, 2008 г. и К.П.Мищенко и А.А. Равделя, 1974 г.).

Для песчаных пород установлено, что теплоемкость слабо зависит от их минерального состава при температурах до 500К

Влияние давления на теплоемкость сухой породы можно оценить только качественно в связи с отсутствием систематизированных экспериментальных данных при давлениях до 100 МПа и строгой теории теплоемкости твердого тела. Однако, в результате анализа публикаций по литологии горных пород установлено, что теплоемкость породы слабо зависит от давления, таким образом, влиянием давления на скелет сухой по-

роды при прогнозных расчетах можно пренебречь в рассматриваемом интервале температур и давлений.

Углеродородный состав, насыщающего твердый образец флюида, при пластовых термобарических условиях может быть, довольно точно, определен по данным геофизического исследования скважины, а его теплоемкость рассчитана по методам и программам описанным в [1, 2].

Тогда теплоемкость флюидонасыщенного образца породы может быть определена по аддитивной формуле (правило Неймана-Коппа): теплоемкость сложной системы равна сумме теплоемкостей образующих систему компонентов.

$$C = C_1 \frac{m_1}{m_1 + m_2} + C_2 \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

где C_1 , m_1 – масса и теплоемкость сухой породы при пластовых термобарических условиях; C_2 , m_2 – масса и теплоемкость углеводородов при пластовых термобарических условиях. m_2 может быть определена при известном K_n – коэффициенте пористости породы.

Общая погрешность прогнозирования теплоемкости углеводородонасыщенной породы складывается из погрешности расчета теплоемкости насыщающего углеводорода (10%) и точности оценки влияния температуры на теплоемкость минерального скелета по формуле Майера-Келли. Последняя может быть оценена не выше 10%. К сожалению, без дополнительного систематизированного экспериментального изучения теплофизических свойств пористых пород пластовых резервуаров точность их прогноза не выше 20-25%.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант 14-08-00067а).

Список литературы

1. Кузнецов М.А., Овсянников П.О., Григорьев Е.Б., Богданов А.В. Теплоемкость углеводородов при сверхкритических термобарических условиях// Вестник газовой науки. Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов. ООО «Газпром ВНИИГАЗ». - №2(18) – Москва, 2014.- с. 59-64.
2. Программа для расчетов теплоемкости углеводородов метанового ряда при сверхкритических давлениях// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012612289. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02 марта 2012 г., Правообладатель Кузнецов М.А.

УДК 66.047

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТЕРМООБРАБОТКИ ТКАНИ В СУШИЛЬНОЙ МАШИНЕ MODELLING AND PROCESS CONTROL HEAT TREATMENT TEXTILE PRODUCTS IN DRYER

В.Ю. Волюнский, Я.С. Стороженко
V.U. Volynsky, J.S. Storozhenko

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

Аннотация: Разработана математическая модель процесса тепло- и массопереноса с сосредоточенными параметрами для тонких материалов, которая может быть использована для расчета процессов тепломассопереноса в полотноных материалах в случае малых изменений параметров. Решена задача оптимального управления процессом удаления влаги из тонких полотноных материалов на основе принципа максимума Понтрягина, что обеспечивает минимум времени сушки.

Abstract: The mathematical model of heat and mass transfer with lumped parameters for thin materials, which can be used for calculation of processes of heat and mass transfer in sheet materials in the case of small changes in the parameters. Solved the problem of optimal control of the process of removing moisture from thin sheet materials on the basis of the Pontryagin maximum principle, which minimises drying time.

Ключевые слова: сушка, термообработка материала, математическое моделирование, управление процессом.

Keywords: drying, heat treatment of the material, mathematical modeling, control of the process.

Один из наиболее широко используемых методов сушки в химической, пищевой, текстильной и других отраслях промышленности является конвективная сопловая сушка. Данный способ удаления влаги осуществляется посредством обдува сушимого материала струями сушильного агента, вытекающими из сопел направленных в основном перпендикулярно поверхности материала. Однако, несмотря на ряд преимуществ, сопловые сушилки обладают довольно низкой испарительной способностью, что является лимитирующим фактором всего производственного процесса. В связи с этим целью данной работы явилась разработка математической модели двусторонней сопловой сушки тонких полотноных материалов и определение рациональных режимов подвода теплоносителя, позволяющих интенсифицировать процессы тепломассопереноса.

В качестве объекта сушки была выбрана группа тонких полотноных материалов (ситец, миткаль и другие). Деление материалов на «тонкие», «средние» и «толстые» обусловлено особенностью механизма переноса пара в материале, а не абсолютной величиной толщины полотна [1]. В совокупности же такие величины, как толщина, удельная масса материала, теплофизические свойства, а также влагосодержание по существу определяют механизм переноса тепла и массы и, в конечном счете, интенсивность и длительность сушки. К группе тонких полотноных материалов относятся материалы с удельной массой до 0,4 кг/м². Материалы данной группы имеют толщины порядка (0,1÷0,4) 10⁻³ м. Это обстоятельство позволяет существенно упростить математическое описание процесса и перейти от решения задач тепло и массообмена с распределенными параметрами к решению с сосредоточенными параметрами (пренебрегая градиентом температуры и влажности по слою материала).

Для технико-экономических расчетов процессов тепло и массообмена и для поиска оптимальных режимов их проведения, возможно, использовать упрощенные модели этих процессов, в то время как «классические» модели представляют собой системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Известно, что математическое описание процессов тепло- и массопереноса в телах канонической формы предложено А.В. Лыковым [2]. Такого рода описанию соответствует система уравнений, ставшая уже классической:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon \rho}{c} \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} &= a' \frac{\partial^2 u(x, \tau)}{\partial x^2} + a' \delta \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где a , a' – соответственно коэффициенты температуропроводности и влаговодности; ε – критерий фазового превращения; c – теплоемкость тела; ρ – удельная теплота фазового перехода; δ – термоградиентный коэффициент; t – температура материала; u – влагосодержание тела.

Переходя к безразмерным переменным по пространственной координате и по времени и выполнив ряд преобразований система уравнений (1) переписывается в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t(l, Fo)}{\partial Fo} &= \frac{\partial^2 t(l, Fo)}{\partial l^2} + b \frac{\partial u(l, Fo)}{\partial Fo} \\ \frac{\partial u(l, Fo)}{\partial Fo} &= a^* \frac{\partial^2 u(l, Fo)}{\partial l^2} + b^* \frac{\partial t(l, Fo)}{\partial Fo} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $b = \frac{\varepsilon \rho}{c}$; $a^* = \frac{a'}{a \left[1 + \frac{\varepsilon \rho a' \delta}{ac} \right]}$; $b^* = \frac{a' \delta}{a \left[1 + \frac{\varepsilon \rho a' \delta}{ac} \right]}$; $Fo = \frac{a \tau}{R^2}$; $l = \frac{x}{R}$; R – половина толщины тела, которое представляет собой неограниченную пластину, симметричную относительно начала координат $x = 0$.

Далее рассмотрим симметричную задачу нестационарного тепло и массообмена с граничными условиями третьего рода. Краевые условия в этом случае запишутся для первого уравнения:

$$\left. \begin{aligned} - \frac{\partial t(l, Fo)}{\partial l} \Big|_{l=+1} + Bi[t_c - t(l, Fo)] \Big|_{l=+1} &= 0 \\ \frac{\partial t(l, Fo)}{\partial l} \Big|_{l=-1} + Bi[t_c - t(l, Fo)] \Big|_{l=-1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$t|_{\tau=0} = t_0 = const \quad \text{при} \quad Fo = 0$$

и для второго уравнения:

$$\left. \begin{aligned} + \frac{\partial u(l, Fo)}{\partial l} \Big|_{l=1} + Bi^*[u(l, Fo) - u_c] \Big|_{l=1} &= 0 \\ - \frac{\partial u(l, Fo)}{\partial l} \Big|_{l=-1} + Bi^*[u(l, Fo) - u_c] \Big|_{l=-1} &= 0 \\ u(l, Fo)|_{Fo=0} = u_0(l) = const \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где Bi – критерий Био; Bi^* – аналог критерия Био для уравнения массопереноса; t_c , u_p – температура окружающей среды и равновесное влагосодержание тела.

Так как рассматриваемая группа полотенных материалов имеет достаточно малые размеры тела, то и достаточно малы будут соответствующие критерии Bi , Bi^* – задачу с распределенными параметрами можно свести к задаче с сосредоточенными параметрами [3], что по существу соответствует рассмотрению двух первых корней характеристического уравнения.

Введем понятие средней температуры и среднего влагосодержания:

$$\theta = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 t(l, Fo) dl; \quad W = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 u(l, Fo) dl \quad (5)$$

Интегрируя уравнения системы (2) в пределах от -1 до $+1$ при этом используем краевые условия (3, 4) и выражения (5), получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta}{dFo} &= Bi(t_c - \theta) + b \frac{dW}{dFo} \\ \frac{dW}{dFo} &= -Bi^* a^* (W - u_c) + b^* \frac{d\theta}{dFo} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\theta|_{Fo=0} = \theta_0; \quad W|_{Fo=0} = W_0$$

Это система обыкновенных дифференциальных уравнений.

Если считать, что материал до того как попасть в зону тепло- массопереноса находился в некотором равновесном состоянии со средой, соответствующем начальным условиям, то математическое описание будет соответствовать некоторому исходному состоянию среды.

$$\left. \begin{aligned} \theta_0 &= t_c^0 \\ W_0 &= u_c^0 \end{aligned} \right\} \quad \text{при} \quad Fo = 0 \quad (7)$$

Далее материал попадает в зону тепло- и массообмена, где переменные окружающей среды получают соответствующие приращения.

$$\Delta u_c = u_c - u_c^0; \quad \Delta t_c = t_c - t_c^0 \quad (8)$$

Соответственно переменные системы также получают приращения:

$$\Delta \theta = \theta - \theta_0; \quad \Delta W = W - W_0 \quad (9)$$

Подставим (9) в систему (6), учитывая (7, 8, 9), и получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta \theta}{dFo} &= Bi(\Delta t_c - \Delta \theta) + b \frac{d\Delta W}{dFo} \\ \frac{d\Delta W}{dFo} &= -Bi^* a^* (\Delta W - \Delta u_c) + b^* \frac{d\Delta \theta}{dFo} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\Delta \theta|_{Fo=0} = 0; \quad \Delta W|_{Fo=0} = 0$$

Если считать в линейном приближении:

$$\Delta W_c = \kappa'' \Delta t_c \quad (11)$$

то систему уравнений (10) можно свести к уравнению второго порядка.

$$(1 - b^* b) \frac{d^2 \Delta W}{dFo^2} + (a^* Bi^* + Bi) \frac{d\Delta W}{dFo} + a^* Bi^* Bi \Delta W = (Bi b^* - a^* Bi^* \kappa'') \frac{d\Delta t_c}{dFo} - \kappa'' a^* Bi^* Bi \Delta t_c \quad (12)$$

Если считать, что уравнение (12) имеет нулевые граничные условия, тогда оно переписывается:

$$(1-b^*b)\frac{d^2\Delta W}{dFo^2} + (a^*Bi^* + Bi)\frac{d\Delta W}{dFo} + a^*Bi^*Bi\Delta W = -Bi^2b^* \quad (13)$$

В качестве примера тонких полотноных материалов была выбрана группа легких тканей. В этом случае дифференциальное уравнение (13) можно записать с численными значениями коэффициентов [2, 5-7]:

$$T_1T_2\frac{d^2W}{dFo^2} + (T_1 + T_2)\frac{dW}{dFo} + x = \kappa \quad (14)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{T_1} = -26,533; \quad \alpha_2 = \frac{1}{T_2} = -1,138$$

$$\kappa = -\frac{Bi^*b^*}{Bi^*a^*} = 7,65 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{кг влаги/кг сух. материала}}{^\circ\text{C}} \right] \quad (15)$$

Решим задачу по минимизации времени сушки. Для ее решения применим принцип максимума Понтрягина. Общее решение известно: $t_c(Fo) = \sigma \cdot t_c^{max}$, где σ может принимать значения 0 или 1. Причем известно и количество переключений, равное, в нашем случае, порядку уравнения (14), т.е. двум. Определим моменты переключения управляющего воздействия, для чего применим известный метод стыковки решений дифференциального уравнения [8]. Возьмем для примера следующие параметры объекта исследований: $W_0 = 1$ (кг вл./кг сух. мат.); конечное влагосодержание $W_\kappa = 0,08$ (кг вл./кг сух. мат.); $t_0 = 20^\circ\text{C}$; максимальная температура сушильного агента $t_c^{max} = 150^\circ\text{C}$ [9].

Так как уравнение записано в пирашениях, то перепишем условие задачи следующим образом:

$$dW(Fo)/dFo|_{Fo=0} = 0, \quad W_0 - W_\kappa = 0,92 \text{ [кг вл./кг сух. мат.]}$$

$$dW(Fo)/dFo|_{Fo=F_{0x}} = 0, \quad 0 \leq t_c(Fo) \leq 150^\circ\text{C}, \quad \text{т.е. } t_c^{max} = 150^\circ\text{C}$$

Так же будем считать, что в нормальном режиме процесс проводится при постоянной температуре равной $t_c = W_\kappa / k = 120,21^\circ\text{C}$ - последний параметр нам понадобится для сравнения существующего и оптимального времени процесса. Запишем решение уравнения (14) на первом интервале управления:

$$\begin{cases} W(Fo) = C'_0 + C'_1 e^{-Fo/T_1} + C'_2 e^{-Fo/T_2} \\ \frac{dW}{dFo} = -\frac{1}{T_1} \cdot C'_1 e^{-Fo/T_1} - \frac{1}{T_2} C'_2 e^{-Fo/T_2} \end{cases} \quad (16)$$

где $C'_0 = k \cdot t_c^{max}$; C'_1 ; C'_2 - постоянные интегрирования на первом интервале.

Используя начальные условия, определяем постоянные интегрирования:

$$\begin{cases} W = C'_0 + C'_1 + C'_2 = 0 \\ \frac{dW}{dFo} = -\frac{1}{T_1} C'_1 - \frac{1}{T_2} C'_2 \end{cases}$$

$$C'_1 = \frac{kt_c^{max}T_1}{T_2 - T_1}; \quad C'_2 = -\frac{kt_c^{max}T_2}{T_2 - T_1}$$

откуда

Аналогично решая уравнение (14) на втором интервале управления и далее проводя стыковку решений, получим движение на каждом интервале управления.

Итак, движение на первом интервале управления имеет вид:

$$W(Fo) = kt_c^{max} \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-Fo/T_1} - \frac{kt_c^{max}T_2}{T_2 - T_1} e^{-Fo/T_2} \quad \text{при } 0 \leq Fo \leq Fo_1 \quad (17)$$

Движение на втором интервале:

$$W(Fo) = \frac{W_\kappa T_1 e^{Fo/T_1}}{T_1 - T_2} e^{-Fo/T_1} - \frac{W_\kappa T_2 e^{Fo/T_2}}{T_1 - T_2} e^{-Fo/T_2} \quad \text{при } Fo_1 \leq Fo \leq Fo_2 \quad (18)$$

Численное решение уравнений (17) и (18) приведены на общем графике движения, под которым находится график управляющего воздействия в том же масштабе времени (Рис. 1)

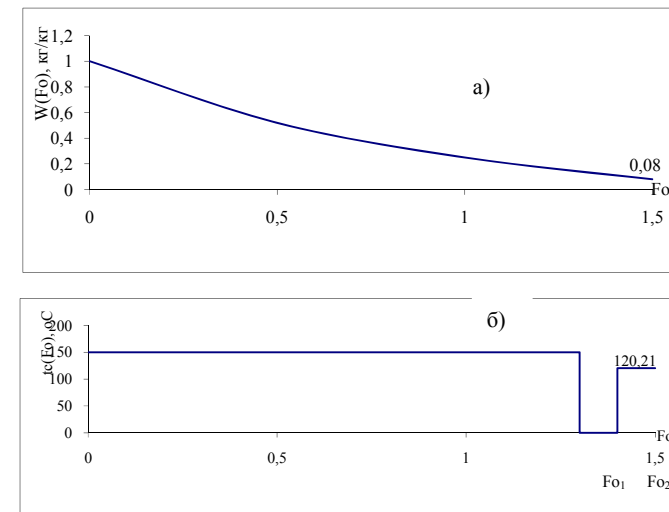


Рис. 1. Оптимальное управление процессом сушки ткани

Проведем сравнение полученных результатов с проведением процесса в нормальном технологическом режиме (рис.2). Уравнение движения объекта исследований в рамках последнего совпадает с первым уравнением системы (1):

$$W(Fo) = C'_0 + C'_1 e^{-Fo/T_1} + C'_2 e^{-Fo/T_2}$$

$$\text{где } C'_0 = k \cdot t_c; \quad C'_1 = \frac{kt_c T_1}{T_2 - T_1}; \quad C'_2 = -\frac{kt_c T_2}{T_2 - T_1}.$$

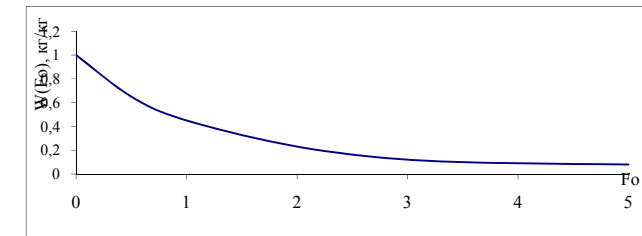


Рис. 2. Кинетика сушки ткани без оптимального управления

Из уравнения и графика рис.2 следует, что объект приближается к заданному значению асимптотически. Поэтому для отыскания времени окончания процесса необходимо задать значение Fo'_k . Пусть критерием окончания служит достижение заданного значения с точностью до 1 %, тогда аналитически или графически можно найти $Fo'_k = 4,1$.

Сравнивая найденное значение со временем второго переключения, которое означает окончание оптимального по быстродействию процесса, можно сделать вывод, что для нашего примера процесс в оптимальных условиях протекает почти в три раза быстрее, чем в нормальном режиме. Следует отметить, что увеличение интервала возможного изменения управляющего воздействия ведет к уменьшению времени протекания процесса.

Таким образом получена математическая модель процесса тепло- массопереноса с сосредоточенными параметрами для тонких материалов, которая может быть использована для расчета процессов теплообмена в полотенных материалах в случае малых изменений параметров. Для учета нелинейности процесса в случае изменения переменных в больших диапазонах, модель может быть использована как элемент кусочно-линейной аппроксимации общего математического описания. С помощью принципа максимума Понтрягина рассчитано оптимальное управление, обеспечивающее минимальное время сушки.

Список литературы

1. Красников В.В. Кондуктивная сушка. - М.: Энергия, 1973. – 288 с.
2. Лыков А.В. Основные переносы тепла и массы вещества во влажном материале // Сборник трудов МТИПП. Вып. 6. – М.: Пищепромиздат, 1956. С. 7-20.
3. Лыков А.В., Перельман Т.Л. О нестационарности теплообмена между телом и обтекающим его потоком жидкости // Тепло- и массообмен тел с окружающей газовой средой. Сборник. – Минск: АИБССР, 1965. С. 3-24.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967, 600 с.
5. Высокин В.Д., Герасимов М.Н., Гусев В.А., Капустин В.П. Влажностные характеристики тканей / Изв.высш.уч.зав. Технология текстильной промышленности // - Иваново: ИГТА. 1974, № 2. - С.115-118.
6. Луцык Р.В., Малкин Э.С., Аббаржи Теплообмен при обработке текстильных материалов. – Киев: Научная мысль, 1993. – 334 с.
7. Отчет по НИР / Поисковые работы по совершенствованию оборудования при термообработке текстильных материалов. – Иваново: НИЭКМИ, 1989. – 118 с.
8. Олейников В.А. Сборник задач и примеров по теории автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1969. – 200 с.
9. Волинский В.Ю., Стороженко Я.С. Математическое моделирование процесса термообработки полотноных материалов в сушильно-ширильной машине // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. –Иваново: ИГХТУ, 2014. т. 57. № 2. -С. 108-111.

СЕКЦИЯ 2. СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ В ХИМИЧЕСКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 542.47:664.144:66.047.355

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ USING THEORY OF HEAT AND MASS TRANSFER IN FOOD TECHNOLOGY

Александр Н. Остриков*, Сергей Т. Антипов**
Alexander N. Ostrikov*, Sergey T. Antipov**

*Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Россия, Воронеж,
(e-mail: oan@vsuet.ru)

*Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Россия, Воронеж,
(e-mail: ast@vsuet.ru)

Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh

Аннотация: Предлагается использование теории теплообмена для математического моделирования таких процессов пищевой технологии, как сушка, перемешивание сливочно-растительных спредов и экспандирование для обеспечения оптимального конструирования соответствующего оборудования и получения готовой продукции требуемого качества. В частности, разработаны математическая модель процесса сушки сферической частицы при комбинированном энергоподводе за счет конвективного теплообвода от воздуха, и внутренних тепловыделений, обусловленных СВЧ электрическим полем, математическая модель процесса перемешивания сливочно-растительных спредов и математическая модель для расчета профиля скоростей и температур расплава в кольцевом канале экспандера.

Abstract: Use of the theory of a heatmass transfer for mathematical modeling of such processes of food technology, as drying, hashing of creamy and vegetable spreads and expansion for ensuring optimum designing of the corresponding equipment and receiving finished goods of the demanded quality is offered. In particular, are developed mathematical model of process of drying of a spherical particle at the combined power supply at the expense of a convective heatsupply from air, and the internal thermal emissions caused by the microwave oven electric field, mathematical model of process of hashing of creamy and vegetable spreads and mathematical model for calculation of a profile of speeds and temperatures of fusion in the ring channel of an expander.

Ключевые слова: теплообмен, сушка, смешивание, экспандирование, математическая модель, технология.

Keywords: heatmass transfer, drying, mixing, expansion, mathematical model, technology

Совершенствование теории теплообмена в пищевых технологиях является задачей, решение которой обеспечит оптимальное конструирование оборудования и получение продукции требуемого качества. В этой связи предлагается использование теории теплообмена для математического моделирования таких процессов пищевой технологии, как сушка, перемешивание сливочно-растительных спредов и экспандирование.

Разработана математическая модель процесса сушки сферической частицы радиуса R_i при комбинированном энергоподводе за счет конвективного теплообвода от воздуха, и внутренних тепловыделений, обусловленных СВЧ электрическим полем. Пола-

гаем, что влагосодержание и температура симметричны относительно центра частицы, градиент давления пара в частице пренебрежительно мал.

Дифференциальные уравнения влагопереноса в частице имеют вид

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = A_{1.1} \nabla^2 U + A_{1.2} \nabla^2 t; \quad (1)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = A_{2.1} \nabla^2 U + A_{2.2} \nabla^2 t + \frac{q_v}{c\rho}. \quad (2)$$

Операторы Лапласа $\nabla^2 U$ и $\nabla^2 t$, входящие в правые части уравнений (1) и (2), имеют вид

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial U}{\partial R}; \quad (3)$$

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial t}{\partial R}. \quad (4)$$

Начальные условия:

$$U(0, R) = U_0, \quad (5)$$

$$t(0, R) = t_0. \quad (6)$$

Граничные условия:

При

$$R = R_l \quad \lambda_m \frac{\partial U}{\partial R} = -\alpha_m (U - U_{\text{воз}}), \quad (7)$$

$$\lambda_q \frac{\partial t}{\partial R} - \alpha_q (t - t_{\text{воз}}), \quad (8)$$

при

$$R = 0 \quad \frac{\partial U}{\partial R} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial t}{\partial R} = 0 \quad (10)$$

После подстановки (3) и (4) в уравнение (1) и (2) получим:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = A_{1.1} \cdot \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial U}{\partial R} \right) + A_{1.2} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial t}{\partial R} \right), \quad (11)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = A_{2.1} \cdot \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial U}{\partial R} \right) + A_{2.2} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial t}{\partial R} \right) + \frac{q_v}{c\rho}. \quad (12)$$

Для получения дискретных аналогов дифференциальных уравнений (11) и (12) воспользуемся дискретной сеткой с постоянными по времени $\Delta \tau$ и радиусу ΔR .

После преобразований получим:

$$U_{\text{ср}} = \frac{3\Delta R}{2R_l^3} \cdot \sum_{i=a}^{i_l-1} [U_{k,i} \cdot R_i^2 + U_{k,i+1} \cdot R_{i+1}^2], \quad (13)$$

$$t_{\text{ср}} = \frac{3\Delta R}{2R_l^3} \cdot \sum_{i=a}^{i_l-1} [t_{k,i} \cdot R_i^2 + t_{k,i+1} \cdot R_{i+1}^2] \quad (14)$$

Была разработана программа, реализующая полученную модель процесса сушки в

среде Mathcad – 15. Для проверки адекватности разработанной математической модели реальному процессу производилось сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными процесса сушки айвы.

На рисунках 1 и 2 представлены экспериментальные и расчетные значения $U_{\text{ср}}$ и $t_{\text{ср}}$. Из приведенных графиков следует, что экспериментальные данные вполне удовлетворительно совпадают с результатами моделирования процесса.

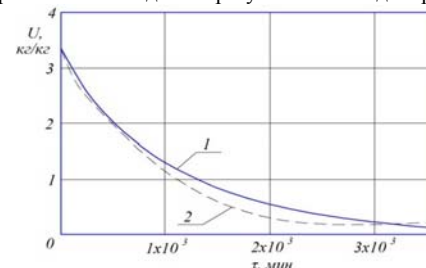


Рисунок 1 – Зависимость среднего влагосодержания айвы от времени: 1 – экспериментальная, 2 – теоретическая

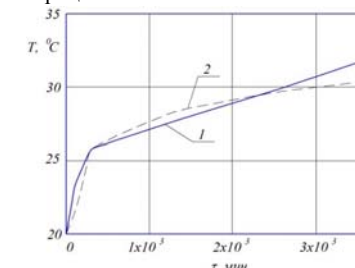


Рисунок 2 – Зависимость средней температуры айвы от времени: 1 – экспериментальная, 2 – теоретическая

Разработана математическая модель для расчета профиля скоростей и температур расплава в кольцевом канале экспандера при таких допущениях: течение расплава в кольцевом зазоре экспандера представляет собой установившийся ламинарный поток; силами инерции и гравитации можно пренебречь; скольжение расплава на стенке отсутствует; течение изотермическое; расплав представляет собой несжимаемую жидкость; изменением теплопроводности в продольном направлении можно пренебречь; конвективная теплопередача в направлении, перпендикулярном направлению течения, происходит только за счет теплопроводности.

Для описания неизотермического течения расплава в кольцевом канале экспандера используем следующие уравнения:

4. уравнение неразрывности, описывающее изменение плотности расплава в зависимости от времени как функция вектора потока массы $\rho \vec{v}$,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \quad (15)$$

5. уравнения движения:

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\vec{v}_x}{dt} &= \frac{\partial \rho}{\partial x} - \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \\ \rho \frac{d\vec{v}_y}{dt} &= \frac{\partial \rho}{\partial y} - \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \\ \rho \frac{d\vec{v}_z}{dt} &= \frac{\partial \rho}{\partial z} - \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (16)$$

• реологическое уравнение течения расплава

$$\tau_{yx} = \left(\frac{1}{\phi} \right)^m \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^m. \quad (17)$$

5. закон сохранения энергии

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) -$$

$$- T \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - \left(\tau_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) -$$

$$- \left[\tau_{xy} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \tau_{xz} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \tau_{yz} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right], \quad (18)$$

6. уравнения термодинамического состояния расплава

$$\frac{\partial q}{\partial y} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \quad (19)$$

Для решения системы уравнений (15-19) были приняты следующие граничные условия по температуре: при прилипании расплава к стенкам канала тепловой поток в слое, прилегающем к стенке, определяется следующей формулой:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{\text{ст}} = \text{Bi} \frac{T_{\text{к}} - T_{\text{ст}}}{\delta} \quad (20)$$

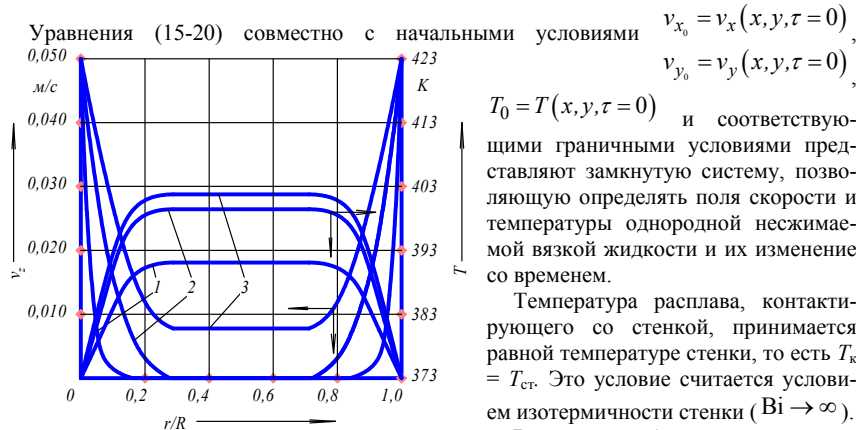


Рисунок 3 – Профили скорости и температуры расплава в кольцевом канале экспандера при постоянной температуре стенки 398 К и различной длине канала, мм: 1 – 170; 2 – 190; 3 – 210

Уравнения (15-20) совместно с начальными условиями $v_{x_0} = v_x(x, y, \tau = 0)$, $v_{y_0} = v_y(x, y, \tau = 0)$, $T_0 = T(x, y, \tau = 0)$ и соответствующими граничными условиями представляют замкнутую систему, позволяющую определять поля скорости и температуры однородной несжимаемой вязкой жидкости и их изменение со временем.

Температура расплава, контактирующего со стенкой, принимается равной температуре стенки, то есть $T_{\text{к}} = T_{\text{ст}}$. Это условие считается условием изотермичности стенки ($\text{Bi} \rightarrow \infty$).

В результате были получены уравнения для определения средней скорости \bar{v}_z расплава в кольцевом канале экспандера:

$$\bar{v}_z = \frac{\Delta p R^2}{8 \eta L} \left(1 + k^2 + \frac{1 - k^2}{\ln k} \right), \quad (21)$$

где $k = R_{\text{max}} / R_{\text{min}}$.

Было также получено решение для расчета профиля температуры расплава в кольцевом канале экспандера

$$T(z) = T_{\text{ст}} + \frac{\varphi}{\lambda} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^{m+1} \frac{(R_{\text{max}} - R_{\text{min}})^{m+3} - y^{m+3}}{2(m^2 + 5m + 6)} \quad (22)$$

Полученное решение для профиля температуры справедливо при условии, что полная энергия, рассеиваемая при течении, отводится за счет теплопереноса в направле-

нии, перпендикулярном направлению течения, т. е. через стенки кольцевого канала экспандера.

На рис. 3 представлены расчетные скорости и температуры расплава в кольцевом канале экспандера при постоянной температуре стенки рабочей камеры $T = 398$ К и различной длине канала, мм: 1 – 170; 2 – 190; 3 – 210.

Полученные зависимости достаточно адекватно описывают профиль скоростей и температур расплава в кольцевом канале экспандера: среднеквадратичное отклонение по абсолютному значению не превышало для температуры 3,5 % и для влагосодержания 11,0 %.

Разработана математическая модель процесса перемешивания сливочно-растительных спредов. Рассмотрим задачу как одномерный перенос частицы трассера в плоском слое перемешиваемой жидкости в следующей постановке:

$$\frac{\partial n(x, \tau)}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 n(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (23)$$

$$n(x, 0) = 0, \quad (24)$$

$$\frac{\partial n(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (25)$$

$$D \frac{\partial n(h, \tau)}{\partial x} = j_0 [1(\tau) - 1(\tau - \tau_0)] \quad (26)$$

По определению

$$j_0 = z / (s \cdot \tau_0) \quad (27)$$

Тогда $z = n_0 V$ и с учетом (26)

$$j_0 = \frac{n_0 V}{s \cdot \tau_0} = \frac{n_0 h}{\tau_0} \quad (28)$$

Принимая во внимание (28), граничное условие (26) примет вид:

$$D \frac{\partial n(h, \tau)}{\partial x} = \frac{n_0 h}{\tau_0} [1(\tau) - 1(\tau - \tau_0)] \quad (29)$$

Приведем систему уравнений (24-26), (29) к безразмерному виду:

$$\frac{\partial N(X, \text{Fo})}{\partial \text{Fo}} = \frac{\partial^2 N(X, \text{Fo})}{\partial X^2}, \quad (30)$$

$$N(X, 0) = 0, \quad (31)$$

$$\frac{\partial N(0, \text{Fo})}{\partial X} = 0, \quad (32)$$

$$\frac{\partial N(1, \text{Fo})}{\partial X} = \frac{1}{\text{Fo}_0} [1(\text{Fo}) - 1(\text{Fo} - \text{Fo}_0)] \quad (33)$$

Окончательное решение задачи принимает вид:

$$N(X, \text{Fo}) = 1 - \frac{2}{\text{Fo}_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n X)}{\mu_n^2 \cos \mu_n} \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}) \cdot [1 - \exp(\mu_n^2 \text{Fo}_0)] \quad (34)$$

Характер изменения объемной безразмерной концентрации частиц трассера $N(X, \text{Fo})$ по высоте перемешиваемого слоя жидкости показан на рисунке 4, из которого видно, что в верхней половине перемешиваемого слоя объемная концентрация частиц проходит через максимум, что связано с перемещением вниз за счет конвективного перемешивания вводимых импульсно частиц трассера.

Для приближенной оценки коэффициента эффективного перемешивания мешалки в зависимости от числа Рейнольдса для исследованного интервала изменения параметров процесса предложены соотношения:

- для процесса перемешивания спредов:

$$D = 3,54 \cdot 10^{-13} \cdot \text{Re}^2 - 1,77 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Re} + 3,66 \cdot 10^{-6},$$

- для процесса кристаллизации спредов:

$$D = 1,84 \cdot 10^{-10} \cdot \text{Re}^2 - 2,06 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Re} + 1,21 \cdot 10^{-6}.$$

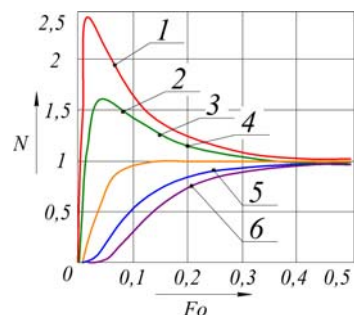


Рисунок 4 – Изменение объемной концентрации частиц трассера по высоте перемешиваемого слоя: 1 – $X = 0,8$; 2 – $X = 0,7$; 3 – $X = 0,5$; 4 – $X = 0,3$; 5 – $X = 0,2$; 6 – $X = 0,1$.

экспандере с кольцевым зазором, позволяющая выявить профиль скоростей и температур расплава.

Получена математическая модель процесса перемешивания сливочно-растительных спредов, позволяющая рассчитать зависимость коэффициента вариации, характеризующего однородность перемешиваемой спредовой композиции, и определить продолжительность перемешивания до получения продукта заданной однородности.

Определим коэффициент вариации в конце процесса перемешивания спреда № 1 при $n = 150 \text{ мин}^{-1}$. Безразмерная длительность процесса составляет $Fo = 0,0935$. Этому значению числа Фурье соответствует $K_{\text{var}} = 3,2\%$, что говорит о достаточно хорошей однородности получаемой спредовой композиции. Используя данный подход, можно оценить однородность продукта в любой момент времени.

Выводы. Разработана математическая модель процесса СВЧ-конвективной сушки фруктов при ступенчатых режимах теплоподвода, позволяющая рассчитать время сушки и подобрать мощность магнетронов.

Разработана математическая модель, описывающая течение расплава биополимера в

УДК 664.72

ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ THE ARGUMENTATION OF LOW-TEMPERATURE DRYING CONDITIONS OF THERMOLABILE MATERIALS

Юрий Ф. Снежкин, Раиса А. Шапарь
Yuriy F. Snezhkin, Raisa A. Shapary

Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины,
Киев, Украина,
(e-mail: r.sh@ukr.net)

Institute of engineering Thermophysics National academy of sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine.

Аннотация: Приведены примеры низкотемпературного обезвоживания растительных термолабильных материалов, обобщены закономерности кинетики влагообмена, рекомендованы сушильные установки для повышения эффективности процесса сушки и максимальной степени сохранности природных составляющих сырья.

Abstract: This paper presents the examples of the low temperature dehydration of plant thermolabile materials. The behavior of moisture exchange kinetics are generalized, the drying units for the increase in drying process efficiency and maximum degree of conservation of the natural components of the raw stuff are recommended.

Ключевые слова: термолабильные материалы, кинетика низкотемпературного обезвоживания, эффективность процесса.

Keywords: thermolabile materials, kinetics of low temperature dehydration, efficiency of the process.

Большая группа термолабильных материалов представлена пряно-ароматическими растениями. Благодаря наличию большого количества природных источников биологически активных веществ, повышающих сопротивляемость организма неблагоприятным воздействиям, пряно-ароматические растения широко используются для приготовления фитопрепаратов в медицинской практике, а также в парфюмерной и пищевой промышленности. Содержащиеся в пряно-ароматических растениях эфирные масла, улучшают органолептические свойства пищевых продуктов и являются альтернативным вариантом использованию ароматизаторов, наполнителей и красителей синтетического происхождения, обеспечивая тем самым натуральность готовых продуктов.

Эфирные масла - сложные многокомпонентные смеси летучих душистых веществ, относящихся к монотерпенам, ароматическим соединениям и их производным. Число компонентов в составе одного эфирного масла может достигать сотни и более. Компоненты эфирных масел находятся в свободном состоянии или в связанной форме, чаще в виде глюкозидов [1]. Используют пряно-ароматические культуры как в свежем, так и в высушенном виде. Эффективность процесса определяется минимальными энергозатратами на сушку и максимальным сохранением природных свойств обезвоживаемого материала. Изменение химического состава и биологических свойств объекта сушки зависят от продолжительности, температурного уровня и интенсивности термической обработки, фактором, их лимитирующим, является предельно допустимая температура обезвоживаемого материала [2].

Доминирующим параметром, повышающим эффективность процесса, является температура сушильного агента: чем она выше, тем интенсивнее проходит процесс удаления влаги. Однако, для пряно-ароматических растений, характерным отличительным признаком которых является высокая термолабильность, обусловленная наличием в их

составе эфирных масел, использование высоких температур сушильного агента с целью увеличения влагообмена недопустимо.

Экспериментально установлено, что обезвоживание материалов, содержащих эфирные масла, необходимо осуществлять в среде с температурой сушильного агента не выше 40...50 °С, поскольку при более высоких значениях температуры происходят потери ценных составляющих. Указанный температурный диапазон способствует расщеплению глюкозидированных форм терпеноидов, повышая тем самым, в последующем, выход эфирных масел. Одновременно в процессе сушки дополнительно образуются эфирные масла за счет первичных предшественников. В качестве примера рассмотрим процесс конвективной сушки чабера садового и мяты перечной. Чабер садовый содержит до 2 % эфирных масел, листья мяты – 2,7...3,0 %. Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 1 в виде кривых кинетики сушки $W^c = f(\tau)$ и кривых скорости сушки $dW^c/d\tau = f(W^c)$, показывает, что исследуемые материалы имеют различную начальную влажность. Процесс обезвоживания мяты перечной проходит в периоде постоянной и убывающей скорости, чабера садового – только в периоде падающей скорости. По окончании процесса цвет и аромат высушенных материалов свойственные исходному сырью. Превышение температуры среды свыше 45 °С приводит к потерям ароматических компонентов и снижению органолептических показателей готового продукта и является неприемлемым.

Повышение эффективности процесса при обезвоживании пряно-ароматических растений в режиме конвективной низкотемпературной сушки достигается снижением влагосодержания теплоносителя. Осушка теплоносителя и эффективное регулирование температуры сушильного агента с одновременной утилизацией теплоты от конденсации пара удаленной влаги, осуществляется конденсационным способом на установках камерного типа с использованием теплового насоса. Ведение процесса на низком температурном уровне осушенным сушильным агентом характеризуется достаточно высокой интенсивностью, которая достигается за счет сохранения высокого массообменного напора между сушильным агентом и обезвоживаемым материалом [3,4].

Еще одним примером низкотемпературного обезвоживания является сушка лепестков чайной розы, в цветках которой содержится 0,02...0,1 % эфирных масел [1,5]. Начальная влажность лепестков роз колеблется в пределах $W = 80...87$ %. Исследования процесса обезвоживания проводили в условиях атмосферного давления на опытной сушильной установке и в условиях разряжения ($p = 0,9$ кг/см²) в вакуумной сушильной камере. Обезвоживание проводилось при температуре 45 °С до остаточной влажности не более 3...5 %. Вакуумное обезвоживание показало ряд преимуществ, которые заключаются в интенсификации процесса и сокращении его длительности на 20 %, а также в органолептических показателях высушенных лепестков. В образцах, высушенных в условиях разряжения, аромат и цвет лепестков более выраженный. Потеря цвета и аромата высушенных лепестков, является следствием воздействия кислорода и влаги на эфирные масла. Отдельные компоненты масел окисляются, что приводит к потере запаха, т.к. происходит

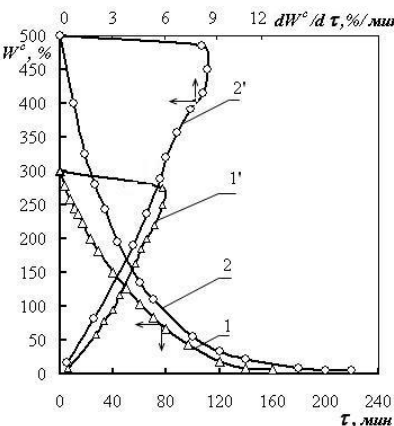


Рис. 1. Кривые кинетики влагообмена
1, 2 – $W^c = f(\tau)$; 1', 2' – $dW^c/d\tau = f(W^c)$
 $V = 1$ м/с; $t = 45$ °С; $d = 10$ г/кг сухого воздуха; $h = 20$ мм;
1, 1' – чабер; 2, 2' – мята перечная

процесс осмоления эфирных масел. Воздействие таких факторов при сушке в условиях разряжения сведено к минимуму. Однако, масштабное использование вакуумной сушки ограничено в виду высокой стоимости сушильного оборудования и высоких энергозатрат.

Таким образом, по результатам обобщения закономерностей влагообмена пряно-ароматического сырья обоснованы режимы конвективного низкотемпературного обезвоживания и установлено, что с целью максимальной степени сохранности ароматических компонентов и эфирных масел, а также повышения эффективности сушки обезвоживание целесообразно осуществлять:

- в режимах стадийного обезвоживания с температурой среды, не превышающей предельно допустимую величину для конкретного объекта сушки;
- конденсационным способом с использованием теплового насоса;
- в режиме конвективно- конденсационного обезвоживания;
- в режиме вакуумного обезвоживания.

Список литературы

1. Почему растения лечат/М.Я. Ловкина, А.М. Рабинович, С.М. Пономарева и др. – М.: Наука –1990. – 256 с.
2. Лыков А.В. Теория сушки. Изд. 2-е перер. и доп. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Снежкін Ю.Ф., Чалаев Д.М., Шаврин В.С., Шапар Р.О, Хавін О.О., Дабіжа Н.О. Використання теплових насосів у процесах сушіння./Промышленная теплотехника. – 2006. – Т.28, №2. – С. 106-110.
4. Снежкін Ю.Ф. Енергоефективність в процесах сушки/XIV Минский международный форум по тепло-и массообмену, 10-13 сентября 2012 г. : тезисы докладов и сообщений. – Минск: 2012, т.1, часть 2. – С. 604-607.
5. Смирнов Е.В. Натуральные вкусоароматические вещества из растительных материалов в производстве ароматизаторов. Пищевые ингредиенты: сырье и добавки. – 2004. – 31. – С. 37-43.

УДК 631.563.2: 633.63:447.458.2:54-162

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ НА СТЕПЕНЬ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ ПОРОШКОВ ИЗ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ EFFECT OF TEMPERATURE OF CONVECTIVE DRYING ON THE DEGREE OF CRYSTALLINITY OF THE SUGAR BEET POWDERS

Вячеслав А. Михайлик, Юрий Ф. Снежкин, Татьяна В. Коринчевская
Viacheslav A. Mykhailik, Yuri F. Snezhkin, Tatiana V. Korinchevska

Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина
(e-mail: mhlk45@gmail.com)

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

Аннотация: Методом дифференциального термического анализа порошков из сахарной свеклы установлено, что температура сушки посредством воздействия на скорость сушки и кристаллизации сахарозы влияет на степень кристалличности полученного продукта. С повышением температуры с 60 до 100 °С, при неизменной скорости сушильного агента (1,5 м / с), степень кристалличности снижается с 34,0 до 20,4 %.

Abstract: The investigations of properties of sugar beet powders were done by differential thermal analysis. It was established that the drying temperature by acting on the drying rate and on the crystallization of sucrose has a significant impact on the degree of crystallinity of the obtained sugar beet powders. It was also shown that with temperature increasing from 60 to 100 °C at a constant rate of drying agent (1.5 m/s), the degree of crystallinity of powders decreases from 34.0 to 20.4 %.

Ключевые слова: сушка; сахарная свекла; сахароза; кристаллизация; плавление; степень кристалличности.

Key words: drying; sugar beet; sucrose; crystallization; melting; the degree of crystallinity.

При анализе процессов сушки фруктов и овощей главное внимание уделяют фазовым переходам воды и механизмам ее переноса, сохранению пищевых свойств и энергетической эффективности. К сожалению, фазовые превращения сахаров (глюкозы, фруктозы и сахарозы), основных растворимых компонентов сока, остаются практически незамеченными. Фазовый состав высушенных продуктов, дисперсность гидрофильных компонентов и влажность определяют гигроскопичность, условия диспергирования, сепарации и хранения. Наличие аморфных компонентов и связанной воды в ягодах [1], фруктах [2, 3] и овощах с низкой влажностью предполагает проявление процессов «стеклования/расстеклования». При преодолении температуры стеклоперехода изменяется физическое состояние материала. Исследователи продолжают обсуждать использование факта стеклования в прогнозировании микробиологических, физических и химических изменений в продукте, происходящие в процессе обработки и хранения. Продукт может быть стабильным при хранении ниже температуры стеклоперехода в связи со значительным снижением активности воды [2].

В связи с этим изучение влияния температуры сушки растительного сырья с высоким содержанием растворимых углеводов на степень кристалличности продукта сушки имеет не только научный, но практический интерес.

В исследовании была использована сахарная свекла с содержанием сухих веществ 21,59 %, сахарозы 15,08 %, сока ~ 92 % масс. Сушку осуществляли на экспериментальном конвективном стенде при температуре сушильного агента (воздуха) 60, 80 и 100 °С и скорости 1,5 м / с. Свеклу нарезают полосками длиной 40 – 50 мм и поперечным сечением 3х3 мм. Полоски располагали на ситовую подложку держателя электронных весов одним слоем вдоль направления движения воздуха на расстоянии 3 мм друг от друга.

Содержание кристаллической сахарозы в порошках, полученных из высушенного продукта, определяли по теплоте плавления сахарозы, которую измеряли в дериватографе «Q-1000» системы Paulik-Paulik-Erdey (фирма «МОМ», Венгрия) при скорости нагревания 3,6 К / мин. Образцы порошков размещали в открытый конический платиновый тигель.

Процесс сушки тканей корня сахарной свеклы представлен на рис. 1.

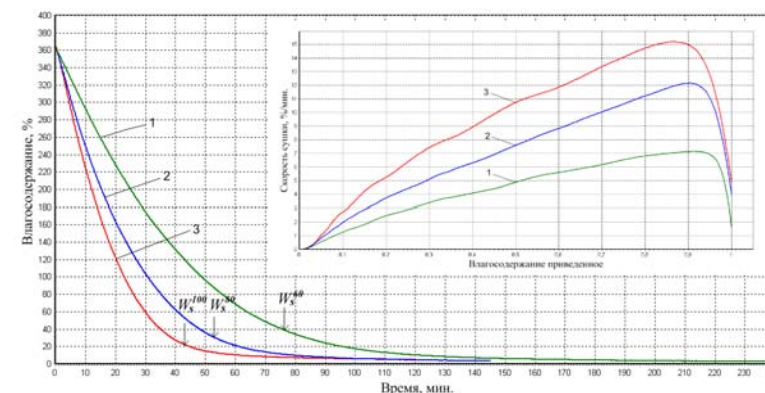


Рис. 1. Кинетика и скорость сушки сахарной свеклы при температуре 60 (1), 80 (2) и 100 °С (3).

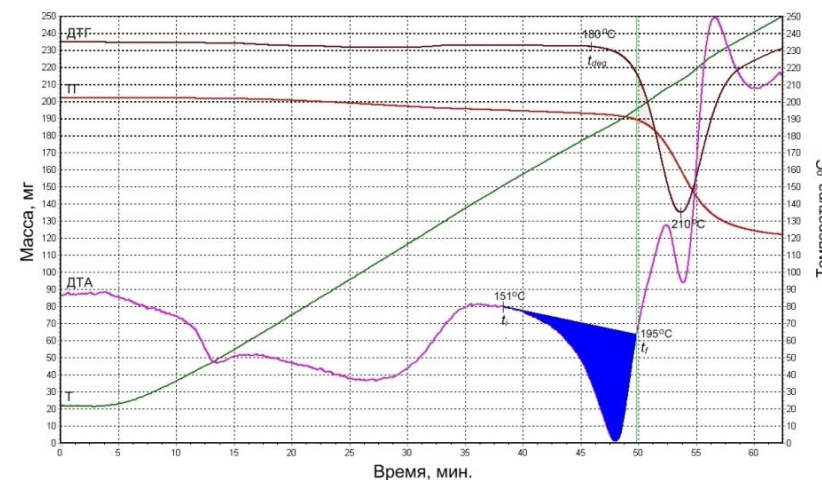


Рис. 2. Дериватограмма порошка корня сахарной свеклы после сушки при 60 °С. Масса образца 202,0 мг.

Высушенные свекловичные ткани в щадящем режиме были измельчены в агатовой ступке до порошкообразного состояния и подвергнуты термическому анализу. На представленной дериватограмме (рис. 2) видно, что плавление сахарозы происходит в интервале 151 – 195 °С (кривая ДТА).

Максимум пика плавления сахарозы находится в диапазоне температур, совпадающем с наблюдавшимся в работе [4]. Площадь (затемненная) F_{sug} , ограниченная пиком плавления и линией, соединяющей точки начала плавления t_i и его завершения t_f пропорциональна интегральной теплоте плавления сахарозы Q_{sug} . Температуру t_f определяли в точке излома восходящей части кривой ДТА пика плавления, которая разделяет процессы плавления и термической деструкции порошка. Сравнивая t_f с температурой начала термического разложения t_{deg} порошка (рис. 2, кривая ДТГ) видим, что термическая деградация порошка начинается еще до окончания плавления сахарозы. Наложение этих двух процессов приводит к незначительному уменьшению величины Q_{sug} .

Интегральную теплоту плавления сахарозы определяли из соотношения:

$$Q_{sug} = (m_{ref} \Delta H_{ref} F_{sug}) / F_{ref},$$

где: m_{ref} , $\Delta H_{ref} = 198,9$ Дж г⁻¹ и F_{ref} – масса, удельная теплота и площадь пика плавления эталонного вещества (стеариновой кислоты).

Массу кристаллической сахарозы в порошках рассчитывали, принимая удельную теплоту плавления сахарозы $\Delta H_{sug} = 111,4$ Дж г⁻¹ [4]:

$$m_{sug} = Q_{sug} / \Delta H_{sug}$$

Результаты определения Q_{sug} и m_{sug} сведены в таблицу.

Безусловно, дериватография не может конкурировать с калориметрией и достичь высокой точности в определении теплоты эндо- или экзотермических реакций сложно, однако, при соблюдении неизменных условий проведения опытов можно получить оценочные результаты на достаточно хорошем уровне. Так разница в значениях коэффициента пересчета площадей пика плавления сахарозы в теплоту $q = (m_{ref} \Delta H_{ref}) / F_{ref}$, полученными по данным градуировки стеариновой кислотой ($q = 0,02546$ Дж мВ⁻¹ с⁻¹) и глюкозой ($q = 0,02647$ Дж мВ⁻¹ с⁻¹) не превышала 3,81 %. Погрешность в определении q при градуировке стеариновой кислотой составила 0,51 %.

Сравнивая доли кристаллической сахарозы в массе сухих веществ порошков (степень кристалличности), видим, что их содержание зависит от температуры сушки (таблица). При температуре сушильного агента 60 °С кристаллическую фазу образует только 48,7 % сахарозы находящейся в соке. С повышением температура сушки степень кристалличности уменьшается.

Таблица. Результаты измерений, расчетов и степень кристалличности порошков.

Показатель	Температура сушки, °С		
	60	80	100
Масса образца, мг	202,0	201,8	204,0
Масса сухих веществ, $m_{d.s}$, мг	194,5	195,9	196,7
Влажность, % масс.	3,72	2,92	3,58
Интегральная теплота плавления, Q_{sug} , Дж	7,37	4,89	4,45
Масса кристаллов сахарозы, m_{sug} , мг	66,17	43,91	39,95
Степень кристалличности, $N = m_{sug} / m_{d.s}$, %	34,0	22,4	20,3

Кристаллизация сахарозы в свекловичных тканях при их обезвоживании возможна после достижения концентрации сахарозы в соке равной концентрации насыщения при данной температуре. С рис. 1 видно, что с увеличением температуры с 60 до 100 °С скорость сушки возрастает более чем в два раза и такое соотношение сохраняется вплоть до достижения влагосодержания $W = 10$ %. Используя зависимости растворимости сахарозы от температуры [5] и гидратации тканей сахарной свеклы от влажности [6], были рассчитаны значения влагосодержания тканей, при котором концентрация сахарозы в соке достигает насыщения при 60, 80 и 100 °С: $W_s^{60} = 38,60$ %, $W_s^{80} =$

30,65 % и $W_s^{100} = 22,78$ %. Полученные величины дают возможность по кинетическим кривым сушки определить время τ , при превышении которого раствор становится пересыщенным относительно сахарозы. В данных условиях τ зависит только от температуры сушки: $\tau^{60} = 76,4$ мин.; $\tau^{80} = 52,8$ мин.; $\tau^{100} = 42,6$ мин. Видно, что с увеличением температуры сушки с 60 до 100 °С время достижения насыщения сока сахарозой сокращается на 44,2 %.

Известно, что начало гомогенной кристаллизации невозможно предусмотреть, спонтанная кристаллизация сахарозы в отсутствии центров кристаллизации может начинаться при очень высоком пересыщении раствора [7]. Кристаллизация сахарозы в тканях свеклы с чистотой сока 88 – 89 % скорее всего будет происходить при видимом коэффициенте пересыщения $K > 1,35$ [7]. Учитывая температурную зависимость растворимости сахарозы, предел метастабильной зоны будет преодолен при $W \leq 28,54$, 22,62 и 16,76 %, что соответствует 60, 80 и 100 °С.

Кристаллизация сахарозы начинается на внешней поверхности тканей в разорванных клетках, из которых удаление воды проходит в первую очередь и с высокой скоростью (рис. 1). В пересыщенный раствор этих клеток центры кристаллизации могут быть внесены с воздуха [7]. В неповрежденных клетках элементарные объемы сока остаются изолированными друг от друга пока протоплазма клеток не будет денатурирована в результате обезвоживания и воздействия температуры (60 – 70 °С [8]). По мере обезвоживания материала кристаллизация с периферийной части перемещается вглубь тканей.

При непрерывном и интенсивном обезвоживании межкристалльного раствора концентрация стремительно нарастает, увеличивается вязкость, усложняется процесс диффузии сахарозы к растущим кристаллам, чистота межкристалльного раствора ухудшается, в результате чего скорость кристаллизации падает. Наступает период, когда скорость обезвоживания значительно превышает скорость кристаллизации, сахароза не успевает выкристаллизоваться и образует аморфную массу. Такую сахарозу можно рассматривать как переохлажденной жидкости в стекловидном состоянии.

Выводы.

Методом дифференциального термического анализа порошков из сахарной свеклы установлено, что:

- температура сушки посредством воздействия на скорость сушки и кристаллизации влияет на степень кристалличности полученного продукта;
- с повышением температуры сушки с 60 до 100 °С, при скорости сушильного агента 1,5 м / с, степень кристалличности снижается с 34,0 до 20,4 %.

Исходя из уровня кристалличности, можно утверждать, что исследованные порошки представляют собой аморфно-кристаллические продукты – смеси биополимеров и сахарозы в аморфном состоянии с кристаллической сахарозой.

Количество аморфной фазы с ростом температуры и скорости сушки возрастает. Рост содержания сахаров в аморфном состоянии повышает гигроскопичность порошков и увеличивает вероятность проявления фазовых переходов второго рода.

Кристаллизация сахарозы происходит на завершающем этапе сушки в растворах с высоким коэффициентом пересыщения и сопровождается выделением теплоты, интегральная величина которой зависит от массы выкристаллизовавшейся сахарозы и температуры кристаллизации.

Проведенные исследования показали, что фазовые превращения углеводов в сырье с большим содержанием моно- и дисахаридов необходимо учитывать в теоретических расчетах и тепловых балансах процесса сушки.

Список литературы

1. Wang H., Zhang S., Chen, G. Glass transition and state diagram for fresh and freeze-dried Chinese gooseberry // Journal of Food Engineering. – 2008. – Vol. 84. – P. 307-312.

2. Mrad N.D., Bonazzi C., Boudhrioua N., Kechaou N., Courtois F. Moisture Sorption Isotherms, Thermodynamic Properties, and Glass Transition of Pears and Apples // *Drying Technology*. – 2012. – Vol. 30. – P. 1397-1406.

3. Mikhailik V.A., Dmitrenko N.V., Snezhkin Yu.F. Change in the Specific Heat Capacity of Parenchymal Tissues of Apples due to Dehydration // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2014. – Vol. 87, № 1. – P. 48-53.

4. Hurtta M., Pitkanen I., Knuutinen J. Melting behaviour of D-sucrose, D-glucose and D-fructose // *Carbohydrate Research*. – 2004. – № 339. – P. 2267-2273.

5. Принципы технологии сахара. Пер. с англ. / Под ред. П. Хонига. – М.: Пищепромиздат, 1961. – 616 с.

6. Михайлик В.А., Давыдова Е.О. Исследование состояния воды в сахаросодержащем растительном сырье при его обезвоживании // *Промышленная теплотехника*. – 2000. – Т. 22, № 5-6. – С. 50-54.

7. Герасименко А.А. Кристаллизация сахара. – Киев: Наукова думка, 1965. – 316 с.

8. Силин П.М. Технология сахара. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пищевая промышленность, 1967. – 624 с.

УДК 621.928.9

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕОЧИСТКИ В СУШИЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ АППАРАТОВ **INCREASING OF EFFICIENCY AN CAUGHT DUST IN DRY PROCESSES** **ON BASE OF MULTIFUNCTION DEVICES**

Александр В.Акулич, Виктор М. Лустенков, Вера М. Акулич
Alexander Akulich, Viktor Lustenkov, Vera Akulich

Могилевский государственный университет продовольствия, Беларусь, Могилев,
(e-mail: mgup@mogilev.by).

Mogilev State Foodstuffs University, Belorussia, Mogilev

Аннотация: Разработан новый класс комбинированных аппаратов на основе вихревых потоков и фильтрования через фильтровальную ткань и слой зернистого материала. Изготовлены опытные образцы. Проведены экспериментальные исследования гидродинамики комбинированных пылеуловителей. Исследовано гидравлическое сопротивление и эффективность улавливания комбинированного пылеуловителя с цельным фильтровальным рукавом. Разработанные аппараты внедрены в производство.

Abstract: Designed new class of multifunction devices on the base of vortical flows and filtering through filter fabrics and layer granular material. Made pilot models. Conducted experimental studies of hydrodynamics a combined dust extractor. Explored hydraulic resistance and efficiency combined dust extractor with the unadulterated filter sleeve. Developing devices are introduced in production.

Ключевые слова: Сушка, пылеочистка, комбинированный аппарат, ступень, вихревые потоки, фильтрование

Keywords: Drying, caught dust, multifunction device, stage, vortical flows, filtering.

На предприятиях пищевой промышленности при конвективной сушке различных материалов в распылительных, барабанных и других типах сушилок существует проблема очистки газов от твердых мелкодисперсных частиц. В большинстве случаев для высокоэффективного улавливания применяются двухступенчатые системы пылеочистки, а именно, на первой ступени центробежные пылеуловители (циклоны, вихревые пылеуловители), а на второй – рукавные фильтры или мокрые пылеуловители (скрубберы,

ры, циклоны с водяной пленкой и др.). Данные системы требуют больших производственных площадей, являются металлоемкими и отличаются высоким общим гидравлическим сопротивлением. В связи с этим необходимо создание высокоэффективных комбинированных пылеуловителей [1–2].

Для решения задачи эффективной очистки пылегазовых потоков авторами проведены исследования, по результатам которых определено, что использование одного способа очистки не обеспечивает достижения требуемых показателей или по эффективности улавливания, или по энергозатратам. Установлено, что применение оборудования комбинированного типа, обеспечивает снижение габаритов, энерго- и материалоемкости пылеулавливающих систем при высокой степени очистки газов от мелкодисперсной фракции. Это достигается совмещением нескольких способов улавливания в едином энергетическом поле аппарата [1–2]. Причем конструктивные решения, создаваемых комбинированных пылеуловителей должны быть направлены на решение определенных технологических задач.

В работе разработан новый класс комбинированных аппаратов на основе вихревых потоков и фильтрования. Их отличительной особенностью является совмещение центробежной очистки в системе взаимодействующих вихревых потоков с доочисткой фильтрованием при прохождении газа через пористую фильтровальную перегородку в едином энергетическом поле аппарата.

Предложен способ очистки газа от твердых частиц [3] и комбинированный пылеуловитель [4] для его реализации (рисунок 1), в котором предварительную очистку осуществляют в центробежном поле при взаимодействии в камере центробежного улавливания 1 периферийного и центрального потоков газовозвеси, закрученных в одну сторону и направленных навстречу друг другу. Предварительно очищенный газ отводится в режиме восходящего центрального потока, который разделяется на ряд не связанных друг с другом кольцевых закрученных потоков и направляется на доочистку в фильтровальные элементы 2, выполненные в виде рукавов из фильтровального материала, установленных концентрично вокруг камеры центробежного улавливания 1 в корпусе комбинированного пылеуловителя 3. Данный способ предполагает улавливание частиц пыли из газового потока в условиях максимального использования энергии центробежного поля, в том числе и при доочистке в рукавах. Уловленные частицы материала попадают в бункеры мелкодисперсной 4 и крупной 5 фракций.

Изготовлен экспериментальный образец комбинированного пылеуловителя КП–150–1,36, в котором реализован данный способ [3–4]. Диаметр корпуса аппарата 0,45 м, а высота – 1,4 м. Вокруг камеры центробежного улавливания диаметром 0,15 м и высотой 0,6 м установлено 12 рукавов общей площадью фильтрования 1,36 м² [5]. Так же создана лабораторная установка для исследования гидродинамики разработанного аппарата.

Найдено, что при общем расходе газа $Q_{\text{общ}}=0,138 \text{ м}^3/\text{с}$ в интервале кратности расходов $k=0,4\div 0,65$ гидравлическое сопротивление $\Delta P=2800 \text{ Па}$, а эффективность улавливания мелкодисперсных продуктов, таких как фосфаты, достигает 99,5%. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами [6].

Установлено, что разработанный комбинированный пылеуловитель (рисунок 1) является аппаратом с управляемой гидродинамикой.

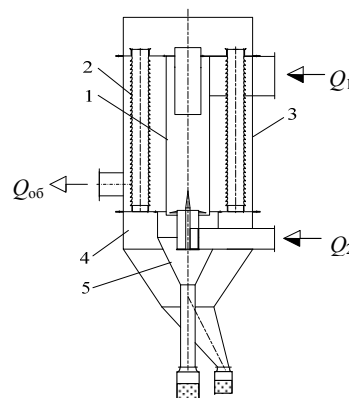
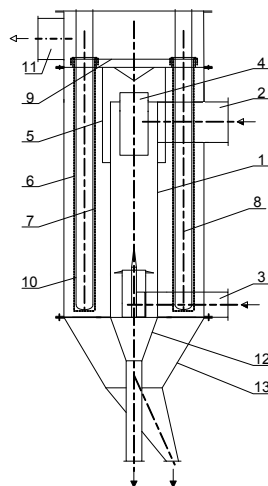


Рисунок 1 – Схема комбинированного пылеуловителя

На основе теоретических и экспериментальных исследований гидродинамики комбинированного пылеуловителя КП–150–1,36 разработаны и внедрены в производство комбинированные пылеуловители КП–350–10 (диаметр камеры центробежного улавливания $D_k=0,35$ м и площадь фильтрования $S_{\phi}=10$ м², аппарат рассчитан на общий расход газа $Q_{\text{общ}}=2100$ м³/ч) и КП–400–10 ($D_k=0,4$ м, $S_{\phi}=10$ м², $Q_{\text{общ}}=3000$ м³/ч) для улавливания сахарной пудры в системах аспирации линий №1 и №2 производства зефира на ОАО «Красный Мозырянин» (г. Наровля, Республика Беларусь) [7–8].

С целью дальнейшего совершенствования способа очистки газа от твердых частиц и конструкций комбинированных аппаратов за счет снижения потерь энергии, разработаны различные исполнения ступени фильтрования, как через фильтровальную ткань рукавов, так и через слой зернистого материала.

В [9] представлен комбинированный аппарат, в котором ступень доочистки фильтрованием выполнена в виде слоя зернистого материала. Целесообразность использования зернистых материалов в качестве фильтровального слоя обусловлена широким диапазоном физико-механических свойств зернистых материалов, удовлетворяющих требованиям различных технологических процессов. Однако сложность регенерации слоя зернистого материала является недостатком данных аппаратов.



- 1 – сепарационная камера вихревого пылеулавливания;
2, 3 – патрубки периферийного и центрального потока газозвеси; 4 – выхлопная труба; 5 – корпус перераспределения газа; 6, 7 – боковые поверхности внешнего и внутреннего концентрических кольцевых потоков; 8 – кольцевой канал;
9 – рукавная решетка; 10 – поддерживающие каркасы;
11 – патрубок отвода из аппарата доочищенного газа;
12, 13 – бункеры крупной и мелкодисперсной пыли

Рисунок 2 – Схема новой конструкции комбинированного пылеуловителя с цельным фильтровальным элементом

оснащена, по меньшей мере, одним, концентричным первому, кольцевым каналом большего диаметра, что обеспечивает значительное увеличение поверхности фильтровальных элементов при снижении скорости фильтрования.

В [10] представлен комбинированный пылеуловитель, в котором ступень фильтрования выполнена в виде цельного гофрированного рукава, расположенного вокруг камеры центробежного улавливания с увеличенной высотой. Такое техническое решение обеспечивает снижение гидравлического сопротивления, так как запыленный газ поступает на доочистку одним вращающимся потоком, не подвергаясь дополнительной деформации.

Значительное снижение гидравлического сопротивления комбинированного пылеуловителя возможно при увеличении площади фильтровальной поверхности. Такой технический результат достигается при выполнении фильтровального элемента в виде внешней и внутренней боковых поверхностей [11]. При этом процесс фильтрования осуществляется сплошным потоком при нисходящем вращательном движении по всей боковой поверхности фильтровального элемента с внешней и внутренней стороны. В [12] ступень фильтрования осна-

В комбинированном пылеуловителе [13] использован принцип внешней фильтрации, что способствует поступлению предварительно очищенного газа на ступень фильтрования с сохранением центробежного вращения потока в кольцевом канале между цилиндрической сепарационной камерой и корпусом аппарата по всей высоте внешней поверхности фильтровальных рукавов, расположенных по окружности, концентричной камере центробежного улавливания.

Разработан новый способ очистки газов от твердых частиц [14] и конструкция комбинированного пылеуловителя на основе вихревых потоков и внешнего фильтрования (рисунок 2), отличительной особенностью которого является выполнение ступени фильтрования в виде цельного фильтровального элемента с наружной и внутренней поверхностями, расположенными по концентрическим окружностям вокруг цилиндрической камеры центробежного улавливания. При работе комбинированного пылеуловителя газ, очищенный в центробежном поле первой ступени, совершая вращательно поступательное нисходящее движение, перераспределяется на ступень фильтрования, где доочищается в режиме внешней фильтрации двумя восходящими потоками по всей высоте наружной и внутренней боковых поверхностей цельного фильтровального элемента.

Изготовлена модель комбинированного пылеуловителя (рисунок 2) с диаметром камеры центробежного улавливания 0,13 м, высотой 0,88 м, при максимальной высоте фильтровального элемента 1 м и площадью фильтрования 2,72 м². Габаритные размеры составляют по высоте 1,66 м и диаметру 0,6 м [15].

Для исследования гидродинамики разработанного комбинированного пылеуловителя создана лабораторная установка. При экспериментах общий объемный расход газа через аппарат изменялся в интервале $Q=0,041 \div 0,083$ м³/с, кратность расходов $k=0,1 \div 0,9$. Установлено, что при $Q=0,083$ м³/с, плановой скорости в камере центробежного улавливания 6,28 м/с, скорости фильтрования 1,84 м/мин и $k=0,6$ общее гидравлическое сопротивление комбинированного пылеуловителя (КП) составляет 1640 Па (рисунок 3), ступени центробежного улавливания (I) – 1180 Па, а ступени фильтрования (II) – 520 Па.

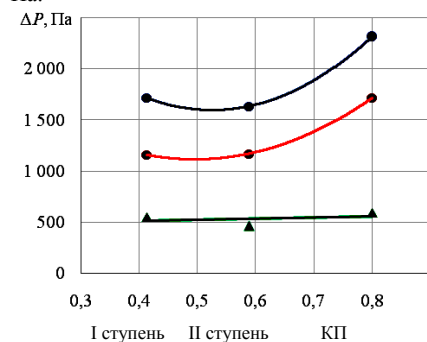


Рисунок 3 – Зависимость гидравлического сопротивления комбинированного пылеуловителя с цельным фильтровальным элементом от кратности расходов при $Q=0,083$ м³/с и $h/H=1$

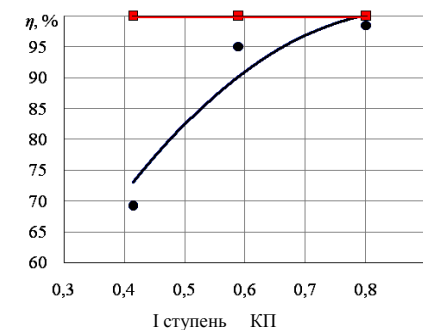


Рисунок 4 – Зависимость эффективности улавливания комбинированного пылеуловителя с цельным фильтровальным элементом от кратности расходов при $Q=0,083$ м³/с и $h/H=1$

Исследована эффективность улавливания разработанного комбинированного аппарата. Определено, что для первой ступени характерен рост эффективности улавливания соляной пыли до значения $\eta_1=99,5\%$ с увеличением кратности расходов (рисунок 3). Установлено, что эффективность улавливания комбинированного пылеуловителя с цельным фильтровальным элементом достигает $\eta_0=99,99\%$ (рисунок 3).

Разработанный способ очистки газов от твердых частиц в комбинированном пылеуловителе на основе вихревых потоков и фильтрации через цельный фильтровальный элемент обеспечивает высокоэффективную очистку газовых потоков при снижении гидравлического сопротивления за счет высокой степени очистки в центробежном поле в системе вихревых потоков. Это позволяет снизить пылевую нагрузку на фильтровальный элемент, который в свою очередь характеризуется увеличенной площадью фильтрации, обусловленной конструктивными особенностями данной ступени.

Список литературы

1 Акулич А.В., Лустенков В.М., Акулич В.М., Шушкевич К.В. Разработка новых типов пылеуловителей для очистки газов от пыли в текстильной и химической промышленности. Международная научно-техническая конференция «Современные технологии и оборудование текстильной промышленности» (Текстиль 2011), М.: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. А.Н. Косыгина», 29-30 ноября 2011 г. / Моск. гос. текстильный ун-т им. А.Н. Косыгина. – Москва, 2011. – С. 226.

2 Акулич А.В. Разработка комбинированных вихревых аппаратов для проведения гидромеханических и тепломассообменных процессов / Акулич А.В., Лустенков В.М., Кондриков Н.В., Нестерук М.А. // Хранительна наука, техника и технологии 2007: научни трудове, Пловдив, 19-20 октомври 2007 г. / Университет по хранителни технологии. – Пловдив, 2007. – Т. 54. № 3. – С. 174–179.

3 Способ очистки газа от твердых частиц: пат. 6280 Респ. Беларусь, МПК7 В 04 С 3/04, В 01 D 45/12 / А.В. Акулич; заявитель Могил. технол. ин-т. – № а 20001037; заявл. 22.11.00; опубл. 30.06.04. – № 2. – С. 140.

4 Комбинированный пылеуловитель: пат. 8290 Респ. Беларусь, МПК7 В01D 46/02, В04С 3/06 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия. – № а 20030016; заявл. 08.01.2003; опубл. 30.08.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – №4. – С. 52–53.

5 Лустенков В. М., Акулич А. В., Темрук А. В. Разработка комбинированного пылеуловителя // Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. «Техника и технология пищевых производств». Могилев, 2003. С. 309–310.

6 Лустенков В. М., Акулич А. В. Исследование гидравлического сопротивления комбинированного пылеуловителя // Материалы междунар. науч.-практич. конф. «Инновационные процессы в пищевой промышленности». Минск, 2003. С. 65–66.

7 Акулич А.В., Лустенков В.М., Шушкевич К.В., Кондриков Н.В. Исследование гидродинамики и внедрение новых типов пылеуловителей на основе вихревых потоков // Вестник МГУП. – 2006. – № 1. – С. 75–82.

8 Акулич А.В., Лустенков В.М., Кондриков Н.В. Разработка и внедрение комбинированных пылеуловителей для тонкой очистки воздуха на предприятиях пищевой промышленности. Научни трудове научной конференции с международным участием «Хранительна наука, техника и технологии - 2008» 24-25 октомври, Университет по хранителни технологии – Пловдив, 2008, том LV, Св. 2, 2008. – с.225-233.

9 Способ очистки газа от твердых частиц: пат. 16599 Респ. Беларусь, МПК2006 В04С 3/00, В01D 45/12, В01D 46/30 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, А.А. Акулич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия. – № а20101052; заявл. 09.07.2010; опубл. 30.12.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – №6.

10 Комбинированный пылеуловитель: пат. 8539 Респ. Беларусь, МПК7 В04С 3/00, В01D 50/00 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия. – № а 20031138; заявл. 30.06.2004; опубл. 30.10.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – №5. – С. 83.

11 Способ очистки газа от твердых частиц: пат. 11606 Респ. Беларусь, МПК (2006) В04С 3/00, В01D 45/12 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, В.М. Акулич, заявитель и Мо-

гил. гос. ун-в. продовольствия. – №а20060662, заявл. 04.07.2006; опубл. 28.02.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – №1. – С. 62.

12 Способ очистки газа от твердых частиц: пат. 17046 Респ. Беларусь, МПК2006 В04С 3/06, В01D 45/12 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, В.М. Акулич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия. – № а20101291; заявл. 02.09.2010; Опубл. 30.04.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – №2.

13 Комбинированный пылеуловитель: пат. 15123 Респ. Беларусь, МПК2006 В01D 46/02, В04С 3/06 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, В.М. Акулич; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия. – № а 20081401; заявл. 06.11.2008; опубл. 30.12.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – №6. – С. 80.

14 Акулич А.В., Лустенков В.М., Акулич А.А. Способ очистки газа от твердых частиц. Евразийская заявка на изобретение №2015/EA/0052 от 01.04.2015г., регистрационный номер 201500461.

15 Акулич А.В., Лустенков В.М., Акулич А.А., Парамеев М.А. Разработка комбинированного пылеуловителя на основе вихревых потоков и внешнего фильтрации. Материалы X международной научно-технической конференции «Техника и технология пищевых производств», Могилев, 23–24 апреля 2015 г. / Учреждение образования «Могил. гос. ун-т продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. Ред.) [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 211.

УДК66.047-912

КИНЕТИКА СУШКИ СУПЕР-СЛАДКОЙ КУКУРУЗЫ В НЕПОДВИЖНОМ ПРОДУВАЕМОМ И ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЯХ KINETICS OF A SUPER-SWEET CORN DRYING IN STATIONARY AND FLUIDIZED BEDS

Е.А.Муравлева*, О.Алвес-Фильо, С.П.Рудобашта***
Е. А. Muravleva*, O. Alves-Filho**, S.P. Rudobashta*****

** Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия, Москва,
(e.mail katya.muravleva@gmail.com).*

*Russian State Agrarian University – MTAA named after K.A.Timiryazev, Russia, Moscow
**Норвежский университет естественных и технических наук, Норвегия, Трондхейм,
(e.mail odilio.alves@ntnu.no).*

*Norwegian University of Science and Technology, Norway, Trondheim
***Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия, Москва,
(e.mail rudobashta@mail.ru).*

Russian State Agrarian University – MTAA named after K.A.Timiryazev, Russia, Moscow

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования процесса конвективной сушки супер-сладкой кукурузы в теплонасосной сушильной установке (ТНСУ) – в плотном продуваемом и псевдоожигенном слоях. Исследовано влияние скорости и температуры сушильного агента на кинетику сушки.

Abstract: The results of convective drying of super-sweet corn by using the heat pump dryer in stable and fluidized beds are presented here. The effect of velocity and temperature of the drying agent to the drying kinetics was investigated.

Ключевые слова: супер-сладкая кукуруза, неподвижный продуваемый слой, псевдоожигенный слой, кинетика сушки.

Keywords: Super-sweet corn, stable bed, fluidized bed, kinetic of drying.

Кинетика сушки устанавливает связь между изменением влажности материала во времени и параметрами процесса, свойствами и структурой материала, его размерами и рядом других факторов. Было проведено 5 экспериментальных исследований по сушке супер-сладкой кукурузы на ТНСУ [1]. Опыты заключались в снятии кривых сушки. В ходе экспериментов проводили замеры массы зерна с интервалом 20 минут. Конвективную сушку супер-сладкой кукурузы проводили в неподвижном продуваемом и псевдооживленном слоях при различных значениях температуры $t_{\text{суш}}, ^\circ\text{C}$ и скорости v , м/с сушильного агента (таблица 1).

По полученным данным строили кривые сушки, а именно зависимость влагосодержания от времени сушки τ при различных температурных и скоростных режимах сушильного агента (рис. 1...3) [2].

Таблица 1. Параметры сушки

№ теста	$t_{\text{суш}}, ^\circ\text{C}$	v , м/с	№ теста	$t_{\text{суш}}, ^\circ\text{C}$	v , м/с
1	15	FB, 4.82 м/с	4	25	FB, 4.82 м/с
2	40	FB, 4.82 м/с	5	25	ST, 1.1 м/с
3	40	ST, 2.41 м/с			

FB сушка в псевдооживленном слое

ST сушка в неподвижном слое

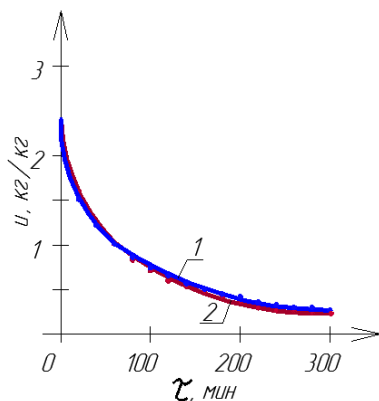


Рис.1. Зависимость влагосодержания материала от времени сушки, $u=f(\tau)$:
1- $t_{\text{суш}} = 40^\circ\text{C}$, SB, $v = 2.41$ м/с; 2- $t_{\text{суш}} = 40^\circ\text{C}$, FB, $v = 4.82$ м/с.

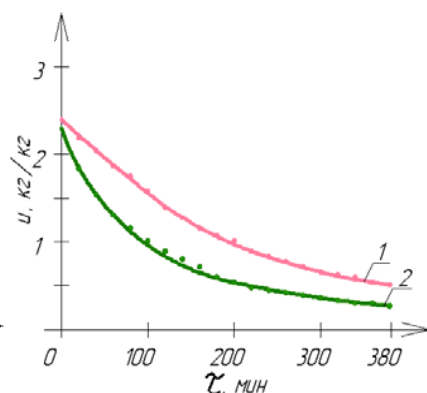


Рис.2. Зависимость влагосодержания материала от времени сушки, $u=f(\tau)$:
1- $t_{\text{суш}} = 25^\circ\text{C}$, SB, $v = 1.1$ м/с.; 2- $t_{\text{суш}} = 25^\circ\text{C}$, FB, $v = 4.82$ м/с.

Из рис.1 видно, что при температуре сушильного агента $t_{\text{суш}} = 40^\circ\text{C}$ кривые сушки для стационарного и псевдооживленного слоев проходят достаточно близко друг к другу и метод сушки (в неподвижном или псевдооживленном слое) не влияет на кинетику процесса при данной температуре, несмотря на то, что в случае с псевдооживленным слоем скорость сушильного агента была в два раза больше. Отсутствие влияния скорости сушильного агента на скорость сушки при температуре 40°C можно трактовать как факт, свидетельствующий о том, что кинетика процесса в этом гидродинамическом и температурном режиме контролируется внутренней диффузией. Таким образом, можно

принять, что сушка супер-сладкой кукурузы в псевдооживленном слое протекает во внутридиффузионном кинетическом режиме. Все зерновки перемешиваются по объему слоя и имеют одинаковые размеры, поэтому кривая сушки слоя эквивалентна кривой сушки единичной зерновки. Это дает возможность, применяя зональный метод, найти концентрационную зависимость коэффициента массопроводности (эффективного коэффициента диффузии влаги в зерновке) из кривой сушки по методике, описанной в [3]. Знание этой зависимости позволяет использовать для кинетического расчета процесса сушки супер-сладкой кукурузы математическую модель на основе решения дифференциального уравнения массопроводности [3].

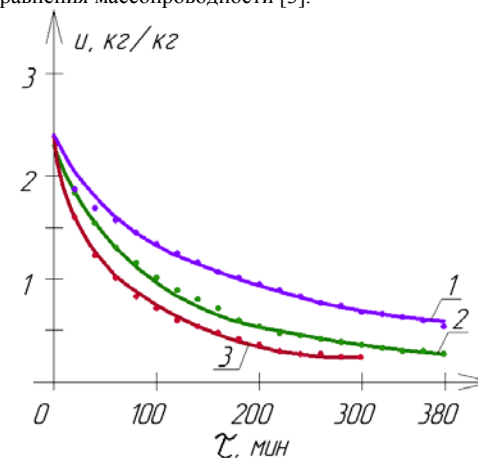


Рис.3. Зависимость влагосодержания материала от времени сушки, $u=f(\tau)$:

1- $t_{\text{суш}} = 15^\circ\text{C}$, FB, $v = 4.82$ м/с; 2- $t_{\text{суш}} = 25^\circ\text{C}$, FB, $v = 4.82$ м/с; 3- $t_{\text{суш}} = 40^\circ\text{C}$, FB, $v = 4.82$ м/с.

На рис.2 уже наблюдается существенное расслоение кривых сушки и видно, что сушка в стационарном слое при скорости сушильного агента $v = 1.1$ м/с протекает существенно медленнее, чем сушка в псевдооживленном слое при скорости сушильного агента $v = 4.82$ м/с. Рис.3 иллюстрирует влияние температуры сушильного агента на кинетику сушки кукурузы в псевдооживленном слое. Из рисунка видно, что повышение температуры сушильного агента с 15 до 40°C значительно интенсифицирует процесс. Это показывает, что температуру сушильного агента целесообразно максимально повышать – в тех пределах, которые допускает энергетически оправданное использование ТНСУ и сохранение должного качества высушиваемого продукта.

Список литературы

1. Alves-Filho O. Heat Pump Drying: Theory, Design and Industrial Application. – Trondheim, Norway: NewDryTech, 2013. – 378 p.
2. Рудобашта С.П. Теплотехника. - М.: КолосС, 2010. - 600 с.
3. Рудобашта С.П. Массообмен в системах с твердой фазой. - Москва: Химия, 1980.

УДК66.047-912

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СУПЕР-СЛАДКОЙ КУКУРУЗЫ, ВЫСУШЕННОЙ В НЕПОДВИЖНОМ ПРОДУВАЕМОМ И ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ QUALITY FACTORS IN DRYING OF A SUPER-SWEET CORN IN STATIONARY AND FLUIDIZED BEDS

Е.А. Муравлева*, О. Алвес-Фильо**, С.П. Рудобашта***

E. A. Muravleva*, O. Alves-Filho**, S.P. Rudobashta***

* Российский государственный аграрный университет –

МСХА имени К.А. Тимирязева», Россия, Москва,

(e.mail: kattya.muravleva@gmail.com).

Russian State Agrarian University – MTAA named after K.A. Timiryazev, Russia, Moscow

** Норвежский университет естественных и технических наук, Норвегия, Трондхейм,

(e.mail: odilio.alves@ntnu.no).

Norwegian University of Science and Technology, Norway, Trondheim

*** Российский государственный аграрный университет –

МСХА имени К.А. Тимирязева», Россия, Москва,

(e.mail: rudobashta@mail.ru).

Russian State Agrarian University – MTAA named after K.A. Timiryazev, Russia, Moscow

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования процесса конвективной сушки супер-сладкой кукурузы в теплонасосной сушильной установке – в плотном продуваемом и псевдоожигенном слое. Проанализировано изменение геометрических размеров и плотности насыпного слоя кукурузы в результате сушки и ее качество (по цветности зерен) – в зависимости от исследованных режимов.

Abstract: The results of convective drying of super-sweet corn by using the heat pump dryer in stable and fluidized beds are presented here. The change of dimensions and densities of the bulk layer of drying the corn and its quality (chroma grains) was determined.

Ключевые слова: супер-сладкая кукуруза, неподвижный продуваемый слой, псевдоожигенный слой, качество.

Keywords: Super-sweet corn, stable bed, fluidized bed, quality.

Сушка оказывает разнообразное воздействие на зерно. Высушить материал надо так, чтобы при реализации процесса были учтены такие важнейшие факторы, как: энергосбережение, ресурсосбережение, обеспечение должного качества продукта и экологичность [1]. Целью данной работы является анализ качества высушенного продукта.

Было проведено 5 экспериментальных исследований по сушке супер-сладкой кукурузы на теплонасосной сушильной установке ТНСУ [2]. Конвективную сушку супер-сладкой кукурузы проводили в неподвижном продуваемом и псевдоожигенном слое при различных значениях температуры $t_{\text{суш}}$, °C, и скорости, м/с сушильного агента (табл. 1). Следует отметить, что такие параметры, как температура и скорость теплоносителя влияют не только на кинетику сушки, но и на усадку зерна, т.к. от них зависит конечное влагосодержание материала. Была измерена толщина (L_1 , мм), ширина (L_2 , мм), высота (L_3 , мм) ста образцов высушенного зерна супер-сладкой кукурузы из каждого проведенного эксперимента (табл. 1).

За время сушки, усадка зерна происходит в большей степени по толщине ΔL_1 – в среднем на 36%, ширина (L_2) и высота (L_3) изменяются в незначительной степени на 2-17%

Исследовали также изменение насыпной плотности зерна супер-сладкой кукурузы в результате сушки – путем измерения объема насыпного слоя зерна определенной массы, полученные результаты представлены в табл. 2. Насыпная плотность зерна зависит

от его влагосодержания, что и прослеживается в таблице. Из табл. 2 видно, что с уменьшением конечного влагосодержания зерна его насыпная плотность снижается.

Таблица 1. Габариты зерна супер-сладкой кукурузы в начале и в конце проведенных экспериментов.

№ теста	Параметры сушки	u_f , kg/kg	L_1 , мм	L_2 , мм	L_3 , мм
0	исходный материал		4,42	7,82	7,92
1	15 °C; FB; 4,82 м/с	0,54	3,04	6,93	7,20
2	40 °C; FB; 4,82 м/с	0,24	2,84	7,18	7,79
3	40 °C; ST; 2,41 м/с	0,27	2,69	7,37	7,73
4	25 °C; FB; 4,82 м/с	0,27	2,88	6,72	6,96
5	25 °C; ST; 1,1 м/с	0,51	2,61	6,43	7,84

Таблица 2. Насыпная плотность зерна супер-сладкой кукурузы после сушки

№ теста	Параметры сушки	u_k , кг/кг	ρ , кг/м ³	$\delta\rho$, %
0	исходный материал		624	
1	15 °C; FB; 4,82 м/с	0,54	590,91	5,3
2	40 °C; FB; 4,82 м/с	0,24	579,31	7,2
3	40 °C; ST; 2,41 м/с	0,27	558,44	10,5
4	25 °C; FB; 4,82 м/с	0,27	593,10	5,0
5	25 °C; ST; 1,1 м/с	0,51	586,21	6,1

u_k – конечное (после сушки) влагосодержание материала в расчете на сухую массу; ρ – плотность высушенного материала; $\delta\rho$ – относительное изменение плотности в процессе сушки.

Изменяя параметры температуры и скорости сушильного агента, можно влиять на цветовые параметры зерна L , a и b , определяемые с помощью спектрометра Lab представляет собой трёхмерное пространство, где отрицательные значения a и b содержат холодные цвета, положительные – тёплые. Ось L определяет светлость, где 100 – участок, соответствующий диффузному белому. Изменение параметров L не влияет на насыщенность цвета – он сохраняет естественные свойства так же, как в реальности цвет не становится грязнее от того, что на него падает тень. Черно-белая гамма получается при нулевых значениях координат a и b [3].

С помощью спектрометра были получены параметры Lab для пяти проведенных экспериментов, представленные на рис. 1. Из спектральной гистограммы супер-сладкой кукурузы (рис. 1) видно, что параметр b наиболее приближен к желтому спектру при сушке в неподвижном слое с $t_{\text{суш}} = 25$ °C ($b = 41,6$) и наименее приближен к нему при сушке в псевдоожигенном слое при температуре сушильного агента $t_{\text{суш}} = 40$ °C. ($b = 34,8$).

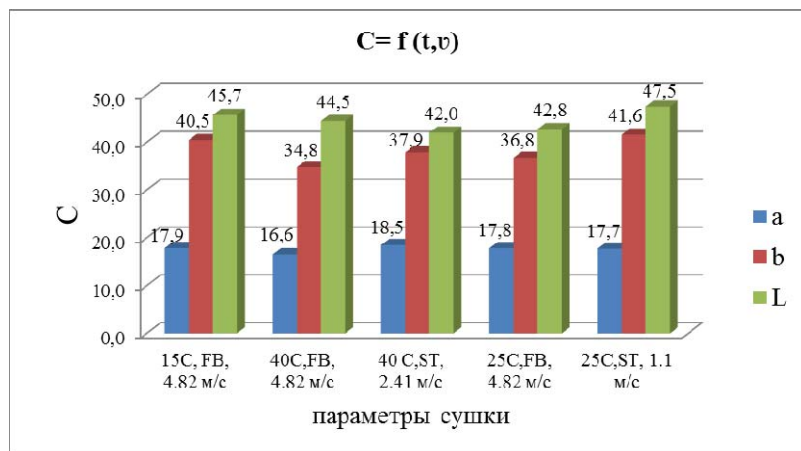


Рис. 1. Цветовые параметры зерна после сушки: L - координаты света (100) и тени (0); a - спектр от зеленого (-128) до пурпурного (127); b - спектр от голубого (-128) до желтого (127).

При $t_{\text{суш}} = 40^\circ\text{C}$, $b_{\text{ST}} > b_{\text{FB}}$ зерно, высушенное в неподвижном слое, лежит ближе к желтому спектру, чем в псевдооживленном слое. ($b_{\text{ST}} = 37,9$, $b_{\text{FB}} = 34,8$). Но в эксперименте $v = 4,82$ м/с, зерно получается ярче, чем при сушке со $v = 2,41$ м/с ($L_{\text{FB}} > L_{\text{ST}}$; $L_{\text{FB}} = 44,5$; $L_{\text{ST}} = 42$).

При $t_{\text{суш}} = 25^\circ\text{C}$ $b_{\text{ST}} > b_{\text{FB}}$ зерно, высушенное в неподвижном слое, не только лежит ближе к желтому спектру, чем в псевдооживленном слое ($b_{\text{ST}} = 41,6$, $b_{\text{FB}} = 36,8$), но и является более светлым ($L_{\text{ST}} > L_{\text{FB}}$; $L_{\text{ST}} = 47,5$; $L_{\text{FB}} = 42,8$).

Список литературы

1. Рудобашта С.П. Теплотехника. М.: КолосС, 2010. 600 с.
2. Alves-Filho O. Heat Pump Drying: Theory, Design and Industrial Application. – Trondheim, Norway: NewDryTech, 2013. – 378 p.
3. ДэнМаргулис Photoshop LAB Color. Загадка каньона и другие приключения в самом мощном цветовом пространстве — М.: Интелбук, 2006.

УДК 66.047: 662.642: 662.732

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ АВТОНОМНАЯ КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СУШКИ, ПОЛУКОКСОВАНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ БУРОГО УГЛЯ POWER AUTONOMOUS COMPLEX TECHNOLOGY OF DRYING, SEMICOKING AND GASIFICATION OF BROWN COAL

М.А. Остапенко, М.М. Савинов, В.А. Попов
M. A. Ostapenko, M.M. Savinov, V.A. Popov

Донецкий национальный технический университет, Украина, Донецк
(e-mail: ost@dgtu.donetsk.ua)

Donetsk national technical university, Ukraine, Donetsk

Аннотация: Рассматривается комплексная технология сушки, полукоксования и газификации бурого угля, которая имеет следующие преимущества: энергетическая автономность; максимальное использование энергетического потенциала бурого угля; минимизация выбросов оксидов серы в атмосферу; возможность получения строительного материала; более высокая теплота сгорания газа полукоксования.

Abstract: Complex technology of drying, semicoking and gasification of brown coal, which is let in on the ground following, is examined: power noninteraction; maximal use of power potential of brown coal; minimization of extrass of sulphur in an atmosphere; possibility of receipt of building material; more high warmth of combustion of semicoking gas.

Ключевые слова: бурый уголь; комплексная технология; сушка; полукоксование; газификация; энергетическая автономность.

Keywords: brown coal; complex technology; drying; semicoking; gasification; power non-interaction.

В настоящее время, в связи со сложившимися трудностями в обеспечении нефтепродуктами и газом, в Украине проявляется интерес к поиску альтернативных направлений решения топливно-энергетической проблемы. Внимание направлено, прежде всего, на использование бурых углей, сланцев, низкосортных каменных углей и углеводородосодержащих отходов. Особый интерес представляет бурый уголь, суммарные запасы которого по оценкам специалистов института УкрНИИпроект г. Киев составляют более 7 млрд. т [1]. По данным обзора Лондонского исследовательского отделения МЭА по углю достоверные запасы бурого угля в Украине оценивают в 2 млрд. т. [2].

Термолизная переработка бурого угля сопряжена со значительным расходом энергии, что связано с большой внутренней влажностью угля – до 60%.

В связи с этим целью настоящей работы является создание энергетически автономной технологии переработки бурого угля с минимальным потреблением внешней энергии.

Указанная цель достигается проведением процессов сушки, полукоксования и газификации бурого угля в едином агрегате с замкнутостью энергетических и материальных потоков, что позволяет обеспечить увеличение КПД использования ресурсного и энергетического потенциала угля, безотходность и экологическую безопасность производства.

Технологическая схема переработки бурого угля показана на рисунке 1. Рядовой бурый уголь, поступающий в бункер 1, подвергается двум стадиям дробления и сушки: первая стадия – в молотковой дробилке 2 и трубном пространстве трубчатой сушилки 3; вторая стадия – в молотковой дробилке 4 и трубе-сушилке 5. Для сушки угля используется газовый теплоноситель, который образуется при сжигании в топке 6 генера-

торного газа. Теплоноситель из топки 6 подается в нижнюю часть дробилки 4, откуда вместе с измельченным углем выносится в трубу-сушилку 5.

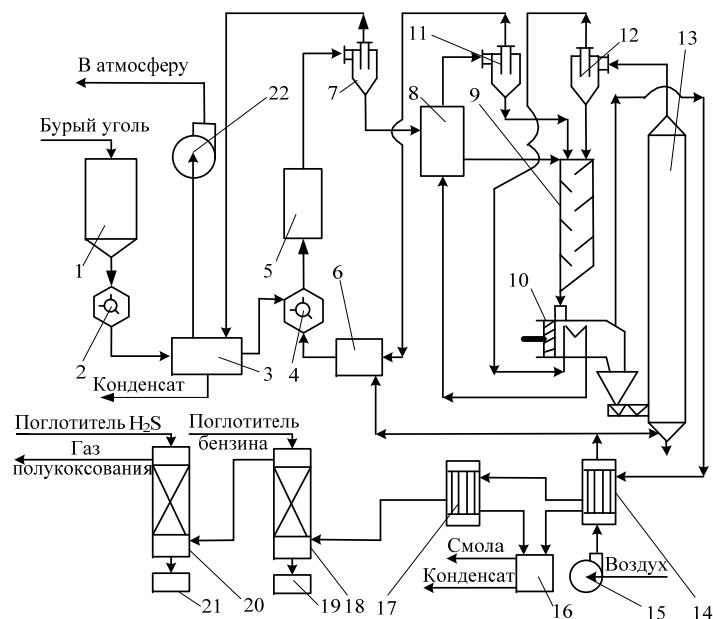


Рисунок 1 - Технологическая схема сушки, полукоксования и газификации бурого угля

В смесителе 9 уголь смешивается с сыпучим теплоносителем, который выносится газом из газогенератора 13 и отделяется от генераторного газа в циклоне 12. После смесителя 9 уголь и сыпучий теплоноситель поступает в реактор полукоксования 10. Реактор полукоксования выполнен в виде узкой щелевой камеры с внешним обогревом генераторным газом. Смесь угля и сыпучего теплоносителя перемещается в рабочей полости реактора полукоксования устройством для проталкивания.

После очистки от частиц угля в циклоне 7 теплоноситель проходит межтрубное пространство трубчатой сушилки 3 и дымососом 22 после очистки выбрасывается в атмосферу.

При охлаждении теплоносителя в межтрубном пространстве сушилки 3 образуется конденсат, который после испарения используется при производстве активных углей (адсорбентов) из полукокса.

Воздух подается в топку 6 вентилятором 15 после предварительного подогрева в теплообменнике 14 за счет тепла газа полукоксования. Подогретый воздух используется также в газогенераторе.

Из циклона 7 уголь поступает в аппарат кипящего слоя 8, где нагревается до 250°C за счет тепла генераторного газа, который затем после очистки от пыли в циклоне 11 сжигается в топке 6.

При полукоксовании выделяются газообразные продукты, которые охлаждаются воздухом в теплообменнике 14 и водой в холодильнике 17. Смола и конденсат, образующиеся при охлаждении газа полукоксования, стекают в отстойник 16. После очистки от газового бензина в промывателе 18, сероводорода и диоксида углерода в скруббере 20 газ полукоксования направляется потребителям или частично используется

пользуется после сжигания в топке 6 для сушки угля. Поглотители бензина и сероводорода стекают в сборники 19 и 21, откуда направляются на регенерацию.

Полукокк из реактора полукоксования 10 поступает в газогенератор 13. Частично полукокк может быть использован при производстве абсорбентов. Для связывания диоксида серы в газогенератор подаются кальцийсодержащие добавки. При этом образуется гипсоподобный материал, который может использоваться в строительстве.

ВЫВОДЫ

Рассмотренная технология переработки бурого угля имеет следующие преимущества:

- энергетическая автономность, которая обеспечивается путем использования тепла генераторного газа для сушки угля и внешнего обогрева реактора полукоксования, а также за счет применения коксозольного остатка, уносимого из генераторов, в качестве сыпучего теплоносителя процесса полукоксования;
- 2-х стадийная переработка бурого угля (полукоксование + газификация полукокса) обеспечивает максимальное использование его сырьевого и энергетического потенциала;
- минимизация выбросов оксидов серы в атмосферу и минимизация расходов на очистку газов за счет связывания оксидов серы кальцийсодержащими добавками;
- возможность получения гипсообразного строительного материала, образующегося при связывании оксидов серы кальцийсодержащими добавками;
- газ полукоксования не загрязняется азотом воздуха и, следовательно, имеет большую калорийность по сравнению с газом, который образуется в реакторах полукоксования в кипящем слое [3].

Список литературы.

1. Поляков С.В., Прядко Н.А. Освоение новых месторождений бурого угля и сланца – значительный резерв топливно-энергетического баланса Украины//Уголь Украины, 1996, №9, с.3-7.
2. В угольной промышленности Украины// Кокс и химия,-1999.- №8.- с.46-47.
3. Святец И.Е., Агроскин А.А. Бурые угли как технологическое сырье. - М.: Недра, 1076. - 223с.

УДК 66.047

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВАКУУМНОЙ СУШКИ ПАСТЫ ЦИНКА УГЛЕКИСЛОГО STUDY OF VACUUM DRYING PASTE ZINC CARBON

М.А. Остапенко, Л.М. Галушко

M.A. Ostapenko, L.M. Galushko

Донецкий национальный технический университет, Украина, Донецк

(e-mail: ost@dgtu.donetsk.ua)

Donetsk national technical university, Ukraine, Donetsk

Аннотация: Приведены сравнительные результаты промышленных исследований сушки цинка углекислого в обогреваемой паром сушилке при атмосферном давлении и под вакуумом. Показано, что при сушке под вакуумом снижение времени сушки составляет 27,3%. Рассмотрена конструкция аппарата для очистки паров от пыли, который устанавливается после сушилки и обеспечивает автоматическое поддержание заданного вакуума в сушилке.

Abstract: The comparative results of industrial researches of drying of zinc of carbonate in the dryer heated by steam at atmospheric pressure and under a vacuum are resulted. It is ro-tined that at drying under a vacuum the decline of time of drying is 27,3%. Construction of vehicle is considered for cleaning of steams from a dust, which is set after a dryer and is provided automatic maintenance of the set vacuum in a dryer.

Ключевые слова: сушка, атмосферное давление, вакуум, аппарат, очистка, пар, пыль.

Keywords: drying, atmospheric pressure, vacuum, vehicle, cleaning, steam, dust

Важнейшим звеном в технологической цепи производства химических реактивов является сушка, как наиболее энергоемкий процесс, во многом определяющий энергозатраты, качество готового продукта и эффективность производства в целом.

В представляемой работе приведены результаты промышленных исследований процесса сушки цинка углекислого, которые проводились в рамках хозяйственной иематики с Донецким заводом химических реактивов.

Целью проведения исследований является снижение энергозатрат и повышение эффективности производства процесса сушки при использовании вакуум-гребковой сушилки, обогреваемой паром, подаваемым в рубашку корпуса.

Анализ показал, что вакуумная сушилка работает неэффективно из-за частых простоев, связанных со значительным уносом пыли, приводящим к забиванию трубопроводов и вакуум-насоса.

В связи с вышеизложенным, было принято решение установить на вакуумпроводе после сушилки аппарат для обеспыливания паров, конструктивная схема которого показана на рисунке 1. Аппарат содержит корпус 1 прямоугольного сечения, к которому приваривается днище 2 пирамидальной формы. К корпусу фланцем 3 крепится короб 4 с плоской 5 и полусилиндрической крышками. В отверстия двух противоположных стенок короба 4 входит вал 7, к которому крепится планка 8, в нижней кромке которой выполнены зубья. Отверстия для прохода вала 7 уплотняются глухой втулкой 9 и сальником 10. Аппарат снабжен штуцерами: 11 – для входа запыленных паров; 12 – для выхода очищенных паров; 13 – для подачи воды; 14 – для поддержания постоянного уровня путем слива избытка воды; 15 – для удаления шлама. К корпусу 1 крепится криволинейная направляющая 16 с вертикальной планкой 17. К крышке 6 крепится вертикальная перегородка 18. Аппарат устанавливается на вертикальные опоры 19.

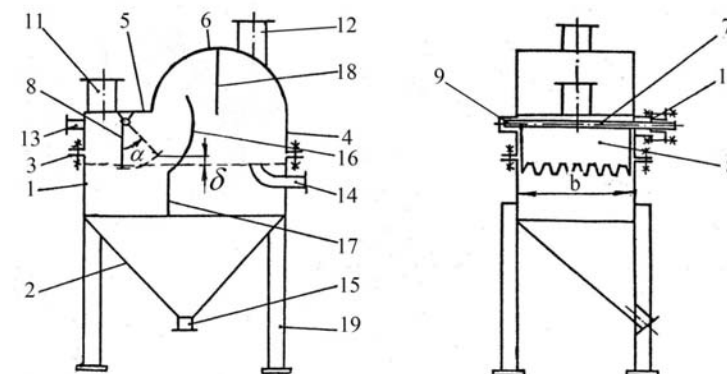


Рисунок 1 – Аппарат для обеспыливания паров сушки

Аппарат работает следующим образом. Из штуцера 11 пар поступает в зазор между нижней кромкой поворотной планки 8 и поверхностью жидкости. При этом пар и частицы пыли движутся по криволинейной траектории. Частицы пыли под действием центробежной силы ударяются о жидкость и выделяются из потока пара. Пар увлекает капли жидкости, которые центробежной силой прижимаются к поверхности криволинейной направляющей 16 и отделяются от пара. Окончательная очистка пара от капель жидкости происходит при огибании верхней кромки криволинейной направляющей 16 и нижней кромки перегородки 18, которые выполняют функции инерционного каплеуловителя.

Для обеспечения постоянного заданного вакуума в рабочей полости сушилки в течении всего времени сушки, предусматривается возможность регулирования гидравлического сопротивления аппарата путем поворота планки 8 на определенный угол α . При уменьшении расхода паров в конце сушки угол α , а следовательно и зазор δ_1 уменьшается. Так как различным периодам сушки соответствуют различные расходы паров, то в процессе сушки производится автоматическое регулирование угла α и зазора δ_1 .

В промышленных условиях изучена зависимость остаточной влажности продукта W от времени сушки t и давления в рабочей полости сушилки. При этом поддерживались следующие параметры технологического режима: - начальная влажность материала $55 \pm 1,0\%$; конечная влажность материала $2,0 \pm 0,2\%$; температура пара на входе в рубашку $150 \pm 2^\circ\text{C}$; температура конденсата на выходе из рубашки $100 \pm 2^\circ\text{C}$; температура материала (цинка углекислого) на входе в сушилку $30 \pm 1^\circ\text{C}$. Проведено две серии опытов – сушка при атмосферном давлении и под вакуумом 0,04 МПа. Отбор проб для определения влажности продукта проводился через каждые два часа. В каждой серии проводилось по три опыта. Графическое изображение указанной зависимости показано на рисунке 2. Каждое значение влажности на рисунке 2 является средним значением результатов 3-х опытов.

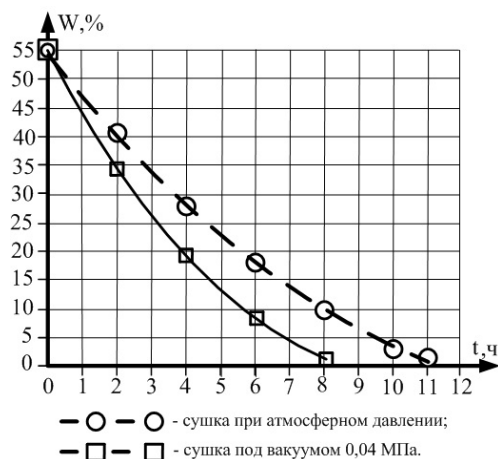


Рисунок 2 – Зависимость конечной влажности от времени сушки и вакуума

Результаты исследований показывают, что при сушке цинка углекислого в обогреваемой паром сушилке под вакуумом 0,04 МПа требуемое время, для достижения конечной влажности продукта 2%, на $(11-8)/100/11 = 27,3\%$ меньше, чем при сушке при атмосферном давлении, что является значительным резервом снижения энергоемкости.

Расчетное годовое снижение энергозатрат при сушке под вакуумом, по сравнению с сушкой при атмосферном давлении составляет $12 \cdot 10^8$ кДж/год.

ВЫВОДЫ

1. Исследования сушки цинка углекислого в обогреваемой паром сушилке, проведенные в промышленных условиях показали, что при сушке под вакуумом 0,04 МПа, снижение времени сушки составляет 27,3%. При этом расчетное снижение энергозатрат составляет $12 \cdot 10^8$ кДж/год.

2. Предложено для реанимации процесса вакуумной сушки установить на вакуумпроводе после сушилки аппарат для мокрой очистки паров от пыли.

3. Рассмотрена конструкция аппарата для очистки паров от пыли, конструкция которого позволяет регулировать вакуум в сушилке и, при необходимости, поддерживать его постоянным.

УДК 678.073.002.68

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СУШКИ В ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

С.И. Бухкало
S.I. Bukhkalov

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
Украина, Харьков,
(e-mail: bis.khr@gmail.com)

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine, Kharkiv

Аннотация: Утилизация и переработка полимерных отходов в статье представлена как комплексное исследование и анализ энерго- и ресурсосберегающих процессов переработки полимерных отходов различного происхождения. Исследования направлены

на изучение таких вопросов как: классификация полимерных отходов; выбор научно-обоснованных методов переработки подлежащих утилизации полимеров; разработка необходимых технологических схем с учетом особенностей оборудования для переработки полимерных отходов; выбор предприятий для реализации утилизации полимеров и вида энергетических ресурсов для реализации этих проектных решений.

Abstract: 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 investigation are focused in researching such problems as organization of waste collection, identification of wastes according to adapted polymers classification; selection of scientific based methods of wastes to be utilized or recycled; the development of appropriated process flow sheets and choice equipment for polymers waste recycling. The choice of appropriate plants with selected energy resources is very important for projects realization.

Ключевые слова: полимерные отходы, энерго и ресурсосберегающие процессы, технология идентификации, утилизация, твердые бытовые отходы, комплексные инновационные проекты

Keywords: polymer waste, energy and resources saving processes, identification technology, recycling, solid waste, integrated innovation projects

Система утилизации твердых бытовых отходов (ТБО), с нашей точки зрения, – это научно-обоснованный выбор стадий технологического процесса для реализуемых проектов с целью обеспечения минимума или полного отсутствия выбросов, а также производства максимума целевых конечных продуктов или сырья. Наиболее полно эти задачи могут быть достигнуты при использовании системы автоматической идентификации, сортировки и раздельной одностадийной или многостадийной переработки различных видов отходов при помощи современных комплексных технологий с учетом особенностей энергоэффективной работы оборудования [1, 2]. Комплексные разработки процессов переработки полимерных отходов неразрывно связаны с их мойкой и дальнейшей сушкой, следовательно, и с изучением основных закономерностей тепло- и влагопереноса в полимерных отходах, извлеченных из ТБО. Совокупность знаний по тепло- и влагопереносу, физико-химическим свойствам и о формах связи влаги с влажными материалами дает возможность определить оптимальный режим переработки полимерного материала из ТБО. Однако реализация оптимального режима при создании конкретных устройств по переработке полимерных материалов из ТБО требует детальных исследований в области термодинамики влажного воздуха, теплопередачи и ряда разделов переработки полимеров; основные специфические возможности процессов и аппаратов в технологии утилизации полимерных отходов обозначены необходимыми показателями в цикле предыдущих работ. В соответствии с постановкой задачи исследований нами предлагается новый подход к организации технологических процессов переработки полимерных отходов с учетом полученных нами теоретических и практических результатов. Рассматривается одностадийная утилизации, а именно технология агломерирования пленочной упаковки. Агломератор – это аппарат, который представляет собой цилиндрическую емкость, снабженную высокоскоростной лопастной мешалкой с системой ножевых элементов. В агломераторе осуществляются следующие операции: разогрев материала до температуры пластичности; дробление и доотмывка; сушка и агломерирование (рис.1). В этом аппарате возможно совмещать четыре операции, он удобен для переработки полимерной упаковки, так как она не имеет существенных загрязнений и не требует предварительного крупного измельчения. На рис. 2 представлены основные характеристики процесса агломерации вторичного полиэтилена из пленочных отходов. Основные показатели – загрязненность и влажность пленки вместе с технологическими показателями процесса – температурой и потребляемой мощностью даны в координатах времени, с разбивкой времени по стадиям. Первой ста-

дией процесса является загрузка. В том случае, если загружается не дробленое полотно, то процесс ведется по определенному графику, предусматривающему быструю подачу на первых минутах так, чтобы на последних минутах скорость загрузки не менее, чем в два раза превосходила производительность аппарата. Режущим рабочим органом агломератора являются ножи, установленные на лопастях мешалки. При быстром вращении ножи измельчают материал, а непрерывно подаваемая вода, одновременно, осуществляет отмывку. Такой метод совмещения дробления и отмывки снижает остаточную загрязненность материала до 0,15 % (рис. 2, кривая 4, %), тогда, как при других способах отмывки загрязненность была на порядок выше. Отмывка происходит в течение всего времени дробления материала. После завершения дробления и отмывки, прекращают подачу промывной воды, при этом оставшаяся промывная вода центробежной силой отжимается через специальные отверстия, прикрытые сеткой в нижней части корпуса. Остаточная влажность, в зависимости от размеров дробленых частиц составляет от 20 до 40 %. После отмывки начинается наиболее энергоемкая стадия процесса – сушка. Длительность ее определяется влажностью материала (рис. 2, кривая 3) и потребляемой мощностью. Целесообразно использовать по возможности менее влажный материал при наиболее полной загрузке аппарата. Часто энергия затрачивается на разогрев материала путем трения. Скорость разогрева и сушки зависят также от геометрии рабочих органов и степени заточки ножей. Кривая 1 потребляемой мощности агломератора (рис. 2) имеет два максимума – на стадии первичного измельчения до подъема температуры и второй максимум в области конечного дробления при нагревании до состояния вынужденной эластичности. Завершение агломерации при выбранных режимных условиях происходит за 35 мин, а потребляемая мощность аппарата составляет 15,5 кВт/ч при загрузке полиэтилена 10 кг/ч и средней насыпной плотности 130 кг/дм³.

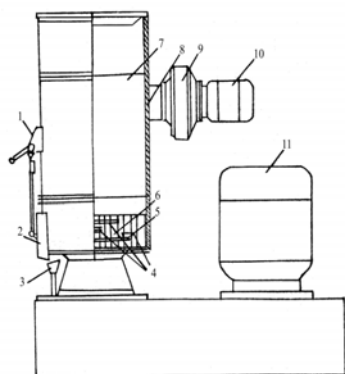


Рис. 1 – Ротаторный агломератор с приводом

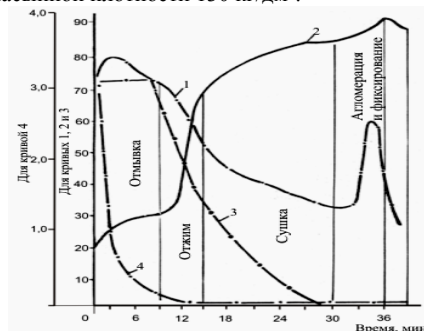


Рис. 2. Режимные параметры работы агломератора

Дробление и агломерация это совмещенные операции, дробление в пластическом состоянии предполагает доразогрев после сушки. Сушка агломерата (рис. 2) заканчивается полностью на 30 минуте, после этого появляется второй пик разогрева (кривая 2,) и второй максимум потребления мощности, что связано с измельчением в пластическом состоянии. Что касается отмывки, то она, в основном, завершается на 14 минуте, дальнейшая обработка, практически, не отражается на загрязненности материала. Процесс агломерации завершается впрыском небольших количеств воды для снижения температуры агломерата и фиксации размера частиц. Агломераты из отходов полимеров можно использовать как самостоятельный продукт при дальнейшей переработке в изделия методом литья под давлением или экструзии, а также как промежуточный тех-

нологический процесс для получения гранулированного вторичного сырья. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что совмещать процессы агломерации с сушкой (при влажности выше 5 %) нецелесообразно из-за возможного снижения качества получаемого вторичного сырья, или необходимо проводить этот процесс с введением антиоксидантов, которые способствуют сохранению качества полимерных отходов упаковки.

Список литературы

1. Бухкало С.И. К вопросу энергосбережения процесса агломерирования полимерной упаковки // Интегрированные технологии и энергосбережение. 2005. № 2. С. 29-33.
2. Бухкало С.И. Деякі аспекти екологічної безпеки полімерної тари та пакування харчової промисловості / Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2014. Вип. 45. Т. 3. – С. 76–79.

УДК: 66.047.6

УСТАНОВКА ДЛЯ СУШКИ БИОПРОДУКТОВ BIOPRODUCTS DRYING UNIT

Александр М. Воробьев, Геннадий С. Кормильцин
Alexander M. Vorobiev, Gennadi S. Kormiltzin

Тамбовский государственный технический университет
(e-mail: A.M.Vorobiev@mail.ru)

Тамбовский государственный технический университет
(e-mail: gkorm40@mail.ru)

Tambov state technical university, Russia, Tambov

Аннотация: Приведена конструкция сушилки и метод улавливания в ней высушенных биопродуктов.

Abstract: There is a construction of drying unit and a method of catching of dry product in a process of yeast production.

Ключевые слова: сушилка, биопродукт, улавливание.

Keywords: drying unit, starch, catching.

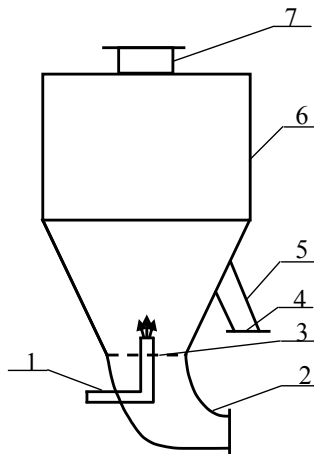
Конечной стадией, определяющей качество готовых биопродуктов является сушка.. При этом необходимо обеспечить минимальное время пребывания в зоне повышенной температуры и интенсивность процесса, а также его экономические показатели, что особенно актуально при переработке комкующихся материалов. Эти факторы во многом определяют выбор способа сушки и аппаратного оформления процесса. Также серьезной проблемой является организация вывода из зоны сушки готового продукта, поскольку интенсивные процессы обезвоживания тесно связаны с улавливанием его. Кроме того, при сушке биоматериалов возникают вопросы борьбы с агломерацией продукта и они зачастую выходят на первый план.

Предложения по организации процесса сушки биопродуктов и аппаратному оформлению его являются продолжением наших ранних разработок [1, 2,3]. Исследования проводились нами на цилиндрикоконическом аппарате, изготовленном из прозрачного термостойкого материала. Конструкция сушилки представлена ниже на рисунке.

Влажный материал в виде суспензии подавался по патрубку 1 в слой инертного носителя, который располагался над поддерживающей решеткой 3. Сушильный агент поступал в аппарат по патрубку 2, создавая фонтанирующий слой инертного носителя с высушиваемым материалом.

Во время процесса сушки в конической части сушилки при определенных гидродинамических условиях можно было получить фонтанирующий слой инертного носителя и слоя сухого материала в виде кольца, располагающегося у стенок аппарата.

Меняя расход сушильного агента, можно изменять положение кольца высушенного продукта в конической части аппарата, располагая его таким образом, чтобы из этой области высушенный продукт отводился через патрубок-накопитель 5, который снабжен шибером 4 и отбойной решеткой в корпусе сушилки. Часть готового продукта выносилась сушильным агентом из аппарата 6 по патрубку 7 на улавливание традиционным способом.



1-патрубок для ввода суспензии; 2-патрубок ввода сушильного агента; 3-поддерживающая решетка; 4-шибер; 5-патрубок-накопитель; 6-корпус аппарата; 7-патрубок вывода отработанного сушильного агента

Рисунок. Установка для сушки биопродуктов

Такая организация процесса и конструкция установки позволяет основную часть высушенного продукта (до 80 %) выводить через патрубок 5 и во многом решать проблему улавливания продукта из отработанного сушильного агента и свести к минимуму агломерацию инертного носителя и обрабатываемого материала.

Список литературы

1. А.с. 1383067 СССР, МКИ F 26 В 17/10. Сушилка для суспензий и пастообразных материалов / А.М.Воробьев и др (СССР) № 4117862/24-06, заявл.15.09.86, опуб.23.03.88, Бюл.№11.-2 с.ил.1
2. А.с. 1170250 СССР, МКИ F 26 В 17/10. Сушилка для суспензий и пастообразных материалов / Г.С.Кормильцин и др (СССР) № 3743342/24-06, заявл.23.05.85, опуб.30.07.85, Бюл.№28.-2 с.ил.5
3. А.с. 1295172 СССР, МКИ F 26 В 17/10. Сушилка. / С.П. Рудобашта и др (СССР) № 3980144/24-06, заявл.22.10.85, опуб.07.03.85, Бюл.№9.-2 с.ил.2

УДК 664.87: 542.47

КОМБИНИРОВАННАЯ КОНВЕКТИВНО-СВЧ СУШКА СЫРЬЯ В ЛИНИИ ПРОИЗВОДСТВА ПЛОДОВООЩНЫХ ЧИПСОВ THE DRYING OF RAW MATERIALS COMBINED BY THE CONVECTIVE-MICROWAVE OVEN IN A PRODUCTION LINE OF FRUIT-AND-VEGETABLE CHIPS

Г.В. Калашников, Е.В. Литвинов
G.V. Kalashnikov, E.V. Letvynov

Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Россия, Воронеж,
(e-mail: kagen5@yandex.ru).

Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh

Аннотация: Предложена комбинированная конвективно-СВЧ сушка плодовоовощных сырья на основе изученных кинетических закономерностей процесса СВЧ сушки. Спроектировано оборудование влаготепловой обработки с использованием электромагнитного воздействия, адаптированная к разработанной линии производства сушеных полуфабрикатов и плодовоовощных чипсов.

Abstract: The combined convective-microwave drying of fruit-and-vegetable raw materials on the basis of the studied kinetic regularities of process of microwave drying is offered. The equipment of moisture thermal treatment with use of electromagnetic influence, adapted for the developed production line of dried semi-finished products and fruit-and-vegetable chips is designed.

Ключевые слова: конвективная сушка; СВЧ-сушка; кинетика; яблоки; груши; морковь.

Keywords: the convection drying; microwave drying; kinetic; apple; pears; carrots.

Известные способы сушки и конструкции оборудования влаготепловой обработки яблок, груш и другого плодовоовощного сырья отличаются локальным перегревом сырья в потоке, недостаточным качеством высушенной продукции и невысокой энергетической эффективностью процесса, что обуславливается слабой взаимосвязанностью технологических режимов с кинетическими закономерностями конкретных фруктов и овощей [1].

Целью работы являлось разработка способа комбинированной конвективно-СВЧ сушки и создание линии производства плодовоовощных чипсов на основе использования электромагнитного излучения при обеспечении их высокой пищевой ценности.

Исходные объекты в виде яблок «Антоновка», груши «Лукас» и моркови «Каратель» местных районированных сортов являются термолабильными капиллярно-пористыми коллоидными материалами, содержащими клетчатку, органические кислоты, дубильные, азотные и пектиновые вещества, витамины С, В1, Р, РР, сахара, каротин (провитамин А), а также флавоноиды и фитонциды. Поэтому изучение кинетических закономерностей сушки яблок, груш и моркови на основе использования электромагнитного излучения рассматривалось с учетом необходимости использования «мягких» температурных и «щадящих» режимов перемещения продукта при максимальном сохранении формы частиц обрабатываемого продукта, а также получении сушеных плодов и овощей высокой пищевой ценности и снижении удельных энергозатрат [2]. Для этого исследовались структурно-механические, физико-химические, теплофизические, электрические и микробиологические свойства изучаемых объектов [1, 3, 4].

В результате исследований процесса влаготепловой обработки пищевого растительного сырья, в т. ч. комбинированной конвективно-СВЧ сушки, отмечено, что изменение влагосодержания продуктов характеризуется взаимосвязанной с характером связи

влаги переменной скоростью влагоперемещения и зависит от количества теплоты. Это связано с преобразованием веществ и нестационарностью структурных компонент продукта в течение воздействия температурных полей на частицы [1]. Отмечено, что пульсационный режим подвода теплоносителя и жидкости при влаготепловой обработке позволяет обеспечить периодическое воздействие теплоты на частицы и снизить расход теплоносителя, способствует лучшему тепло- и массообмену за счет интенсивного обновления межфазной поверхности, сокращению продолжительности обработки, повышению эффективности использования энергетического потенциала теплоносителя и качества готового продукта [1, 2].

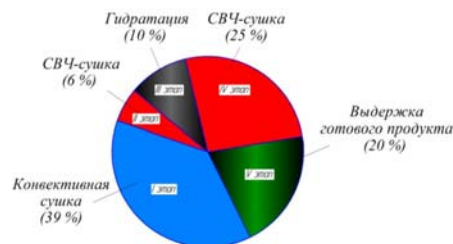


Рис. 1. Схема стадий комбинированной конвективно–СВЧ сушки плодовоовощного сырья

В результате экспериментальных исследований влаготепловой обработки яблок, груш, и моркови были составлена схема стадий комбинированной конвективно–СВЧ сушки, определены удельная составляющая их продолжительности и рациональные комбинированные технологические режимы обработки плодовоовощного сырья (рис. 1).

После осуществления бланширования и предварительного подогрева отработанным теплоносителем сырье подвергают влаготепловому воздействию с поэтапной сушкой продукта. Первый этап осуществляется в виде конвективной сушки плодовоовощного сырья и обеспечивается в периоде прогрева на начальной стадии влагоудаления перегретым паром контура рециркуляции, пронизывающим восходящим потоком слой дисперсного материала. Период прогрева характеризовался интенсивной конденсацией пара на поверхности частиц вследствие их относительно низкой начальной температуры и частичным влагоприращением.

После периода прогрева последующие стадии обработки продукта и многоступенчатой сушки осуществлялись при пульсационных режимах подачи теплоносителя и использования электромагнитного воздействия СВЧ–энергии со ступенчатым характером изменения температуры. Слой пронизывался на газораспределительной решетке восходящим потоком теплоносителя, скорость которого также имела ступенчатый характер. При этом мощность на завершающем этапе сушки, например, яблок, составляла до 30 % начальной, подводимой в контрольную поверхность сушки, при сохранении высокого качества продукта.

Отличительной особенностью воздействия СВЧ–энергии на высушиваемый продукт во втором периоде сушки является равномерность внутреннего нагрева и выделения теплоты во всем объеме влажного продукта, что способствует однородности прогрева по пластине сырья, снижению напряженно-деформированного состояния материала и, как следствие, отмечены лучшие органолептические показатели качества готового продукта. Вместе с тем, при обработке в электромагнитном поле достигается совпадение векторов влагосодержания и температуры, способствующее интенсификации тепломассообменных процессов.

Дальнейшая обработка предусматривает влагонасыщение плодовоовощного сырья погружением его в подогретый водный раствор с температурой 303...308 К или распыливанием жидкости через увлажнители. Затем насыщенный или с нанесенным на поверх-

ность водным раствором продукт досушивают в поле СВЧ при переменной мощности магнетронов и одновременной непрерывной подачей теплоносителя до остаточной влажности 5...7 %, после чего готовый продукт охлаждают и упаковывают в герметичные пакеты.

На основе полученных кинетических закономерностей сушки плодов и овощей предложен способ производства плодовоовощных чипсов с по-стадийной влаготепловой обработкой сырья и комбинированной конвективно–СВЧ сушкой, выяснены конструктивные особенности проектирования соответствующего оборудования и предложена конструкция тороидального оборудования непрерывного действия [5, 6]. Разработанные технологические режимы на основе комбинированной конвективно–СВЧ сушки позволяют сократить продолжительность влаготеплового воздействия почти в 2 раза по сравнению с известными зарубежными аналогами при повышении энергетической эффективности процессов и обеспечении требуемого качества готового продукта.

Предлагаемая конвективно–СВЧ сушка сырья реализована в спроектированной технологической линии производства плодовоовощных чипсов и может быть использована для переработки яблок, груш, моркови, тыквы и другого плодовоовощного сырья при производстве сушеных плодов и овощей [7].

Список литературы

1. Ресурсосберегающие технологии пищевых концентратов / Г.В. Калашников, А.Н. Остриков. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. 355 с.
2. Калашников Г.В., Литвинов Е.В. Кинетика СВЧ – сушки яблок // Вестник ВГУИТ. 2012. № 2. С. 40-42.
3. Калашников Г.В., Литвинов Е.В. Анализ свойств яблок различных сортов на основе термоаналитических методов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 11. С. 28-31.
4. Остриков А.Н., Калашников Г.В., Кузнецова И.В., Калабухов В.М. Дифференциально-термический и термогравиметрический анализы овощей // Вестник РАСХН. 2004. № 1. С. 72-75.
5. Пат. № 2520142, RU, A23L1/212. Способ производства плодовоовощных чипсов / Калашников Г.В., Литвинов Е.В. № 2012127498/13; Заявл. 03.07.2012; Оpubл. 10.01.2014; Бюл. № 1.
6. Пат. № 2483571, RU, A 23 L 01/025, A 23 L 1/064. Тороидальный аппарат для производства плодовоовощных чипсов / Калашников Г.В., Литвинов Е.В. № 2012100586/12; Заявл. 10.01.2012; Оpubл. 10.06.2013; Бюл. № 16.
7. Пат. № 2485803, RU, A 23 L 01/025, A 23 L 1/064. Линия для производства плодовоовощных чипсов / Калашников Г.В., Литвинов Е.В. № 2012104280/12; Заявл. 07.02.2012; Оpubл. 27.06.2013; Бюл. № 18 УДК 664.8.047:536.24

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ
ПРОДУКТОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
IMPROVING THE PROCESS OF SPRAY DRYING PLANT PRODUCTS**

Ю.А. Максименко*, Э.Р. Теличкина, Ю.С. Феклунова***
Y.A. Maksimenko*, E.R. Telichkina**, J.S. Feklunova*****

*ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет», Россия,
Астрахань, (amxs1@yandex.ru)
"Astrakhan state technical University", Russia, Astrakhan.*

Аннотация: Проведено комплексное исследование распылительной сушки растительных материалов и решена задача рационализации сушильного процесса. Определены рациональные значения варьируемых параметров и максимум целевой функции – эффективность сушки. Установленные режимные параметры позволяют организовать эффективное обезвоживание плодовоовощных пюре и растительных экстрактов в распыленном состоянии. Достижимые значения эффективности установок сопоставимы с удельной производительностью промышленных сушилок. Разработанные режимы можно рекомендовать для практического внедрения на предприятиях, специализирующихся на переработке сырья растительного происхождения.

Abstract: A comprehensive study of spray drying of plant materials and the problem of rationalizing the drying process. Determined by the rational values of the varied parameters and the maximum of the target function, the drying efficiency. Set the mode parameters allow you to organize effective dehydration of fruit and vegetable purees and plant extracts in floured condition. Achieved values of effectiveness comparable to specific performance of industrial dryers. Developed modes can be recommended for practical implementation in enterprises specializing in the processing of raw materials of vegetable origin.

Ключевые слова: распылительная сушка, рационализация сушильного процесса, эффективность сушки, сушка плодовоовощных пюре, сушка растительных экстрактов, переработка сырья растительного происхождения.

Keywords: spray drying, rationalization of the drying process, the effectiveness of drying, drying of fruit and vegetable puree, dried herbal extracts, Perera development of raw materials of vegetable origin

Введение

В современных условиях развития агропромышленного комплекса России интерес представляют нетрадиционные технологии переработки сырья растительного происхождения, производство концентратов, сухих пищевых и кормовых кусковых, порошковых и гранулированных продуктов. Продукты промышленной переработки плодов, овощей, ягод, лекарственных растений и трав активно используются при производстве пищевых продуктов массового потребления. Применение сухих порошковых форм длительного хранения, экономически оправдано и технологически рационально [1,2 и др.].

Совершенствованию энергоемкой операции сушки уделяется значительное внимание, так как именно обезвоживание в большей степени определяет стоимость готового продукта и, кроме того, оказывает влияние на качественные показатели товарной продукции [1,2 и др.].

Проведено комплексное исследование распылительной сушки растительных материалов и решена задача рационализации сушильного процесса по организации эконо-

мически целесообразных режимов сушки для обеспечения наибольшей производительности при минимальной потере качества продукции.

Объекты и методы исследований

Исследования кинетики процесса распылительной сушки проводились на разработанной экспериментальной установке, на кафедре «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет».

В ходе комплекса экспериментов были получены кривые сушки исследуемых материалов и дана оценка влиянию на целевую функцию – эффективность изменения сушки основных факторов, согласно методике подробно описанной в ряде работ [3,4,5 и др.].

В качестве экспериментальных образцов были использованы:

1) Плодовоовощные пюре (при приготовлении использовались стадии дробления, протирки и гомогенизации) из следующих продуктов: морковь (сорт «Витаминная»); тыква (сорт «Волжская серая 92»); яблоко (сорт «Антоновка»).

2) Пектиновые растительные экстракты, полученные по оригинальной технологии (Патент РФ № 2309607) при переработке тыквы (сорт «Волжская серая 92») и кабачка (сорт «Белый»). Начальная влажность пектиновых экстрактов перед сушкой $W_n = 0,9$ кг/кг достигалась вакуум-выпариванием.

3) Водные экстракты алтея и имбиря полученные по традиционной технологии, включающей стадии измельчения сырья, подготовку экстрагента (очищенная вода); получение первичной вытяжки; отстаивание; фильтрация; вакуум-выпаривание. Начальная влажность экстрактов перед сушкой $W_n = 0,9$ кг/кг.

В качестве целевой функции при рационализации процесса сушки с учетом рекомендаций [3,4,5 и др.], выбрана удельная производительность, которая соответствует съему сухого продукта с единицы объема камеры в единицу времени Π , кг/(м³·ч):

где G_{Π_k} – производительность установки по сухому продукту – порошку, кг/ч; V – рабочий объем сушильной камеры, м³.

где G_{W_n} – производительность установки по исходному продукту, кг/ч; W_k – конечная влажность, достигаемая при сушке, кг/кг.

Конечная влажность для всех материалов принята $W_k = 0,05$ кг/кг на основании предварительных исследований гигроскопических характеристик [6,7].

При непрерывном установившемся процессе распылительной сушки длина пробега высушиваемых капель (частиц), а, значит, и общая продолжительность процесса определяется объемом сушильной камеры. Таким образом, фактически рабочий объем сушильной камеры является функцией времени сушки τ_c . Зависимость рабочего объема сушильной камеры в экспериментальной установке от времени сушки τ_c для начального размера распыленных частиц 20 – 30 мкм, была установлена экспериментально:

где τ_c – экспериментальное время сушки, с.

В качестве основных факторов, влияющих на эффективность процесса сушки при проведении экспериментальных исследований были приняты: температура сушильного агента $T_{с.а.} = 423..523$ К и начальная температура продукта $T_{prod} = 298..328$ К. Границы варьирования факторов установлены с учетом технологических ограничений и возможностей технического осуществления экспериментального процесса сушки. Нижний предел $T_{prod} = 298$ К соответствует температуре в производственных помещениях. Остальные факторы приняты постоянными и установлены в результате аналитических расчетов и серии предварительных постановочных экспериментов.

Текущая влажность образцов W , кг/кг во времени процесса для построения кривых сушки определялась по методу высушивания отобранных проб до постоянной массы в соответствии с ГОСТ 28561-90. Относительная ошибка при определении W не превышала $\varepsilon_W = 7,3\%$. По кривым сушки для различного сочетания значений влияющих фак-

торов было определено экспериментальное время сушки τ_c исследуемых продуктов до принятой конечной влажности W_k .

Результаты исследований

Установлена зависимость целевой функции от факторов, определены рациональные значения варьируемых параметров и максимум целевой функции Π (таблица 1).

Таблица 1 – Рациональные значения варьируемых параметров и максимум целевой функции

Параметр Продукт	Π , кг/(м ³ ·ч)	$T_{c.a.}$, К	$T_{prod.}$, К
Пюре из моркови	3,784	523	328
Пюре из тыквы	1,335	523	328
Пюре из яблок	2,349	523	328
Пектиновый экстракт из тыквы	1,28	505	328
Пектиновый экстракт из кабачка	1,092	498	328
Водный экстракт Алтея	1,593	503	318
Водный экстракт Имбиря	1,682	503	318

Тестирование установленных режимных параметров для исследуемых продуктов и комплекс дополнительных исследований влияния варьируемых факторов на производительность сушилки проведены на установке распылительной сушки Ohkawara Kakohki OL/OC-L8, на базе Корпуса Экспериментальных технологий Федерального Государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (ФГУП «ВНИРО»). При проведении экспериментальных работ оборудование работало стабильно, получены опытные образцы для последующих исследований.

Выводы

В ходе исследований установлено, что определенные режимные параметры позволяют организовать эффективное обезвоживание плодовоовощных пюре и растительных экстрактов в распыленном состоянии. При этом достигаемые значения эффективности Π установок по сухим порошкам сопоставимы с удельной производительностью промышленных сушилок, следовательно, при соблюдении условий масштабного перехода и при уточнении параметров в ходе пуско-наладочных работ, разработанные режимы можно рекомендовать для практического внедрения на предприятиях различной мощности, специализирующихся на переработке сырья растительного происхождения. Рекомендованные режимные параметры позволяют использовать типовые конструкции сушильных установок, в частности, РС-10Ф, РС-20 и т.д.

Список литературы

1. Алексанян, И.Ю. Распылительная сушка растительных экстрактов Теория. Практика. Моделирование [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, О.А. Петровичев // Монография. Germany, Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH&Co.KG, 2011. – 162с. ISBN: 978-3-8433-1272-1.
2. Максименко, Ю.А. Моделирование и совершенствование тепломассообменных процессов при конвективной сушке растительного сырья в диспергированном состоянии [Текст] / Ю.А. Максименко // Вестник АГТУ. Научный журнал. Серия: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА. 2013. №2 (Август). Астрахань: АГТУ, 2013. С. 19 – 24.

3. Максименко, Ю.А. Анализ влияния основных факторов на эффективность процесса сушки сырья растительного происхождения [Текст] / Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова, Э.Р. Теличкина // Вестник АГТУ. Научный журнал. №2 (58) ноябрь. Астрахань: АГТУ, 2014. С. 97–101.

4. Губа, О.Е. Исследование кинетики распылительной сушки меланжа с учетом влияния основных факторов на интенсивность тепломассообмена [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А. Максименко // Журнал. Естественные и технические науки, №7(75). Москва: Издательство «Спутник+», 2014. С. 72 – 74.

5. Алексанян, И.Ю. Совершенствование тепломассообменных процессов при конвективной сушке растительного сырья в диспергированном состоянии [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова // Научно-теоретический журнал. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания, №3. Воронеж, 2014. С. 48-53.

6. Максименко, Ю.А. Термодинамика внутреннего массопереноса при взаимодействии плодовоовощных продуктов с водой [Текст] / Ю.А. Максименко // Вестник АГТУ. Научный журнал. 2012. № 1(53). Астрахань: АГТУ, 2012. С. 41 – 45.

7. Максименко, Ю.А. Гигроскопические характеристики и термодинамика взаимодействия пектина и воды [Текст] / Ю.А. Максименко, О.А. Петровичев, Р.А. Максименко // Вестник АГТУ. 2007. № 2. С. 185-188.

УДК 664.8.047:536.24

РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШИЛЬНАЯ УСТАНОВКА SPRAY-DRYING INSTALLATION

И.Ю. Алексанян*, Ю.А. Максименко**, Ю.С. Феклунова***, О.Е. Губа****
I.Y. Alexanian*, Y.A. Maksimenko**, Y.S. Feklunova***, O.E. Guba****

*, **, *** ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет»,
Россия, Астрахань, (amxs1@yandex.ru).

"Astrakhan state technical University", Russia, Astrakhan.

**** ГАОУ АО ВПО «Астраханский инженерно-строительный институт», Россия,
Астрахань, (amxs1@yandex.ru).

"Astrakhan civil engineering Institute", Russia, Astrakhan.

Аннотация: Разработана рациональная конструкция установки для распылительной сушки жидких и пастообразных пищевых продуктов при производстве сухих дисперсных материалов. Установка позволяет осуществлять равномерную подачу сушильного агента, увеличить время пребывания распыленных частиц продукта в камере и исключить контакт частиц продукта со стенками камеры. Положительный эффект предлагаемого устройства обеспечивается за счет увеличения интенсивности и качества процесса сушки.

Abstract: Developed by rational design of the installation for spray drying liquid and paste-like foodstuffs in the production of dry particulate materials. The installation allows a uniform supply of the drying agent, to increase the residence time of the sprayed particles of the product in the chamber and to avoid contact of the product particles with the walls of the chamber. The positive effect of the proposed device is achieved by increasing the intensity and quality of the drying process.

Ключевые слова: Тепломассообмен, сушка, техника и технологии сушки, распылительная сушка, тепломассоперенос.

Keywords: heat and mass transfer, drying technology drying, spray drying, heat and mass transfer.

Введение

Распылительные сушильные установки широко применяются в пищевых технологиях для обезвоживания жидких и пастообразных биополимерных систем при производстве сухих дисперсных материалов, в частности, для сушки рыбных бульонов и гидролизатов, растительных экстрактов, плодовоовощных концентратов, бактериальных препаратов, молока, яичных продуктов и др. Рационализации энергоемкой операции сушки уделяется значительное внимание, т.к. обезвоживание в большей степени определяет стоимость готового продукта и оказывает влияние на качественные показатели товарной продукции [1,2 и др.]. Практический интерес представляют результаты исследований по разработке и внедрению рациональных конструкций распылительных сушилок [3,4,5 и др.].

Объекты и методы исследований

Предложен рациональный метод распылительной сушки, позволяющий осуществлять равномерную подачу сушильного агента, увеличить время пребывания распыленных частиц продукта в сушильной камере и исключить контакт частиц продукта со стенками сушильной камеры. На рисунке 1 изображено предлагаемое устройство. Сушильная камера 12 составлена из трех частей: верхняя часть сушильной камеры 5 соединена с цилиндрической частью сушильной камеры 4, к которой присоединена нижняя коническая часть сушильной камеры 2. Верхняя часть сушильной камеры 5 оснащена верхним патрубком ввода сушильного агента 6 и распылителем 7. Цилиндрическая часть сушильной камеры 4 имеет патрубок ввода сушильного агента по касательной к окружности цилиндрической части сушильной камеры 8. К нижней конической части сушильной камеры 2 присоединен узел выгрузки сухого продукта 1. В полости нижней части камеры 2 установлена система отсоса 3, соединенная с циклоном 9 и сборником сухого продукта 10. В полости цилиндрической части 4 сушильной камеры установлены вертикальные прямоугольные перегородки 11 круговым массивом вокруг оси сушильной камеры с образованием одинаковых щелевых зазоров. Перегородки 11 фиксируются с помощью верхнего и нижнего креплений 13.

Продукт, подвергаемый сушке (поток I) диспергируется распылителем 7 в объем цилиндрической части 4 сушильной камеры 12. Ввод сушильного агента (поток II) осуществляется по патрубкам 6 и 8, установленных соответственно в верхней части 5 и цилиндрической части 4 сушильной камеры 12. Благодаря тангенциальному вводу сушильного агента через патрубок 8 и наличию перегородок 11, осуществляется равномерная подача сушильного агента по высоте камеры между перегородками, при этом частицы продукта, увлекаемые потоками теплоносителя, начинают вращаться относительно оси камеры и совершают движения по нисходящей спиралевидной траектории.

Перегородки 11 установлены вертикально с образованием щелевых зазоров и выполнены одинаковыми по высоте с цилиндрической частью сушильной камеры 4 для равномерного подвода сушильного агента по всей траектории движения высушиваемого материала в зоне сушки.

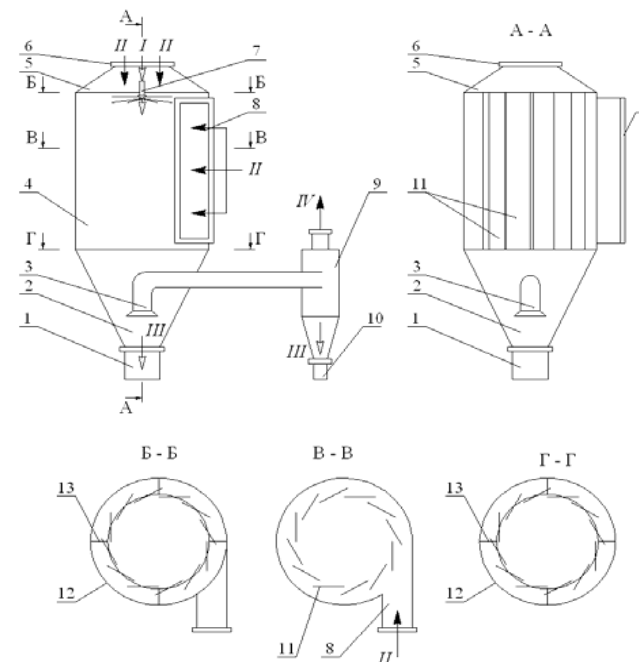


Рисунок 1- Распылительная сушилка

1 – узел выгрузки сухого продукта; 2 – нижняя коническая часть сушильной камеры; 3 – система отсоса; 4 – цилиндрическая часть сушильной камеры; 5 – верхняя часть сушильной камеры; 6 – верхний патрубок ввода сушильного агента; 7 – распылитель; 8 – патрубок ввода сушильного агента; 9 – циклон; 10 – сборник сухого продукта; 11 – вертикальные прямоугольные перегородки; 12 – сушильная камера; 13 – крепления

Сушильный агент, проходя через пространство между перегородками 11, разделяется на несколько перекрещивающихся потоков, которые отталкивают распыленные частицы от поверхности перегородок и, следовательно, от стенок сушильной камеры. Перекрещивающиеся потоки сушильного агента компенсируют центробежную силу, действующую на частицы в процессе их спиралевидного движения. Таким образом, исключается контакт частиц продукта со стенками сушильной камеры.

Высохшие частицы транспортируются потоком теплоносителя по системе отсоса 3 конической части 2 в циклон 9, где за счет возникающей центробежной силы происходит отделение отработавшего сушильного агента (поток IV) от сухого продукта (поток III), который накапливается в сборнике сухого продукта 10. Крупные частицы сухого продукта накапливаются в узле выгрузки 1 (поток III). Дополнительный ввод сушильного агента через патрубок 8 позволяет выровнять температуру сушки по высоте камеры и обуславливает интенсивное обтекание частиц сушильным агентом, что интенсифицирует процесс сушки.

Соотношение расходов сушильного агента подводимого через патрубки и количество перегородок зависят от ряда факторов: производительность установки, параметры факела распыла, время сушки и др. Спиралевидная траектория движения частиц определяет большее время контакта продукта с сушильным агентом в камере по сравнению с традиционным прямолинейным движением вниз, что позволяет либо

уменьшить высоту сушильной камеры при заданной производительности, либо увеличить производительность установки.

Результаты исследований

Положительный эффект устройства обеспечивается за счет усовершенствования конструкции сушилки и позволяет увеличить интенсивность процесса сушки и повысить качество готового продукта. Дальнейшее развитие получает проведение исследований по учету при проектировании сушильной техники кинетических закономерностей и комплекса свойств объектов сушки, в том числе термодинамических, структурно-механических и теплофизических. Кроме того, разработана математическая модель [6], для оперативного управления процессом и автоматизации работы сушильной установки [7].

Выводы

Предложенный рациональный метод позволяет осуществлять равномерную, по высоте сушильной камеры, подачу сушильного агента, увеличить время пребывания распыленных частиц продукта в сушильной камере и исключить контакт частиц продукта со стенками сушильной камеры. Предложена принципиально новая схема организации процесса распылительной сушки и ее конструкторское решение для устранения недостатков присущих традиционным конструкциям, а также для расширения перспектив использования сушильной техники при организации комплексной переработки пищевого сырья.

Список литературы

1. Алексанян, И.Ю. Распылительная сушка растительных экстрактов. Теория. Практика. Моделирование [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, О.А. Петровичев // Монография. Germany, Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 162с. ISBN: 978-3-8433-1272-1.
2. Алексанян, И.Ю. Инновационные технологии переработки сырья растительного происхождения [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Л.М. Титова // Инновационные технологии АПК России – 2014: материалы II конференции в рамках Международного научно-технологического форума «Биоиндустрия – основа зеленой экономики, качества жизни и активного долголетия». - М., 2014. - 84 с. С. 12–18.
3. Алексанян, И.Ю. Распылительная сушилка [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, О.Е. Губа, Ю.С. Феклунова // Научно-теоретический журнал. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания, №1(5). Воронеж, 2015. С. 61-66
4. Губа, О.Е. Разработка рациональных способов конвективной сушки для жидких продуктов [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А. Максименко, С.А. Терешонков // Журнал. Пищевая промышленность. № 10. Москва: Изд-во «Пищевая промышленность», 2010 г. С. 24 – 25.
5. Максименко, Ю.А. Сушильная установка для получения порошков из жидких продуктов [Текст] / Ю.А. Максименко, Н.А. Подледнева, О.Е. Губа // Вестник АГТУ. Научный журнал. 2011. № 2(52). Астрахань: АГТУ, 2011. С. 41 – 44.
6. Максименко, Ю.А. Моделирование и совершенствование тепломассообменных процессов при конвективной сушке растительного сырья в диспергированном состоянии [Текст] / Ю.А. Максименко // Вестник АГТУ. Научный журнал. Серия: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА. 2013. №2 (Август). Астрахань: АГТУ, 2013. С. 19 – 24.
7. Максименко, Ю.А. Автоматизация технологических процессов при переработке сырья растительного происхождения / Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко, Ю.С. Феклунова, Э.Р. Теличкина // Вестник АГТУ. Научный журнал. Серия: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА. №3 (Июль). Астрахань: АГТУ, 2014. С. 21 – 29.

УДК 674.028

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ОБРАБОТКА КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КЛЕЕВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ TEMPERATURE PROCESSING OF GLUE CONNECTIONS ON THE BASIS OF THE POLYMERIC GLUES MODIFIED BY INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD

Виктор М. Попов*, Алексей Н. Внуков, Елена Н. Лушникова***
Victor M. Popov *, Alexey N. Vnukov **, Elena N. Lushnikova *

**Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
Россия, Воронеж,
(e-mail: etvgvlt@mail.ru),
Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Russia, Voronezh*
***Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,
Россия, Воронеж
Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin,
Russia, Voronezh*

Аннотация: Исследуется влияние температуры, при которой проводится обработка в постоянном магнитном поле клеев, используемых для склеивания древесины. Экспериментально установлен оптимальный уровень температуры, при которой предел прочности клеевого соединения древесины имеет максимальное значение. Получены аппроксимации, позволяющие сделать вывод, что обработка клея магнитным полем делает технологический процесс менее зависимым от температуры, чем в случае отсутствия магнитного поля.

Abstract: Influence of temperature at which processing in a constant magnetic field of the glues used for wood pasting is carried out is investigated. The optimum level of temperature at which strength of glue compound of wood has the maximum value is experimentally established. The approximations allowing to draw a conclusion are received that glue processing by a magnetic field does technological process less dependent on temperature, than in case of lack of a magnetic field.

Ключевые слова: клеевое соединение, магнитное поле, предел прочности, склеивание, температура.

Keywords: glue connection, magnetic field, strength, pasting, temperature.

На современных предприятиях, связанных с деревопереработкой значительный удельный вес готовой продукции составляют изделия из клееной древесины [1,2]. Склеивание, как технологический прием, применяется при изготовлении мебели, щитового паркета, фанеры, несущих и ограждающих конструкций и особенно в сборном домостроении. В большинстве случаев основным показателем качества изделий из клееной древесины является прочность клеевых соединений [3]. Для увеличения прочности клеевых соединений древесины совершенствуются технологические приемы склеивания, создаются новые марки клеев. Особенно перспективными представляются методы получения клееной древесины повышенной прочности путем модифицирования применяемых клеев воздействием на клеи физическими полями [4,5].

Проведенными ранее исследованиями, в частности, на клеях, модифицированных воздействием постоянным магнитным полем, установлен эффект повышения прочности клеевых соединений на основе магнитообработанных клеев. Установлено, что прочность склейки зависит от напряженности магнитного поля и времени воздействия

полем. Вместе с тем остается открытым вопрос о влиянии температуры полимеризации клея в условиях клевого шва.

Для получения информации о влиянии температурного режима склеивания древесины проведен цикл исследований на клеях марки КФЖ. В качестве субстрата использовались заготовки из древесины дуба. Обработку клеев в постоянном магнитном поле осуществляли на установке, описанной в работе [4]. Температура, при которой осуществлялся процесс магнитной обработки, варьировалась на уровнях $T=15, 20, 25, 30^\circ\text{C}$, соответствующих холодному склеиванию и на уровнях $T=50, 60$ и 80°C , соответствующих горячему склеиванию. Время обработки составляло 20 мин.

Обработанный в магнитном поле клей затем наносился на поверхности образцов из дуба для испытания предела прочности клеевых соединений на скалывание вдоль волокон согласно ГОСТу 15 613.1-84. Отверждение клевого шва осуществлялось в термощкафу при температуре 60°C в течение двух часов. Приготовленные образцы выдерживались в течение суток при комнатной температуре и затем испытывались на разрывной машине ИР-50-3.

На рисунке приведены сравнительные данные экспериментов в виде зависимости предела прочности клеевого соединения на скалывание τ для исходного и магнитообработанного клея.

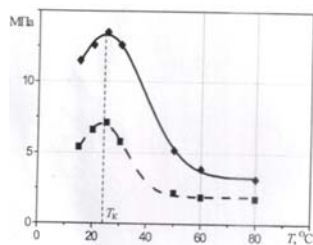


Рисунок. Зависимость предела прочности клеевого соединения на скалывание на основе клея КФЖ от температуры: сплошная линия – обработка в магнитном поле напряженностью $H=20 \cdot 10^4$ А/м; штриховая линия – исходный клей.

Из данных рисунка видно, что максимум зависимости $\tau=f(T)$ наблюдается при комнатной температуре порядка 23°C . Увеличение или уменьшение температуры обработанного и необработанного клея ведет к снижению прочности соединения. Указанный эффект можно объяснить формированием внутренних напряжений, снижающих прочность. При этом чем больше отличается температура от комнатной, тем более выражен отрицательный эффект. В тоже время при температуре выше 50°C предел прочности выходит на некоторое постоянное значение, что может быть связано с тем, что внутренние напряжения растут до некоторого определенного уровня.

Положение точек на графике дает возмож-

ность использовать гауссовскую функцию вида

$$\tau(T) = \tau_0 + \frac{A}{W \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \cdot e^{-\frac{2(T-T_k)^2}{W^2}} \quad (1)$$

Здесь τ_0 – минимальное значение предела прочности клеевого соединения; W – полуширина на полувисоте (характеризует быстроту спада зависимости); T_k – комнатная температура.

Аппроксимация опытных данных гауссовскими зависимостями приводит для магнитного поля напряженностью $H=24 \cdot 10^4$ А/м к следующим результатам.

$$\tau(T) = 3,284 + \frac{259,7}{28,54 \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \cdot e^{-\frac{2(T-24,42)^2}{28,54^2}} \quad (2)$$

При склеивании на исходном клее зависимость $\tau(T)$ имеет вид

$$\tau(T) = 1,930 + \frac{120}{18,79 \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \cdot e^{-\frac{2(T-23,34)^2}{18,79^2}} \quad (3)$$

При сравнении параметров гауссовской зависимости можно видеть существенную разницу в полуширинах пика W (28,54 и 18,79), что свидетельствует о том, что обработка клея магнитным полем делает технологический процесс значительно менее зависимым от температуры, чем в случае отсутствия магнитного поля.

Полученные выше результаты позволяют технологическим службам деревообрабатывающих предприятий направленно руководить процессами склеивания для получения клееной древесины повышенной прочности.

Список литературы.

1. Ковальчук Л.М. Производство деревянных клееных конструкций. М.: Лесная пром-сть, 1987. 248с.
2. Мурзин В.С. Клеи и процесс склеивания древесины. Воронеж: ВГЛТА, 1995. 89с.
3. Хрулев В.М. Прочность клеевых соединений. М.: Стройиздат, 1973. 84с.
4. Попов В.М., Платонов А.Д., Иванов А.В. Способ получения клееной древесины повышенной прочности // Вестник МГУЛ. «Лесной вестник». 2007.-№6.-С.123-125.
5. Попов В.М., Иванов А.В., Шендриков М.А., Жабин А.В. Влияние магнитных и электрических полей на прочность клееной древесины // Вестник МГУЛ. «Лесной вестник». 2009.-№4.-С.122-126.

УДК678.057

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СУШКИ СЕМЯН САФЛОРА МЕТОДАМИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА DEFINITION OF RATIONAL PARAMETERS OF DRYING SAFFLOWER PLANNING METHODS EXPERIMENT

В.Н. Василенко*, Л.Н. Фролова*, Н.А. Михайлова*, Д.А. Таркаева*
V.N.Vasilenko*, L.N.Frolova*, N.A.Mikhailova*, D.A.Tarkaeva*

* Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Россия, Воронеж
(e-mail: fln-84@mail.ru).

* Voronezh State University of Engineering Technology, Russia, Voronezh
(e-mail: fln-84@mail.ru).

Аннотация. В результате статистической обработки экспериментальных данных процесса сушки семян сафлора в осциллирующих режимах, получена информация о влиянии факторов и определены такие технологические режимы, которые бы обеспечивали максимум удельных энергозатрат, минимальную конечную влажность продукта и максимальное влагонапряжение сушильной камеры.

Аннотация. As a result of statistical processing of experimental data of drying seeds of safflower in oscillating mode, received information about the impact of such factors and defined technological conditions that would ensure the maximum specific energy consumption, minimal final moisture content of the product and maximum moisture pressure in the drying chamber.

Ключевые слова: сушка, семена сафлора, влагоудаление, осцилляция, методы планирования.

Keywords: drying, safflower seeds, post-dripping, oscillation, planning methods.

В настоящее время ведутся работы по изучению возможностей обогащения рациона питания полноценным белком с высоким содержанием незаменимых аминокислот, растительным маслом с высоким содержанием полиненасыщенных жирных кислот, витаминов и другими биологически активными компонентами. Источником этих веществ, могут служить масличные культуры семейства астровых, в том числе сафлор. Его семена содержат 25-37 % (в ядре 46-60 %) полувывсыхающих масла (йодное число – 115-155) и до 12 % белка. По жирнокислотному составу сафлор подобен подсолнечнику. В состав масла входят такие жирные кислоты: линолевая – 88,3%, олеиновая – 7,6%, пальмитиновая – 5,5%, стеариновая – 0,65%, линоленовая – 0,2%.

Установлено, что за счет применения теплового воздействия можно обеспечить высокое качество маслосемян сафлора, увеличить сроки их хранения и эффективно использовать при производстве растительного масла, а также в кормопроизводстве. Одним из способов стабилизации качества маслосемян с повышенным содержанием жирных кислот является сушка в осциллирующих режимах, которая осуществляется чередованием нагрева и охлаждения, что позволяет в значительной степени обеспечить сохранность готового продукта при длительных сроках хранения.

Для исследования было применено центральное композиционное ротатальное униформпланирование и был выбран полный факторный эксперимент 2^{5-1} [4] с дробной репликой $x_5 = x_1 x_2 x_3 x_4$. В качестве основных факторов, влияющих на процесс сушки семян сафлора, были выбраны: x_1 – расход сушильного агента, м³/ч; x_2 – высота слоя семян сафлора, м; x_3 – температура сушильного агента, К; x_4 – влагосодержание сушильного агента, г/кг; x_5 – начальная влажность семян сафлора, %. Выбор критерия оценки обусловлен наибольшей значимостью для процесса сушки – удельные энергозатраты на процесс сушки определяют энергоёмкость процесса и является важнейшим показателем в оценке его энергетической эффективности.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии, адекватно описывающее данный процесс под влиянием исследуемых факторов:

$$Y_1 = 11800 - 12x_1 + 160x_2 + 22x_3 + 250x_4 + 38x_5 - 22x_1x_2 - 11x_1x_3 + 31x_1x_4 - 53x_1x_5 + 24x_2x_3 + 33x_2x_4 + 42x_1^2 + 18x_4^2 - 39x_5^2, \text{ кДж/кг}$$

Анализ уравнения регрессии позволяет выделить факторы, наиболее влияющие на рассматриваемый процесс: наибольшее влияние оказывает расход сушильного агента, наименьшее – влагосодержание сушильного агента.

Таким образом, получена информация о влиянии факторов и построена математическая модель процесса, позволяющая рассчитать удельные энергозатраты, внутри выбранных интервалов варьирования входных факторов.

Список литературы

1. Новое в технологию пакирования 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. – 225 с.
2. Василенко, В. Н. Разработка теоретических и технологических основ комплексной переработки масличного сырья [Текст] : монография / В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова, И.В. Драган. – Воронеж. гос. ун-т инж. тех. – Воронеж : ВГУИТ, 2014. – 148 с.
3. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст]: (учебник с грифом Минобрнауки РФ) / А. Н. Остриков, О.В. Абрамов, А.В. Логинов, Ю.В. Красовицкий, В. Н. Василенко. – СПб.: ГИОРД, 2012. – 616 с.
4. Фролова Л.Н. Моделирование процесса осциллирующей сушки масличных культур на примере маслосемян рыжика [Текст] / Л.Н.Фролова, И.В.Драган, Ю.А.Таркаев, С.А.Шевцов // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2014. - № 4. – С. 31-34.

5. Энерго- и ресурсосберегающие технологии переработки масличных культур [Текст] : учебное пособие/ В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова, И.В. Драган. – Воронеж : 2015. – 172 с.

УДК 674.8

УСТАНОВКА НЕПРЕРЫВНОЙ СУШКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ С КОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ INSTALLATION OF CONTINUOUS DRYING OF BULK MATERIALS WITH A CONTACT METHOD OF HEAT SUPPLY

Фарида В. Назипова*, Константин Е. Кузнецов**
Farida V. Nazipova*, Konstantin E. Kuznetsov**

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия,
Казань (e-mail: faridaN13@mail.ru)

**Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия,
Казань (e-mail: faridaN13@mail.ru)

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Аннотация: В статье описывается усовершенствованная установка для термического модифицирования древесного наполнителя при производстве древесно-полимерных композиционных материалов. Главная задача предложенной технологии – оптимизация и снижение энергетических затрат на процесс термомодифицирования измельченной древесины.

Abstract: The paper describes an improved apparatus for the thermal modification of wood filler in the manufacture of wood-polymer composite materials. The main objective of the proposed technology - optimization and reduction in energy costs of the process termomodification chopped wood.

Ключевые слова: термическая модификация; измельченная древесины; композиционный материал.

Keywords: thermal modification; chopped wood; composite material.

XXI век становится веком активного использования композитных материалов. Военно-промышленный комплекс, медицина, самолетостроение, строительные материалы – ни одну из этих отраслей уже невозможно представить без активного участия композитных материалов [1]. ДПК состоит из нескольких составляющих: измельченная древесина, полимер, аддитивы и добавки [2]. От традиционных древесно-наполненных пластмасс (ДНП) композитные материалы отличаются высоким (более 50 %) содержанием древесины по массе в составе общей композиции и соответствующим ее влиянием на свойства готового продукта. В ДНП древесного наполнителя не много и свойства такой пластмассы определяются, в основном, свойствами полимера. А когда древесины становится больше, то свойства композита определяются уже: - свойствами матрицы; - свойствами частиц древесины; - характером связей между древесными частицами и матрицей; - структурой полученного композита. Содержание древесины в составе древесно-полимерного композита на основе термопластичных смол может меняться в широких пределах. Большинство американских производителей работают с составами, содержащими 50 – 70 % древесины. Европейские разработчики технологий экструзии ДПК стремятся получать композиции, содержащие более высокое наполнение древесиной – до 80% и более.

Измельченная древесина представляет собой технологическую щепу, опилки или древесную муку различных фракций. Чем мельче размер частицы, тем лучше она пропитывается полимерным связующим. Материал лучше выдерживает внешние нагрузки.

В большинстве случаев размер древесных частиц в композите находится в пределах от 500 до 50 мкм. Частицы древесной муки могут принимать самые разнообразные формы. Отношение длин частиц муки к их ширинам находится в пределах от 1:1 до 4:1 [2]. Существуют различные способы модификации технологической щепы: в вакууме, в среде топочных газов, контактным методом [2]. Самыми первыми агрегатами для сушки стружки в производстве стружечных плит были сушильные барабаны. В них материал перемешивался за счет медленного вращения барабана диаметром 2-3 м, а сушка выполнялась с помощью горячего воздуха, продуваемого мощным вентилятором через барабан. Недостатками такой конструкции были неравномерная конечная влажность стружки и налипание смолы на внутренние поверхности барабана.

Для повышения качества древесного сырья к различным воздействиям, на кафедре архитектуры и дизайна изделий из древесины КНИТУ предложен способ термической обработки древесного сырья в усовершенствованной барабанной сушилке. Это объясняется тем, что процессы теплообмена протекают в данных устройствах достаточно интенсивно и экономично благодаря хорошему контакту между обрабатываемым сыпучим материалом и тепловым агентом [3-7]. Установка представляет собой цилиндрический кожух, который разделен на две части: первая часть стационарная (т.е. неподвижная), вторая часть подвижная, вращающаяся. Главным рабочим органом установки является шнек (вал с винтовой нарезкой). Привод осуществляется от электродвигателя. Расположение барабана - горизонтальное (для обеспечения оптимальных условий работы, исключения значительного осевого давления барабана, износа катков, нарушения концевых уплотнений). Вращающаяся часть корпуса оснащена дополнительным барабаном, выполненным в виде спирали. По всей длине установка оснащена нагревательными элементами. Нагревательные элементы установлены на внешней поверхности кожуха под слоем теплоизолирующего материала. Процесс модификации происходит следующим образом: исходный материал подается в бункер, перемещаясь по первой части установки, немного подсушивается, проходит во вращающийся участок, где происходит основной процесс модификации. В результате получаем модифицированную щепу, обладающую следующими свойствами: устойчивая к гниению; равновесная влажность сохраняется на уровне 3-5%; не меняет свои геометрические параметры от влияния температуры и влажности; обладает пониженной гигроскопичностью. Основными плюсами данной установки являются: простота обслуживания, высокая производительность, малый срок окупаемости, ремонтпригодность, малая длительность подготовки производства.

На выходе из установки модифицированная щепка имеет ряд важных характеристик: – влажность – 6–8%; – цвет – получают новый цвет, который содержится в полном объеме, т.е. в дальнейшем не нужно подкрашивать; – биостойкость – повышается стойкость к гниению; – безопасность – экологически чистый продукт.

Список литературы

3. Хасаншин, Р.Р., Лашков В.А., Сафин Р.Р., Валиев Ф.Г. Термическая обработка древесного наполнителя в производстве композиционных материалов // Вестник Казан. Технол. ун-та. 2011. №20. С. 150–154.
4. Назипова, Ф.В. Мухаметзянов Ш.Р. Установка для термической обработки измельченной древесины // Деревообрабатывающая промышленность. 2014. №3. С. 49-51.
5. Сафин Р.Р., Разумов Е.Ю. Исследование термомодифицирования древесины в среде топочных газов // Деревообрабатывающая промышленность. 2012. № 1. С. 015-018.
6. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Г. Математическая модель конвективной сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов при давлении ниже атмосферного // Вестник Казанского технологического университета. 2005. № 1. С. 266.

7. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Разумов Е.Ю. Вакуумно-конвективная сушка пиломатериалов. Монография; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Казанский гос. технологический ун-т". Казань, 2009.

8. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Гильмиев Р.Р., Валиев Ф.Г. Снижение расхода энергии на проведение процессов сушки древесины посредством вакуумно-конвективной технологии // Деревообрабатывающая промышленность. 2008. № 5. С. 22-23.

9. Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Разумов Е.Ю., Тимербаев Н.Ф., Зиятдинова Д.Ф., Валиев Ф.Г., Оладышкина Н.А., Кайнов П.А., Хасаншин Р.Р., Воронин А.Е. Установка для сушки древесины. патент на изобретение RU 2425306 23.11.2009.

УДК 636.085

ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СЫПУЧЕЙ ФОРМЫ ХОЛИНХЛОРИДА PARTICULARLY DRYING AT PRODUCTION LOOSE FORM OF CHOLINE CHLORIDE

А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В. Дранников, О.А. Апалихина
A.A. Shevtsov, E.S. Shentsova, A.V. Drannikov, O.A. Apalachina

Воронежская государственная технологическая академия, Россия, Воронеж,
(e-mail: drannikov@list.ru)

Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh

Аннотация: Представлен способ получения сыпучей формы холинхлорида на основе сухого свекловичного жома. Данный способ позволяет реализовать сушку при энерго- и ресурсосберегающих режимах с сохранением высокого качества готового продукта.

Abstract: A process for production loose form of choline chloride, based on dry sugar beet pulp. This method allows for drying at energy and resource saving modes while maintaining high quality of the finished product.

Ключевые слова: сушка, холинхлорид, кормовая добавка, свекловичный жом, энергосбережение.

Keywords: drying, choline chloride, feed additive, sugar beet pulp, energy saving.

При получении кормовых добавок одним из самых энергозатратных процессов является процесс сушки растительного сырья. К такому сырью следует отнести свекловичный жом, который обладая высокой кормовой ценностью и учитывая масштабы производства, может в значительной мере способствовать решению одного из важнейших вопросов развития сельского хозяйства страны – созданию прочной кормовой базы для животноводства. Сырой жом при хранении быстро портится, а его транспортировка из-за большого содержания в нем воды затруднительна и значительно повышает потребительскую стоимость жома.

В связи с этим актуальным представляется разработка способа сушки свекловичного жома перегретым паром в активном гидродинамическом режиме, позволяющим значительно интенсифицировать процесс и получить сухой свекловичный жом высокого качества, который в дальнейшем можно использовать как ценный кормовой продукт и наполнитель при производстве кормовых добавок.

К таким добавкам следует отнести порошкообразный холинхлорид (витамин В₄), который служит источником метильных групп, необходимых для происходящих в организме биохимических процессов, а также входит в состав фосфолипида лецитина, предупреждающего развитие стеатоза печени, геморрагической дегенерации почек и распада зубной железы животных. Использование в кормопроизводстве жидкого холинхлорида связано с технологическими трудностями его хранения, транспортировки и

ввода в премикс, так как он неравномерно распределяется по объему смеси, что может привести к передозировке и гибели животных и птицы, поэтому все предприятия по производству премиксов перешли на применение сухих препаратов [1].

В связи с этим был разработан способ получения сыпучей формы холинхлорида на основе сухого свекловичного жома [2], схема которого представлена на рисунке 1.

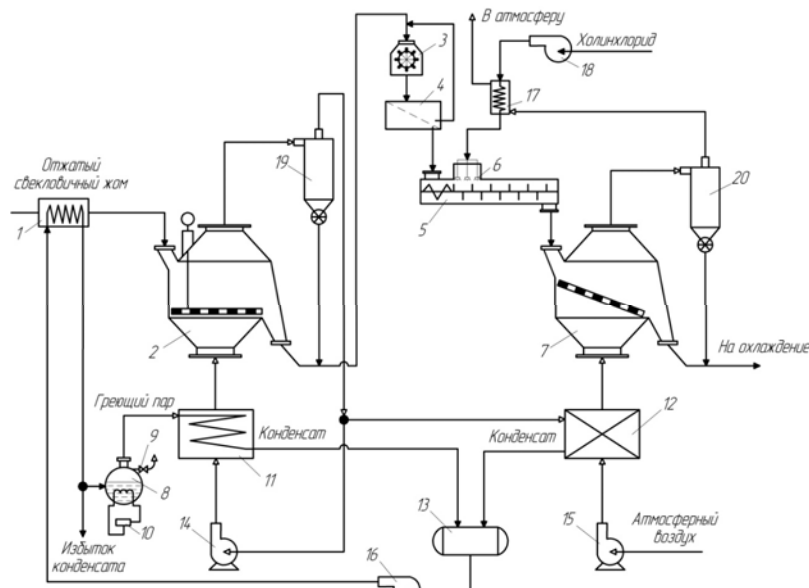


Рисунок 1. Схема получения сыпучей формы холинхлорида на основе сухого свекловичного жома

Отжатый свекловичный жом с влажностью 82...84 % предварительно подогревают в камере нагрева 1 до температуры 80...90 °C и затем подают в вибросушилку 2, где осуществляется его сушка перегретым паром атмосферного давления с температурой 135...140 °C в импульсном виброкипящем слое до влажности 12...13 %. Сушка свекловичного жома в среде перегретого пара позволяет по сравнению, например, с распространенным способом сушки топочными газами, получить сухой жом высокого качества, так как не происходит подгорания частиц продукта и их контакта с продуктами сгорания топлива [3].

Отобработанный перегретый пар с температурой 105...110 °C из вибросушилки 2 направляют сначала на очистку в циклон-очиститель 19 от мелкодисперсной фракции, которую объединяют с сухим жомом, а затем разделяют на два потока. Один из которых, подают в калорифер 12, где происходит нагрев атмосферного воздуха до температуры 65...70 °C. Другой поток вентилятором 14 направляют в пароперегреватель 11 для перегрева до температуры 135...140 °C греющим паром с температурой 150...155 °C. При этом греющий пар получают в парогенераторе 8 с помощью ТЭНов 10.

Полученный сухой свекловичный жом с влажностью 12...13 % направляют на дробилку 3 для измельчения до размера частиц 1 мм. Измельченный продукт фракционируют на просеивателе 4, подают в смеситель 5, где смешивают с исходным 70 %-ым водным раствором холинхлорида предварительно подогретым до температуры 35...40 °C, который вводят в смеситель с помощью форсунок 6 в соотношении 2:3.

Далее полученную смесь с влажностью 47...50 % подают в сушилку 7, где осуществляют ее сушку в кипящем слое до конечной влажности 10 % атмосферным воздухом, подогретым в калорифере 12 до температуры 65...70 °C при скорости воздуха в рабочей камере сушилки 0,8...1,0 м/с.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет обеспечить сохранность витамина В₄ в готовом продукте, так как сушка порошкообразного холинхлорида осуществляется атмосферным воздухом при невысокой температуре 65...70 °C; повысить энергетическую эффективность способа получения готового продукта за счет того, что отработанный перегретый пар после вибросушилки направляют для подогрева атмосферного воздуха, забираемого из окружающей среды и, следовательно, более полно использовать его тепловой потенциал, а также за счет того, что используется теплота конденсатов образовавшихся в процессе сушки для предварительного подогрева отжатого свекловичного жома.

Список литературы

1. Пелевин, А. Д. Комбикорма и их компоненты [Текст] / А. Д. Пелевин, Г. А. Пелевина, И. Ю. Венцова. – М. : ДеЛи принт, – 2008. – 509 с.
2. Патент № 2489030РФ, А 23 К 1/16, C07C215/40. Способ получения сыпучей формы порошкообразного холинхлорида из его водного раствора [Текст] / А. В. Дранников (Россия) – № 2012109362/13; заявлено 12.03.2012; опубликовано 10.08.2013; Бюл. № 22.
3. Кинетика процесса сушки свекловичного жома перегретым паром в импульсном виброкипящем слое [Текст] / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, С. А. Барышников, Ю. В. Фурсова // Сахар. – 2007. – № 4. – С. 28-29.

УДК 662.659; 66.047.132

ИЛЫ ПОЛЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ СТАНЦИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД КАК ОБЪЕКТ СУШКИ SLUDGE OF INFILTRATION FIELDS OF STATIONS BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT AS OBJECT OF DRYING

Артем В. Голубев, Андрей А. Топоров
Artem V. Golubev, Andrey A. Toporov

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина
(e-mail: a-v-golubev@ya.ru)

Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

Аннотация: Проанализированы проблемы утилизации осадков станций биологической очистки городских сточных вод. На иловых полях Центрального Донбасса количество илов составляет до 1 млн т. Были отобраны пробы илов для определения способов их утилизации. Для отобранных проб определена влажность. Изучена возможность механического обезвоживания материала иловых полей.

Abstract: The problem of the disposing of precipitations of stations for biological treatment of municipal wastewater is analyzed. On sludge fields of the Central Donbass amount of silt up to 1 million tons. The sludge samples were taken to determine the methods for their disposal. To determine the moisture content of the samples. The possibility of mechanical dewatering sludge material fields.

Ключевые слова: иловые поля; очистка сточных вод; влажность; механическое обезвоживание.

Keywords: sludge fields; waste water treatment; moisture; mechanical dewatering.

В городах Донбасса очистка сточных вод производится исключительно биологическим (биохимическим) методом, который является одним из наиболее распространенных и эффективных [1]. В результате биологической очистки образуются твердые отходы – илы бытовых отстойников. В мировой практике основными направлениями утилизации этих материалов является применение их в качестве органо-минеральных удобрений или сжигание. В городах центрального Донбасса илы бытовых отстойников в настоящее время практически не используются. Их направляют для хранения на так называемые поля фильтрации. На полях фильтрации накоплены значительные объемы илов. Для Центрального Донбасса их количество может достигать 1 млн т (на сухую массу), а ежегодное количество вновь образующихся илов составляет десятки тысяч тонн (на сухую массу). При этом уже сейчас в ряде стран Европейского Союза запрещено захоронение на полигонах отходов с содержанием органических веществ более 5 %. Полезному использованию илов препятствует, в том числе, их высокая влажность. Большое содержание воды затрудняет (или делает невозможной) транспортировку илов и термическую переработку. Поэтому важной задачей является разработка способов удаления влаги из этого материала. Для этого необходимо знать количество влаги и ее состояние.

Нами были отобраны пробы на 7 полях станций биологической очистки сточных вод трех городов центрального Донбасса. Пробы отбирали в соответствии с [2, 3]. Точечные пробы отбирались методом «конверта по диагонали», следя за тем, чтобы каждая проба была типичной для исследуемых участков. При этом из точек контролируемого «элементарного» участка илового поля фильтрации брали 10 образцов ила. Точки отбора располагались так, что в плане они давали рисунок запечатанного конверта, длина стороны которого была 20 м. Поверхностные пробы отбирали с глубины 10 см в количестве 5 проб, и 5 проб отбиралось с глубины 0,5-0,6 м. Объединенную пробу ила для каждого поля фильтрации готовили из точечных проб. Объединенная проба имела массу 2-2,5 кг.

Для выбора технологии переработки илов вообще и сушки в частности важным является гранулометрический состав материала. Результаты определения гранулометрического состава приведены в табл. 1. Ил полей фильтрации представлен в основном частицами с небольшими размерами. Количество частиц с размером <1 составляет 53,9-61,2 %.

Таблица 1 – Гранулометрический состав исходного ила

Номер пробы	Количество частиц, %, крупностью, мм				
	>8	5-8	5-3	1-3	<1
1.1	10,4	7,2	8,3	20,2	53,9
1.2	5,2	3,8	4,1	25,7	61,2
1.3	10,1	6,0	7,2	17,2	59,5
2.1	7,9	4,1	5,5	22,3	60,2
2.2	5,0	4,4	5,1	27,5	58,0
3.1	5,1	5,3	7,5	24,8	57,3
3.2	5,9	4,9	8,1	23,9	57,2

Определение влажности проб проводили, основываясь на [4]. Этот способ основывается на высушивании пробы при 105 °С до постоянной массы. Он во многом аналогичен способу определения влаги в твердом топливе по [5]. Различия заключаются в гранулометрическом составе пробы и массе навески. Результаты определения влажности представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Исходная влажность проб

№ пробы	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	3.1	3.2
Влажность на рабочую массу, %	42,10	74,20	58,10	37,01	50,33	39,7	33,3

В связи с высокой влажностью илов важным является вопрос о возможности их сушки в естественных условиях, например, путем выдержки в тонком слое на крытых площадках. Поэтому было проведено определение влажности воздушно сухих илов в летний и осенне-весенний период. Воздушно сухие илы получали высушиванием пробы при комнатной температуре по [5]. Результаты приведены в табл. 3

Таблица 3 – Влажность воздушно-сухих илов

№ пробы		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	3.1	3.2
Влажность на рабочую массу, %	летний период	17,1	22,3	20,2	17,5	19,1	17,9	17,3
	осенне-весенний период	23,7	26,1	26,0	22,5	24,5	22,8	21,0

Как видно, после высушивания в естественных условиях влажность остается значительной, хотя и существенно уменьшается. При высоком влагосодержании возможно обезвоживание до определенного уровня при механической обработке. При влажности более 60 % центрифугированием можно ее уменьшить до 50-55 %.

При прессовании образцов ила с влажностью более 40 % отжималось определенное количество воды, зависящее от приложенного давления. Для илов влажностью около 50 % приложение давления 15 МПа позволяло получить прочный брикет с влажностью не более 42 %. Поэтому привлекательным является извлечение илов с полей фильтрации с помощью торфорезательной машины, которая одновременно срезает слой с поверхности грунта и спрессовывает полученную массу в брикет с последующей подсушкой брикетов в естественных условиях

Список литературы

1. Яковлев С.В. Очистка производственных сточных вод / Яковлев С.В., Карелин Я.А., Ласков Ю.М. – М.: Стройиздат, 1985.
2. ГОСТ 17.4.4.02-84 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
3. ISO 10381-2:2004. SOIL QUALITY. SAMPLING. PART 2. Guidance on sampling techniques.
4. ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений.
5. ГОСТ 27314-91 (ИСО 589-81). Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги.

УДК 539.4

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СУШИЛЬНОГО
БАРАБАНА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ**
**FORECASTING OF THE RESIDUAL RESOURCE OF THE DRYER DRUM ON
THE BASIS OF THE ANALYSIS OF CHANGE OF ITS TECHNICAL CONDITION**

А.А. Топоров, И.Г. Дедовец
A.A. Toporov, I.G. Dedovets

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина
Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

Аннотация: Представлены результаты исследований, которые позволяют рекомендовать материалы для изготовления барабанов сушилок и их внутренних устройств - насадок, обеспечивающих повышение их ресурса в 5 - 10 раз.

Abstract: Results of researches which allow to recommend materials for production of drums of dryers and their internal devices - the nozzles providing increase of their resource by 5 - 10 times are presented.

Ключевые слова: барабанные сушилки, надежность, остаточный ресурс.

Keywords: drum dryers, reliability, residual resource.

В химической промышленности в 57% причиной преждевременного выхода оборудования из строя является коррозия [1]. Поскольку многие параметры технического состояния оборудования в частности, коррозионные повреждения) трудно поддаются непрерывному контролю, для оценки работоспособности прибегают к периодическим обследованиям оборудования, при которых выявляют и измеряют величины имеющихся повреждений, а затем сравнивают их с предельно допустимыми. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования при этом традиционно осуществляют приближенно путем деления запаса толщины стенки на среднюю скорость коррозии (изнашивания). Применение специальных статистических методов, в частности использование распределения экстремальных значений, позволяет при этом многократно уменьшить объем необходимых измерений без потери достоверности оценки. Опыт применения методик [2,3] оценки надежности оборудования, подвергнувшегося поверхностному (коррозионно-эрозионному) разрушению, показанный в работе [4] на примере барабанной сушилки типа БН-3,2-22 (рис. 1).

Таблица 1

№ участка	Статистические характеристики			
	n	\bar{h} , мм	σ , мм	v_h
1	16	1,56	1,02	0,7
2	26	1,17	0,73	0,62
3	16	1,35	0,93	0,69
4	22	3,1	1,47	0,47
5	21	2,4	1,1	0,46

Сушилки данного типа подвергаются коррозионно-эрозионному изнашиванию. На рис. 2 показана схема расположения точек измерения остаточной толщины стенки на развертке обечайки барабана и значения глубин коррозионно-эрозионного износа h_i , нанесенные на координатную сетку: $L - h$ (где L - расстояние от края обечайки со сто-

роны загрузки концентрата). Глубина h_i , определялась по разности $\delta_0 - \delta_i$ (где δ_0 - начальная толщина стенки барабана 20 мм).

Статистические характеристики глубин повреждений приведены в табл. 1 (где n - число измерений на участке; \bar{h} - среднее значение глубины; σ - среднее квадратическое отклонение; v_h - коэффициент вариации).

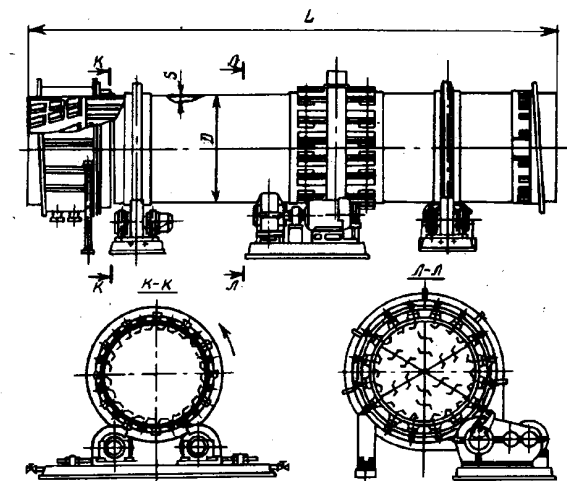
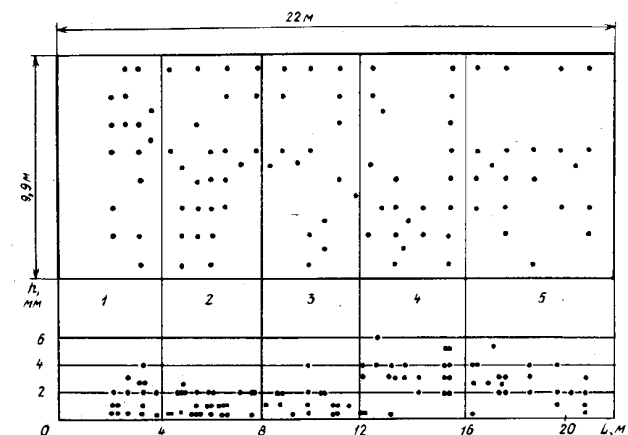


Рисунок 1 Схема конструкции барабанной сушилки БН 3,2-22
($L=22$ м; $B=3,2$ м; $S=20$ мм)



а – расположение на развертке барабана сушилки точек измерения остаточной толщины стенки; б – распределения глубин коррозионных повреждений h по длине барабана L

Рисунок 2 Схема замеров.

Расположение точек на рис.2 наглядно показывает неравномерность разрушения стенки как по окружности, так и по длине барабана. По результатам проверки данных рис.2 установлено, что на участках 1, 2 и 3 различия в глубине повреждений стенок не

являются статистически значимыми и могут быть объединены в одну выборку. После объединения результаты измерений глубины повреждений были нанесены на вероятностную бумагу Вейбулла (рис.3). Расположение точек на одной прямой линии свидетельствует о соответствии полученного эмпирического распределения теоретическому распределению Вейбулла и о правомерности применения для прогнозирования ресурса данной сушилки методики [3]. На участках 4 и 5 различия в h^* , оказались существенными, поэтому расчет их остаточного ресурса в соответствии с рекомендациями методики [3] необходимо осуществлять отдельно. Для выполнения расчета по данной методике необходимо определить критерии предельного состояния оборудования и параметры распределения глубин повреждений, приведенные к моменту наступления предельного состояния.

Критерием предельного состояния барабана сушилки является уменьшение толщины стенки до 10 мм (исходная толщина 20 мм) на поверхности, составляющей от общей площади 5%, т.е. $h_n = 10$ мм; $\beta=0,05$. Параметры распределения глубин повреждений определяются через приведенный коэффициент вариации по формуле (1), в которой v_h , h берутся для участка, подверженного наибольшему разрушению. Точность оценки v_h может быть значительно повышена за счет использования результатов измерения h_i на других участках путем приведения v_{hi} по формуле (2) к глубине h_n .

$$v_h = v_{\xi} (\Delta t / t)^{1/2} \quad (1)$$

где v_{ξ} - коэффициент вариации скорости коррозии.

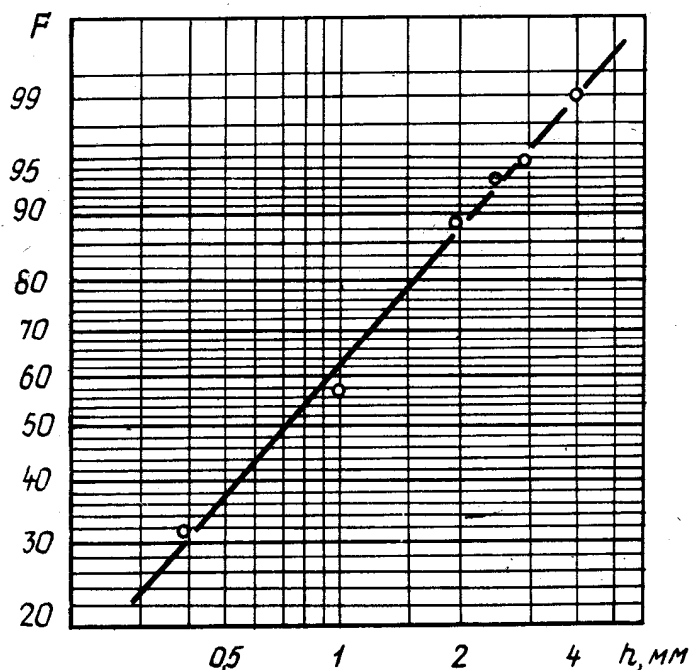


Рисунок 3 Распределение измеренных глубин повреждений на вероятностной бумаге вейбулла ($F(h)$ – интегральная вероятность повреждения на глубину h).

Применение формулы (1) правомерно в тех случаях, когда механизм разрушения поверхности при увеличении средней глубины повреждений не изменяется, например, в случае оценки вариации глубин повреждений одной и той же поверхности при различной продолжительности испытаний. Если различные участки оборудования повреждаются неодинаково только из-за различия интенсивности повреждающего воздействия (в нашем случае из-за изменения rH по длине барабана), то при неизменности механизма разрушения вариация повреждений, обусловленная неоднородностью свойств изнашиваемой поверхности, должна зависеть лишь от глубины повреждений. Поэтому зависимость (1) в таких случаях должна быть справедливой и для различных участков поверхности оборудования.

Уточненная оценка коэффициента вариации глубины повреждений для рассматриваемого участка поверхности определится по формуле:

$$v_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_{hi}^2 n_i}{N}}$$

где v_{hi} - коэффициент вариации глубины на i -м участке поверхности; n_i - число измерений глубины на i -м участке поверхности; N - число обследованных участков поверхности.

Величина коэффициента вариации для 4-го участка (участка наибольшего износа, см. рис.2) барабана, составила 0,44. Величина приведенного коэффициента вариации v_n , определенного по формуле (2), составила 0,33. Значения параметров распределения $K_B=0,897$; $\sigma = f(v_n) = 3,3$ (σ и K_B , определены по работе [3]). Расчетный средний ресурс барабана равен [3]

$$T_p = \frac{h_n K_B}{c(-\ln \beta)^{1/\sigma}} = \frac{10 \cdot 0,897}{2,74(-\ln 0,05)^{1/3,3}} = 2,35 \text{ лет}$$

где c - средняя скорость коррозии; $c = h/\tau = 3,1/1,13 = 2,74$ мм/г.

Гарантированный (гамма-процентный) ресурс определяется по формуле

$$T_{p\gamma} = T_p (1 - u_{\gamma} v_r) = 2,74 (1 - 3,09 \cdot 0,043) = 2,04 \text{ лет}$$

где u_{γ} - квантиль нормального распределения, соответствующая уровню $\gamma = 0,999$;

v_r - коэффициент вариации ресурса

$$v_r = v_h / \sqrt{\sum_{i=1}^N n_i} = 0,44 / \sqrt{102} = 0,043$$

Фактический срок службы обследованных барабанных сушилок составил 2 года, что свидетельствует о верности расчета. Сравним полученные результаты с результатами расчета традиционным методом. Ожидаемый срок службы (ресурс) традиционно определяют по средней скорости коррозии:

$$T_p = h_n / c = 10 / 2,74 = 3,65 \text{ лет}$$

Минимальный (гарантированный) ресурс определяют по максимальной глубине h_{max} измеренных повреждений:

$$T_{p\gamma} = h_n \tau / h_{max} = 10 \cdot 1,13 / 6 = 1,38 \text{ лет}$$

Видим, что расчеты традиционными методами дают значительно большую погрешность, чем по методике [3]. Низкий срок службы данных сушилок обусловлен несоответствием коррозионной стойкости Ст.3 условиям эксплуатации. Результаты исследований позволяют рекомендовать более стойкие материалы для изготовления барабанов сушилок и их внутренних устройств - насадок, обеспечивающие повышение их ресурса в 5 - 10 раз.

Список литературы

1. Камсков Ф.И., Жилинский И.Б., Краснов В.И., Маннапов Р.Г., Исупов Ю.Г. Метод форсированных испытаний изделий машиностроения. // Тезисы республиканской науч-

но-технической конференции "О результатах научных исследований в области разработки добычи, транспорта и переработки нефти в Башкирии, Уфа, 1975.

2. Маннапов Р.Г., Жданов В.Д., Гальперин Е.Н. РДМУ 1154-1-82 "Методика расчета показателей надежности химического оборудования на этапе проектирования." -М.: НИИХиммаш, 1982.

3. Маннапов Р.Г., Гальперин Е.Н., Жданов В.Д., Бобышев В.И., Самсонов В.Ф. РД 26-01-143-83 "Надежность изделий химического машиностроения. Оценка надежности и эффективности при проектировании." -М.: НИИХиммаш, 1983.

4. Кутепов С.М., Рачков В.И., Маннапов Р.Г., Инструкция по диагностированию технического состояния сосудов промышленных аммиачных холодильных установок. И4-94.

5. Р.Р.Залаяев, С.А.Страхов, Кутепов С.М., Рачков В.И., Маннапов Р.Г., Методика диагностирования технического состояния компрессоров промышленных аммиачных холодильных установок, И7-95.

УДК 664.405

ТЕПЛО- И МАССОБМЕН ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЭФФЕКТИВНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ И ПРОДУКТОВ ДЛЯ КОМБИКОРМОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

HEAT AND MASS TRANSFER IN THE PREPARATION OF EFFECTIVE ORGANIC FERTILIZERS AND PRODUCTS FOR THE PRODUCTION OF FEED

Ю.А. Калошин*, Ю.В. Светлов**, К.Д. Бузетти***,

Ю.Б. Никифоров****, В.Г. Вусс*****,

Y.A. Kaloshin*, Y.V. Svetlov**, K.D. Buzetti***, Y.B. Nikiforov****, V.G. Vuss*****

*Московский государственный университет технологии и управления
им. К.Г. Разумовского, Россия, Москва,
(e-mail: kpm@mgut.ru)

**Московский государственный университет технологии и управления
им. К.Г. Разумовского, Россия, Москва,
(e-mail: yuvsvetlov@mail.ru)

***Московский государственный университет технологии и управления
им. К.Г. Разумовского, Россия, Москва,
(e-mail: krapp@mgut.ru)

****Московский государственный университет технологии и управления
им. К.Г. Разумовского, Россия, Москва,
(e-mail: nickel-nc@ya.ru)

*****Московский государственный университет технологии и управления
им. К.Г. Разумовского, Россия, Москва,
(e-mail: vas-vuss@yandex.ru)

Moscow State University of Technologies and Management named
after K.G. Razumovskiy, Russia, Moscow.

Аннотация: В работе рассматриваются современные подходы в переработке отходов птицеводческих комплексов в высокоэффективные твердые гранулированные и жидкие органические удобрения, а также корма для сельскохозяйственных животных.

Abstract: The work deals with modern approach to recycling poultry farms in highly granular solid and liquid organic fertilizer, as well as feed for farm animals.

Ключевые слова: тепломассообмен, переработка отходов, органические удобрения, птицеводческие комплексы.

Keywords: heat and mass transfer, recycling, organic fertilizer, poultry farms.

В условиях экономических санкций в агропромышленном секторе экономики Российской федерация возникает необходимость импортозамещения продукции АПК. В связи с этим встаёт вопрос об увеличении количества крупных птицеводческих комплексов. Следует отметить, что в настоящее время в РФ функционируют более 600 фабрик с бесподстильным содержанием птицы, которые производят в сутки от 100 до 160 тон отходов, эвакуация и переработка которых является сложной нерешенной проблемой. Большая часть этих отходов не перерабатывается, а накапливается вблизи птицеводческих комплексов, образуя «пометные поля свалки», что оказывает негативное воздействие на санитарно-экологическое состояние окружающей среды. Согласно международной Конвенции об оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте (Финляндия, 1991 г.) птицефабриками относятся к экологически опасным видам хозяйственной деятельности ещё и потому, что использование непереработанного помета в качестве органического удобрения способствует заражению полей сорняками, патогенной микрофлорой, яйцами гельминтов и пестицидами, что приводит к истощению почвы сорняками, т.к. они выводят питательных веществ больше, чем содержится во вносимом птичьим помете.

В то же время известно, что птичий помет по химическому составу относится к числу наиболее эффективных высокоценных органических ресурсов для получения органических удобрений, а также белковых заменителей комбикормов для подкормки молодняка сельскохозяйственных животных. В нем содержатся все микро- и макроэлементы, необходимые для развития и роста растений и животных.

Для переработки помета необходима энергосберегающая технология, отвечающая следующим основным требованиям: экологическая безопасность производства, т.е. минимизация степени влияния технологии переработки на окружающую среду; отсутствие потребности использования поглощающих материалов и наполнителей (торф, солома, опилки, минералы, например, бишофит, окись кальция и т.д.); минимизация объемов застройки под технологическое оборудование; сравнительно низкая технологичность и окупаемость за счет реализации продукта переработки. Предлагаемая технология [1] позволяет существенно уменьшить себестоимость производимой продукции (мяса, молока, яиц, цыплят), практически полностью исключить экологический риск, где главным фактором выступает практически полная утилизация продуктов жизнедеятельности птицефабрик.

Проведенные эксперименты тепло- и массообмена при конвективной сушке отходов птицеводческих хозяйств позволили определить наиболее эффективную температуру сушильного агента. При этом следует ответить, что для полной стерилизации продуктов конечная температура в материале должна составлять не менее 200 °С в течение 5 минут. Построение кинетических кривых процесса сушки для этих технологических условий показало, что продолжительность тепловой обработки в конвективной сушилке при начальной влажности материала 75 ± 80% составляет от 40 до 50 минут.

При проведении поисковых оптимизационных расчётов массообменного процесса использован макроквантовый термодинамический метод [2], с помощью которого определялись массовые потоки компонентов многокомпонентной смеси на границах раздела фаз. Это оказалось точнее и проще по сравнению с современными методами, основанными на традиционных уравнениях массопереноса. Макроквантовый подход («Нелокальная версия термодинамики» [3]) ранее успешно применялся в ряде работ для определения плотности потока массы, что позволило, сохраняя известные процедуры, рассчитывать требуемую поверхность массообмена для заданной степени разделения применительно к таким процессам, как экстракция, сорбция и др. [4,5].

Проведенные исследования дают возможность разработать энергосберегающую технологию по производству органических продуктов для использования в

агропромышленном комплексе Российской Федерации. Она основана на современных способах обезвоживания исходной смеси, содержащей структурированную воду, входящую в состав органических молекул. Технология включает в себя пять основных стадий обезвоживания: гидромеханическое разделение, механическое разделение, высокотемпературная сушка, стерилизация и грануляция. На последнем этапе предусмотрена расфасовка продукции в тару. Данная разработка, при существенном снижении затрат на энергию, также позволяет вводить в конечный продукт компоненты, обогащенные минералами. Принципиально важным является то, что повышение производительности происходит за счет новых способов переработки отходов, которые сопровождаются существенным повышением экологической безопасности на основе новых прогрессивных технических решений и введения оперативного анализа выбросов с целью контроля безопасности производства и уровня загрязнения окружающей среды. Инновационной составляющей предлагаемой технологии является то, что способ направлен на повышение энергоэффективности, а комплекс - на расширение функциональных производственных возможностей.

Производственный цикл получения твердых и жидких органических удобрений, а также белковый заменитель комбикормов для подкормки молодняка сельскохозяйственных животных представлен на технологической блок-схеме (рис. 1).

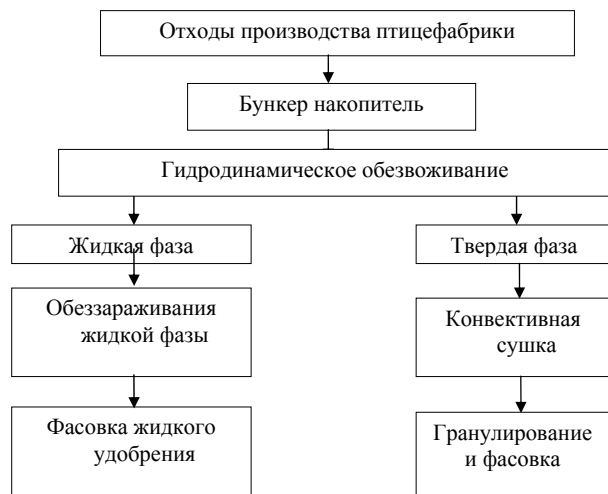


Рис. 1. Технологическая схема получения высокоэффективных кормов и удобрений из отходов птицеводческих комплексов

Таким образом, в работе показано, что отходы птицеводческих комплексов необходимо перерабатывать. Переработанный куриный помет может быть применен как ценное органическое удобрение или как белковый заменитель комбикормов для сельскохозяйственных животных. Наиболее эффективная переработка куриного помета достигается высокотемпературной конвективной сушкой.

Список литературы

1. Калошин Ю.А., Бузетти К.Д., Светлов Ю.В., Создание технологии получения высокоэффективных кормов и удобрений на базе использования сложных гетерогенных систем органического происхождения из отходов птицеводческих комплексов. – М.:

МГУТУ им. К.Г. Разумовского. – ЭНИ «Технологии 21-го века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности», 2014, № 8.

2. Светлов Ю.В. Макроквантовый термодинамический метод расчётного анализа термовлажностных процессов в пористых материалах. – М.: Инфра-М, 2015. – 313 с.

3. Майков В.П. Расширенная версия классической термодинамики - физика дискретного пространства-времени. - М.: МГУИЭ; 1997- 160 с.

4. Бобков С.П., Майков В.П. // Известия ВУЗов. Химия и химическая техника. 1992, т.35, вып. 7, с. 71-74.

5. Иванов Д.А., Волчек А.М. Определение поверхности массопередачи при экстракции из воды нефтепродуктов хлористым метилом. — Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2007, № 5, с. 11-13.

УДК 677.074

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА THE RESEARCH OF THE PROCESS OF DRYING OF CAPILLARY-POROUS MATERIAL

Марина С. Апалькова, Татьяна А. Новикова
Marina S. Apalkova, Tatiana A. Novikova

Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
(e-mail: oxtpaxt@yandex.ru)

Moscow state University of design and technology, Moscow, Russia

Аннотация: Определены температурные интервалы сушки промежуточного продукта получения никелевого катализатора - ППК, являющегося типичным капиллярно-пористым материалом, рациональные с точки зрения сохранения технологических свойств готового продукта, а также производственной и экологической безопасности.

Abstract: The temperature intervals of drying of the intermediate product producing of a nickel catalyst - PPC, which is the typical capillary-porous material, rational from the point of view of preserving the technological properties of the finished product, as well as industrial and environmental safety was defined.

Ключевые слова: капиллярно-пористый материал, сушка, режим сушки.

Keywords: capillary-porous material, drying, the drying mode.

Сушка промежуточного продукта получения никелевого катализатора (ППК), применяемого в химической технологии, в частности, для конверсии метана имеет важное значение в обеспечении требуемых свойств готового катализатора.

На основании анализа проведённых исследований свойств ППК как объекта сушки установлено, что промежуточный продукт получения никелевого катализатора - ППК является типичным капиллярно-пористым телом с микропорами и переходными порами, перенос влаги в котором происходит посредством совокупности механизмов массопереноса, характерных для капиллярно-пористых материалов (капиллярный перенос, пленочное течение, стесненная диффузия пара и др.) [1-4, 5, 6]. Структура образцов ППК исследовалась двумя методами - методом ртутной порометрии и сорбционным методом, который позволяет оценить особенности структурного строения объекта сушки [2] - с целью получения наиболее полного представления о структуре и сопоставления полученных характеристик. Как показали проведённые исследования ППК, суммарный объём его пор составляет 0,28 см³/г, в том числе объём пор с радиусом 100 Å составляет 0,03 см³/г, а остальной объём (0,25 см³/г) – это более тонкие поры. Важными характеристиками материала как объекта сушки, необходимыми при выборе спо-

соба и режима сушки, являются его сорбционные и структурные свойства [1-3]. Целью работы является выбор параметров процесса сушки данного объекта.

Как показал анализ полей влагосодержаний в объекте сушки, среднеинтегральные влагосодержания, полученные из кривых распределения, достаточно точно совпадают с их соответствующими значениями на кривых кинетики сушки, полученных в аналогичных условиях (рис.1).

Установлено, что в диапазоне влажности ($45\% \pm 1\%$) поля влагосодержаний для исследуемого материала не содержат точек перегиба, влажность на поверхности понижается постепенно, достигая равновесного значения через 2-7 часов от начала опыта (в зависимости от температуры сушки).

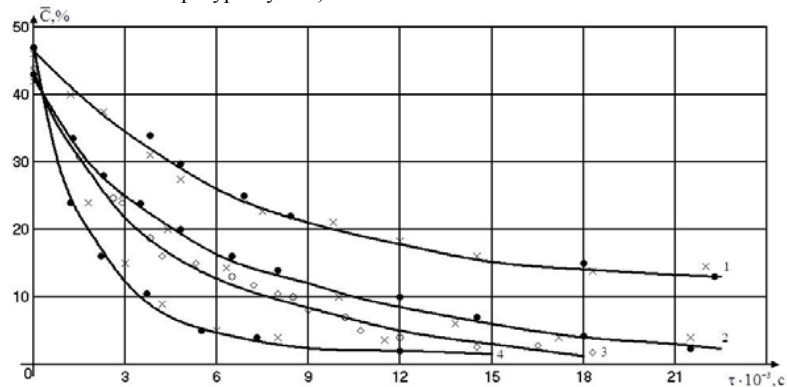


Рис. 1 Зависимость $\bar{C}=f(\tau)$ при сушке образцов ППК

1 – $t = 80^\circ\text{C}$; 2 – $t = 100^\circ\text{C}$;

3 – $t = 120^\circ\text{C}$; 4 – $t = 150^\circ\text{C}$;

●, ○ – из полей влагосодержаний

Характер распределения влагосодержаний вдоль определяющего размера образца сохраняется неизменным – как при температуре материала ниже 100°C , так и при его температуре выше 100°C , что указывает на единый для данного материала механизм массопереноса во всем диапазоне исследованных температур [1, 2].

Изучены перепады влагосодержаний между центральным и поверхностным сечениями исследуемых образцов в процессе сушки при различных температурах.

Показано, что влияние температуры на перепады влагосодержания в материале является неоднозначным. При $t^\circ\text{C}$ меньше 100°C её увеличение приводит к возрастанию градиента влажности на начальной стадии сушки, однако, после достижения максимума, спад градиента влажности при более высокой температуре сушки происходит быстрее и поэтому на заключительном этапе сушки при более высокой температуре имеют место меньшие значения градиентов влагосодержания в объекте сушки.

При температуре выше 100°C на начальной стадии сушки увеличение ее не приводит к существенному возрастанию градиентов, тогда как на заключительной стадии наблюдается картина, аналогичная той, которая имела место при развитии полей при температуре меньше 100°C : чем выше $t^\circ\text{C}$, тем меньше перепад влажности в теле.

Рассмотренная динамика развития полей влагосодержания в материале объясняется, в первую очередь, температурной и концентрационной зависимостью коэффициентов массопроводности и массоотдачи. Очевидно, что для исследуемого материала характерно значительное уменьшение коэффициента массопроводности с уменьшением влажности материала. Это обстоятельство при сушке приводит к тому, что с уменьше-

нием влажности задача массопереноса планомерно сдвигается в область внутренней диффузии [1, 3].

В связи с этим, на первом этапе сушки на кинетику процесса оказывает влияние как внешняя, так и внутренняя диффузия, поэтому увеличение $t^\circ\text{C}$ сушки оказывает воздействие на перепады влажности в материале, как через коэффициент массопроводности, так и через коэффициент массоотдачи. На заключительных этапах сушки роль внешнелатентного сопротивления мала, и в теле образуются градиенты, величина которых определяется при прочих равных условиях только коэффициентом массопроводности.

В этих условиях увеличение температуры, вызывая значительный прирост коэффициента массопроводности, приводит к закономерному уменьшению градиентов влагосодержания в материале [7, 8].

На основании проведенного анализа перепадов влажности в материале следует, что проведение процесса сушки ППК при $t = 120 \div 150^\circ\text{C}$ характеризуется меньшими значениями перепадов влагосодержаний, чем при $t \sim 100^\circ\text{C}$. Можно предположить, что меньшие перепады будут вызывать значительно меньшие механические напряжения в материале, а, следовательно, катализатор будет меньше растрескиваться и выделять пыль.

С точки зрения сохранения технологических свойств продукта и производственной безопасности (вследствие вредности катализаторной пыли) можно рекомендовать технологический режим сушки в температурном интервале $120 \div 150^\circ\text{C}$.

Список литературы

1. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. - Москва: Химия, 1980.-248 с.
2. Сажин, Б.С. Процессы сушки и промывки текстильных материалов/ Б.С. Сажин, М.К. Кошелева, М.Б. Сажина. Москва: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2013-301с.
3. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. -2-е изд., перераб. и доп.-ил. — М.: КолосС, 2010 — 478 с.
4. Лыков А.В. Теория сушки. — М.: Изд. «Энергия», 1968 — 472 с.
5. Кришпер О. Научные основы техники сушки. — М.: ИЛ, 1961 — 540 с.
6. Kosheleva M.K. and others. Kinetics calculation for temperature driving of polymer materials and multisectional driving of textile materials. 2-end European Congress off Chemical Engineering, Le Comm. Montpellier. France. 1999.
7. Рудобашта С.П., Кошелева М.К., Разумеев К.Э. Расчёт процесса сушки гранул поликапроамида. Изв. вузов. Химия и хим. технология, — 2013. Т. 56. Вып. 12. с. 110
8. Кошелева М.К., Шашких С.Н. Resource-saving technology for Saxony fabric. Вестник ТГТУ. 2013. Том 19. № 3, С.584-592.

**Секция 3. СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА
МАТЕРИАЛОВ В ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

УДК 66.011

**ПРОЦЕССЫ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ
В ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
THE PROCESSES OF DRYING AND HYGROTHERMAL PROCESSING
IN THE TEXTILE AND LIGHT INDUSTRY****М.Г. Балыхин, К.Э. Разумеев, М.К. Кошелева, А.А. Захарова
M.G. Balyhin, K.E. Razumeev, M.K. Kosheleva, A.A. Zakharova***Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
(e-mail: otxpaxt@yandex.ru)**Moscow state University of design and technology, Moscow, Russia*

Аннотация: Рассматриваются вопросы, связанные с созданием современных безопасных энерго- и ресурсосберегающих технологических процессов сушки и термовлажностной обработки в текстильной и легкой промышленности. Анализируются пути повышения эффективности процессов сушки и массообменных процессов термовлажностной обработки в химической технологии отделки текстильных материалов, в производстве кожи.

Abstract: The issues associated with the creation of modern safe energy- and resource-saving technological processes of drying and hygrothermal processing in the textile and light industry are discussed. The ways of increase the efficiency of drying processes and mass transfer processes of hygrothermal treatment in the chemical technology of textile finishing, in production of leather are analyzed.

Ключевые слова: сушка, термовлажностная обработка, текстильные материалы, кожа, эффективность, ресурсосбережение, энергосбережение.

Keywords: drying, hygrothermal processing, textile materials, leather, efficiency, resource saving, energy saving.

Без совершенствования технологии и оборудования для проведения процессов химической технологии отделки текстильных материалов, среди которых особое место занимают процессы сушки и термовлажностной обработки, невозможно решение задач снижения энерго- и ресурсоемкости в текстильной отрасли и обеспечение рационального и экологического ответственного использования энергии и сырьевых ресурсов. Именно эти процессы в значительной степени определяют качественные показатели готовых текстильных материалов, оказывают существенное влияние на конкурентоспособность готовой ткани и на её спрос. Важное значение эти процессы имеют и в технологии легкой промышленности, в частности, в производстве кожи. Научные основы процессов сушки материалов легкой промышленности было заложены академиком А.В. Лыковым в 30-е годы двадцатого века разработавшим теорию сушки. Академик А.В. Лыков в своих исследованиях много внимания уделял вопросам выбора оптимальных режимов сушки кожи, коллагена, тканей и других материалов. В его работах, например, предложена «Методика выбора оптимального режима сушки кожи (краснодубная юфта, подошвенная кожа)», которая не устарела в настоящее время [1, 2].

Химическая технология отделки текстильных материалов включает в себя сложный комплекс химических, массообменных, тепло-массообменных процессов. Многочисленные мокрые обработки, в том числе пропитки тканей химическими реагентами или красителями требуют последующей промывки и сушки [3, 4]. По затратам рабочего времени, размерам занимаемых площадей, количеству потребляемой энергии, воды и

химических реагентов именно эти процессы являются самыми энерго- и ресурсоемкими.

Пропитка во многом определяет энергозатраты на сушку, от этой технологической операции зависит миграция красителей и аппретов при её проведении, а значит качество готового материала. На промывку расходуется около 40% от потребляемой отделочным производством электроэнергии и до 20% - тепловой энергии, велик расход чистой промывной воды на проведение этого процесса, 80% которой идёт в стоки. Сушка на всех переходах осуществляется многократно и на неё расходуется до 60% тепловой энергии, потребляемой отделочным производством [3, 7, 8].

Такие высокие затраты энергии и материальных ресурсов говорят о несовершенстве отечественного оборудования для проведения этих процессов. Анализ оборудования зарубежных фирм (японских, австрийских, немецких) показывает, что в их оборудовании уже заложены современные энергоэффективные инновации и то, что оборудование создаётся под конкретного потребителя.

На основе анализа всех процессов химической технологии отделки, вплоть до получения готовой ткани, определены основные пути снижения энерго- и ресурсопотребления при проведении вышеуказанных процессов термовлажностной обработки -пропитки и промывки и процесса сушки.

В соответствии с намеченными путями в разные годы в ряде организаций (ИГЭУ, РосЗИТЛП, ОАО «РЕАТЕКС», ОАО «Новая Ивановская мануфактура», ЗАО «Московский шёлк» и др.) при координации и научном руководстве Текстильного института имени А.Н. Косыгина Московского государственного университета дизайна и технологии проводились исследования, направленные на разработку и реализацию комплекса научных основ и технических мероприятий по повышению эффективности и безопасности текстильных производств в современных условиях.

В данной комплексной работе решались три основные проблемы: повышение интенсивности наиболее энергоёмких технологических процессов текстильных производств, таких как сушка и термовлажностная обработка текстильных материалов; снижение энергозатрат и затрат материальных ресурсов; повышение производственной и экологической безопасности текстильного производства. Данный комплекс внедрённых в производство научно-технических разработок, удостоен Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники (Руководитель работы академик Б.С. Сажин). Работа включала создание и реализацию научных основ и технических мероприятий – технологий, конструкций, методик выбора и методов расчёта.

Методы интенсификации процесса выбираются для каждой из типовых задач массообмена [5,6]. В случае внешней задачи - это активные гидродинамические режимы (АГР). Важнейшим признаком АГР является повышение интенсивности процесса при увеличении относительной скорости движения фаз, степени турбулентности внешней фазы за счет тех или иных воздействий на систему. При наличии альтернативных методов активизации гидродинамических режимов предпочтение отдаётся более экономичному режиму.

При определении лимитирующего сопротивления массопередаче в технологическом процессе и выборе метода его преодоления с целью интенсификации, необходимо в каждом случае соотносить массообменную задачу с технологической, которая включает в себя как технические требования к конечному продукту, так и характеристику объекта обработки. Эта характеристика может быть получена в результате комплексного анализа материала как объекта технологической обработки [8].

Комплексные исследования свойств тканей из натуральных и синтетических волокон показали, что эти свойства существенно меняются при определённых значениях влажности волокон, которая соответствует границе перехода между связанной и свободной влагой, т.е. при гигроскопической влажности. При проведении процесса пропитки, предшествующего сушке, при увеличении, влажности выше гигроскопической,

в тканях появляется свободная влага, а это приводит к миграции водорастворимых реагентов к поверхности волокна в процессе сушки и к снижению качества готового материала.

Для снижения миграции аппретов и смол в процессе сушки и сокращения энергетических затрат первичного теплоносителя и электроэнергии, увеличения производительности технологического оборудования в рамках комплекса работ в Ивановском государственном энергетическом университете (под руководством к.т.н. В.П. Капустина) разработан новый метод регулирования остаточной влажности ткани при пропитке. Для реализации данного метода в ИГЭУ разработано перспективное устройство для пропитки тканей технологическими растворами в процессах заключительной отделки при минимальной остаточной влажности с целью уменьшения миграции и энергозатрат при последующей сушке. Отличительной особенностью разработанного оборудования является поверхностное нанесение плёнки раствора определённой толщины на полотно ткани с помощью гладких вращающихся валов. В этих работах использован оригинальный аэродинамический метод формирования плёнки жидкости на поверхности несущего вала и регулирования величины остаточной влажности ткани, что позволяет наносить на ткань любое количество раствора. Экономический эффект от внедрения оборудования для энергосберегающей пропитки достигается за счёт сокращения потребления пара на сушку – на 400-600 кг/час, отключения электронагревателей -120-250 кВт, повышения производительности отделочных линий в 1,5-2 раза..

Таблица 1. Основные типы промывных машин, вид обрабатываемых материалов и средств, обеспечивающих эффективность промывки

Промывные машины	Обрабатываемые материалы	Средства, обеспечивающие эффективность промывки
1	2	3
Роликовые	Ткани	Фильтрация промывного раствора сквозь ткань в зоне промывного ролика, противоток промывного раствора и материала, подача раствора через спрыски, вибрация ткани, промежуточный отжим
С сетчатым барабаном	Ткани, трикотажные и нетканые полотна	Фильтрация промывного раствора сквозь обрабатываемый материал под действием перепада давления
С периодическим чередованием пропитки и отжима материала	Ткани, замша, кирза	Сжатие материала в жале валов и подача свежего раствора
Релаксационные	Ткани, трикотажные полотна	Вибрация материала в промывном растворе, подача раствора через спрыски

Системные исследования кинетики процесса промывки хлопчатобумажных, шёлковых, шерстяных, смесовых тканей и трикотажных полотен после различных отделочных операций, таких как мерсеризация, крашение, печать и др. проведены в лабораторных, полупромышленных и промышленных условиях на кафедре ПАХТ и БЖД в Текстильном институте имени Косыгина Московского государственного университета дизайна и технологии. Ниже кратко изложены основные результаты комплексного исследования процесса промывки хлопчатобумажных тканей и трикотажных полотен от гид-

роксида натрия после мерсеризации, от красителей и печатной краски после крашения и печати.

Основными задачами в технологии промывки являются: определение числа промывных машин в промывной линии, а при заданном количестве машин, определение условий проведения процесса, перенос результатов лабораторных исследований по интенсификации промывки в промышленность, разработка рациональных режимов промывки.

В таблице 1 даны результаты анализа средств, обеспечивающих эффективность промывки на действующем промывном оборудовании – это фильтрация промывного раствора сквозь полотно ткани, противоток, использование спрысков и так далее.

В таблице 2 приведены возможные для этих способов промывки (с учётом типа технологической задачи) способы интенсификации.

Таблица 2. Возможные способы интенсификации процесса промывки

Вид взаимодействия полотна и жидкости	Характер взаимодействия	Промывные машины	Возможные виды интенсификации
1	2	3	4
Обтекание	Полотно со скоростью v_n движется относительно жидкости	Роликового типа с заправкой: вертикальной горизонтальной комбинированной	Барботаж, пульсация, ультразвуковые колебания, вибрация, омагничивание
Фильтрация	Жидкость фильтруется через полотно под действием перепада давления Δp	Роликового типа с заправкой: вертикальной горизонтальной комбинированной Барабанные с прокачиванием	Пульсация, ультразвуковые колебания, омагничивание
Вылеживание	Скорость полотна относительно жидкости близка к нулю	Роликового типа с заправкой: вертикальной, горизонтальной, комбинированной. Барабанные Транспортные	Вибрация, ультразвуковые колебания, омагничивание
Сопловая обработка	Жидкость под давлением из сопла подается перпендикулярно или под углом к поверхности полотна	Роликового типа с заправкой: вертикальной горизонтальной комбинированной Барабанные Транспортные	омагничивание

Для смешанной задачи массообмена, как правило, имеющей место при промывке плоских текстильных материалов от вышеперечисленных технологических загрязнений, особый интерес представляет воздействие ультразвукового поля, барботажная промывка, принудительная фильтрация промывного раствора сквозь полотно ткани [3].

Организация промышленных исследований процесса промывки при использовании большинства из перечисленных интенсифицирующих факторов - это достаточно сложная техническая задача. Естественно, что для реализации в промышленности, ещё до испытаний надо знать, что в конечном счёте может дать использование того или иного интенсифицирующего фактора при промывке и во что обойдётся реконструкция промывных линий. Практическая реализация этой задачи затрудняется тем, что кинетика процесса промывки, как правило, плохо моделируется на лабораторных установках.

Для переноса результатов лабораторных исследований на промышленные объекты было сделано допущение о том, что при проведении процесса в лабораторных и промышленных условиях при одинаковых значениях параметров, влияющих на процесс, соотношение коэффициентов массопередачи или продолжительности процесса, обеспечивающих определённую степень промывки при двух различных значениях интенсифицирующего фактора, должно оставаться одинаковым как для лабораторной, так и для промышленной установок. При этом значения коэффициентов массопередачи или продолжительности промывки для лабораторной и промышленной установок могут различаться в несколько раз.

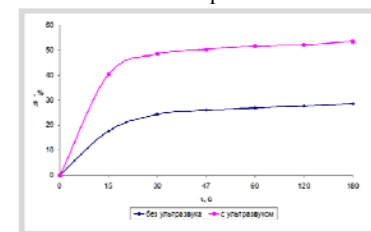
В качестве характеристики процесса промывки использовались продолжительности t_m , при которых степень промывки η_m для всей серии опытов, проводившихся с целью изучения влияния какого-либо фактора на процесс, имеет одно и то же значение (например, 50, 70, 80 или 90 %). Эта величина находится либо непосредственно по кинетическим кривым, либо на основе уравнения, описывающего семейство кинетических кривых [3]. Отношение продолжительностей процесса показывает, во сколько раз сокращается время промывки за счёт интенсификации. При прочих равных условиях это соотношение остаётся примерно одинаковым для лабораторной и промышленной установок. Применительно к различным типовым задачам промывки получены уравнения для определения времени, обеспечивающего определённую степень промывки [3].

Конечно, данный метод не лишён недостатков, так как предполагает, что различные факторы действуют на процесс независимо один от другого, т.е. считается, что взаимодействия между факторами не происходит. Кроме того, и это самое главное, в лабораторных условиях трудно воспроизвести в точности гидродинамику промышленных аппаратов, что, собственно, и порождает проблему масштабного перехода. При переносе результатов лабораторных исследований на промышленные аппараты происходит изменение, причем в худшую сторону, движущей силы процесса – вследствие возникновения больших поперечных (по ширине и высоте промывной ванны) неравномерностей параметров, существенных для процесса (скорости движения жидкой фазы, ее температуры, концентрации компонентов, существенных для процесса), а также из-за продольного перемешивания потока жидкой фазы. Эти изменения учитываются не в коэффициенте массопередачи, а в движущей силе процесса [5,6].

Для интенсификации процесса промывки после всех видов отделочных операций химической технологии текстильных материалов особый интерес представляет использование ультразвуковых колебаний [3].

Проведены системные исследования интенсификации процесса промывки на оборудовании непрерывного действия для хлопчатобумажных тканей при использовании ультразвука, как интенсифицирующего фактора, в ходе всего процесса. Кинетика промывки текстильных материалов представлена на рис.3. Выявлена зависимость степени интенсификации от параметров ультразвукового воздействия - частоты и амплитуды колебаний, удельной мощности, вводимой в систему, поверхностной плотности ткани, модуля промывной ванны, расстояния от источника ультразвука. Установлено, что при ультразвуковых воздействиях продолжительность промывки сокращается в среднем на 40-45%. Из таблицы 3 видно, что при этом существенно снижаются также затраты на электроэнергию, расход чистой воды, расход моющих средств, фактическая масса сброса сточной воды и её загрязнённость поверхностно-активными веществами.

Кинетика промывки хлопчатобумажной ткани после крашения



Кинетика промывки штапельного полотна после печати

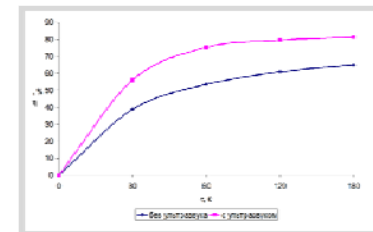


Рис. 3. Кинетика промывки текстильных материалов при интенсификации процесса ультразвуком

Таблица 3. Параметры процесса промывки на типовой линии хлопчатобумажной ткани после мерсеризации при действующем режиме и интенсифицированном ультразвуковом воздействии

Параметры Режим	Время про-мыв-ки, с	Производи-тельность одной промывной мшины, п.м./ч	Расход промывной воды на линии, м ³ /ч	Затраты на электри- ческую энергию, тыс. руб.	Расход мощного средства, кг/м ³	Факти-ческая масса годового сброса сточ- ной воды, тыс. м ³ /год	Факти-ческая масса годового сброса мощного средства, т/год
Действующий режим	80	390	28	250	0,2	55	11
Интенсифи- цированный ультразву- ковым воз- действи-ем режим	45	590	19	210	0,15	37	5,6

Совместно со специалистами НТЦ «Техносоник» определено возможное расположение ультразвуковых излучателей в промывных машинах, при этом излучатели рекомендуется устанавливать в машину, в которую подаётся ПАВ, и в последней машине в линии, где процесс промывки лимитируется массопроводностью. Затраты на комплект ультразвукового оборудования в данном случае составляют около 200 тыс. руб. и окупаются в течение года.

Процесс промывки плотных шерстяных тканей – с поверхностной плотностью до 760 г/м², как правило, проводится на жгутовых машинах периодического действия и является весьма продолжительным – от 3-х до 4-х часов. Интенсификация процесса сложна, поскольку при промывке удаляются три вида технологического загрязнения – жировые вещества, незафиксированные красители, ПАВ. Данные загрязнения удаляются с различной скоростью, при этом оказывается невозможным одновременное достижение трёх показателей качества промывки, оцениваемых по ГОСТ.

Возникает необходимость коррекции технологии многостадийной промывки, имеющей целью одновременное удовлетворение требованиям стандартов, определяю-

щих качество промывки, при сокращении продолжительности процесса и определении стадии данного периодического процесса, на которой целесообразно использовать выбранный интенсификатор, например, ультразвуковое воздействие.

Проведены масштабные исследования кинетики промывки шерстяных тканей с поверхностной плотностью от 250 до 760 г/м² (пальтовых чистошерстяных, тонкосуконных полusherстяных, тонкосуконных чистошерстяных драпов, шинельного сукна) в лабораторных и промышленных условиях на тонкосуконных фабриках.

Продолжительность промывки с 3-х часов в результате ультразвукового воздействия и применения смеси ПАВ сокращается для тканей с различной поверхностной плотностью, в среднем на 40 минут, при этом значительно снижается расход промывной воды и электроэнергии, а совместное использование смеси ПАВ и ультразвука позволяет устранить из рецептуры промывного раствора кальцинированную соду, не использовать для её нейтрализации уксусную кислоту, уменьшается не только количество сточных вод, но и их загрязнённость. Устранение кальцинированной соды предотвращает загрязнение трубопроводов и продлевает срок их службы, позволяет отказаться от использования выпарных установок.

В таблице 4 представлены данные, демонстрирующие улучшение производственной и экологической безопасности и снижение расхода химических реагентов при совершенствовании технологии промывки плотных шерстяных тканей.

Таблица 4. Показатели, характеризующие производственную и экологическую безопасность до и после совершенствования технологии промывки

Показатель	Промывка без ультразвука	Промывка с ультразвуком	Изменение (повышение) показателя, %
Время нахождения в рабочей зоне и в зоне воздействия опасных и вредных факторов, т, с	1807200	1048176	42
Концентрация кальцинированной соды в промывном растворе С, г/л	0,3	0	100
Концентрация кальцинированной соды в сточных водах С, г/л	0,3	0	100
Концентрация ПАВ в промывном растворе С, г/л	0,9	0,4	56
Концентрация ПАВ в сточных водах С, г/л	0,8	0,36	56
Количество кальцинированной соды в сточных водах, т/год	1,1	0	100
Количество ПАВ в сточных водах, т/год	4,4	2,46	56

В итоге проведенных исследований разработана отраслевая методика выбора рационального режима периодической промывки, позволяющая без проведения экспериментальных исследований кинетики промывки в промышленных условиях определять рациональное сочетание продолжительности отдельных стадий многостадийной жгутовой промывки различных шерстяных тканей. В основу методики положен анализ кинетики изменения концентрации в ткани трёх вышеуказанных видов технологического загрязнения - это гостированные показатели, определяющие во многом качество гото-

вого материала. Результаты исследований внедрены в производство, продана лицензия на использование защищённого патентом способа жидкостной обработки плотных шерстяных тканей.

Для сушки и термообработки тканей после пропитки растворами аппретов или нанесения печатной краски в Ивановском государственном энергетическом университете (под руководством к.т.н. В.П. Капустина) разработан высокоинтенсивный комбинированный радиационно-конвективный метод, при котором ткань обдувается нагретым воздухом и одновременно подвергается инфракрасному нагреву от панелей излучения, с расположенными на них трубчатыми кварцевыми излучателями. При параметрах процесса, представленных выше, время сушки сокращается почти в 2 раза при сохранении высокого качества окраски ткани и низкой себестоимости процесса сушки. Установлено, что данный метод следует применять на стадии предварительной сушки ткани с нанесённым печатным рисунком или пропитанной красителем, или смолой, при этом влажность ткани должна снижаться до значений, при которых прекращается их миграция, а окончательную сушку следует проводить на сушильных барабанах при высоком давлении греющего пара.

При этом нагрев ткани до температуры 180 °С происходит за 4-8 секунд, т.е. значительно быстрее, чем при контактном или конвективном методе. Расход на термообработку электроэнергии снижается в 2-2,5 раза – на 80 кВт час на одну установку. По результатам исследований разработаны камеры инфракрасного нагрева для термообработки тканей.

Вопросы экономии вторичных энергоресурсов – ВЭР, в том числе использования теплоты паровоздушных смесей – ПВС являются актуальными практически на каждой стадии отделочного производства текстильных предприятий, а не только в процессах сушки, промывки и пропитки. Анализ тепловых балансов текстильных предприятий показывает, что использование тепловых ВЭР на них может достигать 50 % и более от всей потребляемой технологической теплоты. При этом технологическая теплота, подводимая к сушильным, красильным и промывным установкам, практически вся переходит в теплоту сбросных растворов и теплоту паровоздушной смеси [7,8].

В таблице 5 приведена классификация источников низкопотенциальной сбросной теплоты, образующейся в теплотехнологическом оборудовании. Проведённый анализ результатов обследования текстильных предприятий показал, что теплота сбросных растворов и паровоздушной смеси может быть использована как для нагрева производственной воды, так и для нагрева воздуха в процессах сушки и приточной вентиляции, в различного рода теплообменных аппаратах. Температурный потенциал паровоздушной смеси составляет 65-110 °С, сбросных растворов – 30-95 °С, уходящих газов – до 400 °С. Эти данные свидетельствуют о том, что температурный потенциал этих сред достаточно велик и его желательно использовать. Однако, анализ тепловых отходов отделочных производств текстильных предприятий – в виде сбросных растворов и паровоздушной смеси – показывает, что в них содержится загрязнения на основе составляющих компонентов моющих и красильных средств, а также волокнистые материалы, что обуславливает определённые трудности при утилизации их теплоты. Тем не менее, примеры такого использования имеются [7,8].

Разработанные в Текстильном институте имени А.Н. Косыгина МГУДТ аппараты для утилизации тепловых отходов сбросных растворов и паровоздушных смесей, конструкции которых защищены патентами. Утилизаторы теплоты внедрены на текстильных предприятиях Москвы и Иванова, что позволило добиться значительной экономии ТЭР – более 70 тысяч Гкал [7].

Таблица 5. Классификация источников низкопотенциальной сбросной теплоты текстильных предприятий

№ группы	Теплотехнологическое оборудование	Виды низкопотенциальной сбросной теплоты
1	2	3
1	Установки с подогревом жидкостей и растворов «острым» паром (красильные барки, мойно-материальные машины, красильно-проходные аппараты и др.)	Сбросные растворы
2	Установки с подогревом жидкостей и растворов «глухим» паром (варочные котлы, автоклавы и другие установки, работающие в основном под давлением)	Сбросные растворы. Конденсат водяного пара
3	Горячевоздушные конвективные сушильные установки для волокна, пряжи, тканей	Паровоздушная смесь. Материал, выходящий из сушильных установок
4	Установки с обогревом материала путем контакта с нагретой металлической поверхностью (кондуктивные барабанные сушильные установки, гладильные машины, декатиры и др.)	Паровоздушная смесь. Конденсат водяного пара. Материал, выходящий из сушилок
5	Установки с гигротермической (влажно-тепловой) обработкой материала (зрельники, запарные камеры, термостабилизаторы и термофиксаторы)	Паровоздушная смесь. Конденсат водяного пара. Материал, выходящий из установок
6	Установки с экстремальными теплоносителями (термоизлучение, ТВЧ, ТСВЧ, акустические колебания и др.)	Паровоздушная смесь и др.
7	Установки со специальными топками (газовые сушильные машины и термоаппараты, опаливающие машины)	Горячие уходящие дымовые газы
8	Парогенераторы	Горячие уходящие дымовые газы

Одним из важнейших процессов в производстве изделий легкой промышленности является процесс сушки различных видов кожи, меха, тканей и т.д. При производстве кожи назначение процесса сушки – это приведение кож в воздушно-сухое состояние. К комплексу выполняемых операций относится: основная сушка - удаление влаги, оставшейся в коже после ее отжима и разводки; Подсушивание – удаление влаги, введенный в полуфабрикат во время предшествующих технологических операций (покрывное крашение). Основная сушка выполняется последовательно в несколько стадий на установках различных типов. На современных кожевенных заводах применяются конвективные, контактно-вакуумные, терморadiационные, сушилки с применением токов высокой частоты. На протяжении длительного времени на кафедре промышленной экологии и безопасности (кафедра химической технологии и промышленной экологии) МГУДТ проводились исследования по сушке кожи и меха в псевдоожиженном слое инертного материала. (конвективно-контактная сушка). Длительность сушки кожи и меха существенно сократилась, качество улучшилось, кожа стала более мягкой, уменьшилась её усадка.

Были проведены систематические работы по сушке вакуумным и сублимационным способом кожевенного полуфабриката, определены оптимальные условия процесса, изучено влияние параметров сублимационной сушки на структуру и свойства коже-

венного полуфабриката. Оптимальные условия для сублимационной сушки следующие: температура греющей поверхности - 20-25°C; сила прижатия – 29,4 кПа; остаточное давление в сублимационной камере – 13,3 кПа; продолжительность сушки – 14 минут. В вакуумных и сублимационных сушилках влага из камеры удаляется вакуумными насосами и конденсируется в конденсатор. К достоинствам вакуумных и сублимационных установок можно отнести минимальный расход тепла.

Однако конвективные сушилки являются более удобными в работе и обслуживании, но удельный расход теплоты в них значительно больше. Конвективные сушилки, обеспечивающие мягкие условия сушки, относятся к традиционным техническим средствам сушки кож для верха и низа обуви. Иногда их применяют в сочетании с контактно-вакуумными и сушилками терморadiационного действия. Сушилки для сушки кож, применяемые на отечественных заводах, были реконструированы, и в период после 2000г. заменены на импортные. Поставки нового оборудования осуществляли фирмы Италии, Чехии, Германии, Турции. Сушилка марки LTD относится к зонным сушилкам с шестью, на которых размещен «Картой» или в перегиб полуфабрикат.

Рамные сушилки (Италия) применяются для сушки кож хромового дубления. Кожа растягивается на рамах по площади для снижения их коробления. Вакуумные сушилки используются на кожевенных предприятиях с 70 годов XX в, т. к. имеют некоторые достоинства: высокая производительность, длительность сушки, 1 – 10 мин., отсутствие коробления кож и усадки их по площади. Вакуумные сушилки многоярусные. Остаточное давление – 3-5 кПа. Плиты обогреваются горячей водой, а пары удаляемой влаги конденсируются в конденсаторе. Вакуум создается водокольцевыми насосами. Терморadiационные сушилки используются для сушки окрашенных покрытий кож. Для нагрева материала используется инфракрасное излучение, которое проникает на глубину 1-3 мм и разогревает материал. Влага удаляется с воздухом, который подается в сушилку. В сушилках «Кадромат» фирмы «Руанет» (Франция) источниками инфракрасного излучения являются зеркальные лампы с длиной волны излучения 1 – 1,4 мкм и газовые панели (ТЭНы). Сушилки с использованием током сверхвысоких частот используются только для подсушивания кож (после основной сушки), до относительной влажности 12-14%. Эти сушилки выпускаются фирмой «Картильяно». Для удаления влаги в сушильную камеру подается воздух. Терморadiационные и ТВЧ сушилки не нашли широкого применения на отечественных предприятиях.

Таблица 6. Расход теплоты на сушильно-увлажнительные операции

материал операция	Полукожник	Бычина тяжелая	Яловка тяжелая	Яловка средняя
Подвялка	54020	36941	46222	70720
Сушка	89900	59017	74755	114260
Увлажнение	447	308	390	595
Крашение	324	321	321	324
Подсушка	8763	8763	8763	8763
Аппретирование с подсушкой	11430	11430	11430	11430
Крашение с подсушкой	911	911	911	911
Аппретирование с подсушкой	8400	8400	8400	8400
Подсушка	8430	8430	8430	8430
Итого с учетом потерь, кДж	280427	212621	248278	337882

Проведен расчет расхода теплоты на сушильно-увлажнительные процессы и отделочные операции. При расчете был определен расход теплоты на нагрев воды, расходуемой на прогрев грунтовой смеси до кипения и последующее удаление влаги в процессе сушки грунта. Аналогичная методика применялась для определения расхода теплоты на процесс аппретирования. Расход теплоты на сушильно-увлажнительные операции на 1000 м² кожи в производстве, приведены в табл. 6.

Аналогичные расчеты проведены для определения расходов теплоты на сушильно-увлажнительные операции в производстве кож для верха обуви: полукожник – 606480 кДж/1000 дм², бычок – 43638 кДж/1000 дм², яловка средняя – 716730 кДж/1000 дм².

Расход теплоты на сушильно-увлажнительные операции составляет 53-62% от общих расходов теплоты на технологические операции, поэтому при производстве кожи экономия тепловой энергии весьма желательна. Для развития кожевенной и меховой промышленности необходимо развивать отечественную сырьевую базу, внедрять современные технологии и оборудование для процессов обработки кож, внедрять плазменные технологии для улучшения качества кож, использовать все отходы кожевенной и меховой промышленности для получения различных материалов, а также для получения биогаза и удобрений.

Таким образом, для совершенствования процессов сушки и термовлажностной обработки материалов в текстильной и легкой промышленности — снижения водо- и энергопотребления, а также расхода химических реагентов при их проведении необходимо использовать следующие мероприятия:

- на основе анализа всех предшествующих и последующих процессов вплоть до получения готового материала продолжить разработку ресурсосберегающих технологических режимов термовлажностной обработки на действующем оборудовании.

- новое и модернизируемое оборудование для обработки хлопчатобумажных, льняных, шерстяных и других текстильных материалов должно оснащаться усиленными отжимными устройствами для снижения их влагосодержания перед сушкой.

- отметить необходимость проведения следующих исследований и разработок в области сушки и термовлажностной обработки нетканых материалов-одного из наиболее перспективных и эффективно развивающихся производств. Продолжить работы, направленные на снижение миграции связующего при сушке нетканых материалов, полученных импрегнированием волокнистых холстов дисперсиями полимеров (латексами) за счёт повышения степени отжима полотна перед сушкой, использовать для пропитки вспененные латексные связующие, применять термочувствительные латексы, подвергая перед сушкой пропитанный ими холст тепловому удару, использовать комбинированные методы, включая терморadiационную сушку, сушку токами высокой частоты.

- отметить необходимость продолжения работ по повышению эффективности термовлажностных процессов отделочного производства текстильной промышленности, таких как непрерывная и периодическая промывка, пропитка. При этом особое внимание сосредоточить на разработке математического описания процессов, позволяющего определить оптимальные параметры работы машин для пропитки и промывки при использовании в них различных интенсификаторов.

- отметить актуальность проводимых в МГУДТ, работ, направленных на повышение эффективности одного из самых распространённых и энергоёмких процессов отделочного производства текстильной промышленности – промывки тканей (термовлажностной обработки), реализацию которого расходуется значительное количество технологической воды (до 5 м³/час на одну промывную машину), до 40 % электроэнергии и до 15-20% тепловой энергии, потребляемой отделочными фабриками. Одним из перспективных путей повышения эффективности процесса промывки плоских текстильных материалов является его интенсификация при наложении физических полей, в частности ультразвуковом воздействии. Следует отметить, что при данном способе интенсификации одновременно решаются вопросы повышения экологической и производственной

безопасности, ресурсосбережения (сокращается продолжительность процесса, расход промывной воды и сточных вод, снижается концентрация химических реагентов, как в технологическом растворе, так и в сточных водах). Для многостадийных продолжительных процессов периодической промывки плотных шерстяных тканей важное значение имеет выбор стадии процесса, на которой может быть использован интенсификатор.

- применять плюсовки нового типа с воздушной раклёй для аппретирования тканей, а также нанесения различных покрытий на материал (по типу плюсовки ИвНИТИ), что приводит к снижению остаточной влажности материала до 30-40% и сокращению расхода пара на сушку в 2,5 раза.

- использовать рекуперативные теплоутилизаторы для паровоздушных выбросов из сушильных машин и зрельников, что позволяет возвращать в технологический цикл до 70% теряемой теплоты.

- применять оборудование и технологии с использованием инфракрасного нагрева для высокоскоростной термической обработки тканей в процессах крашения и заключительной отделки материалов.

Список литературы

1. Лыков А.В. Теория сушки. М., Энергия, 1968, 470 с.
2. Лыков А.В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения. М.: Гослегпром, 1938, 431 с.
3. Процессы сушки и промывки текстильных материалов. Б.С. Сажин, М.К. Кошелева, М.Б. Сажина, Москва: МГУДТ, 2013 – 301 с.
4. Кричевский Г.Е. Химическая технология текстильных материалов: учеб. для вузов. М.: 2001. 3 т. 298 с.
5. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. - 2-е изд., перераб. и доп. учебн. и учеб. пособие для вузов. -М.: Колос С, 2010.-478 с.
6. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. -М.: Химия, 1980.
7. Сажин Б.С., Тюрин М.П. Основные процессы и аппараты энергосберегающих технологий текстильных и химических предприятий. МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2008
8. Сажин В.Б., Сажин Б.С. Научные основы стратегии выбора эффективного сушильного оборудования/под общей редакцией профессора Б.С. Сажина. –М.: Химия, 2013. 544 с.

УДК 677.074

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ НЕТКАНЫХ
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
THE FEATURES OF THE DRYING PROCESS
OF NONWOVEN TEXTILE MATERIALS**

М.К. Кошелева*, С.П. Рудобашта
M.K. Kosheleva*, S.P. Rudobashta****

* *Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
(e-mail: otxpaxt@yandex.ru)*

**Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow*

** *Российский государственный аграрный университет – МСХА имени
К.А. Тимирязева, Россия, Москва*

*** Russian state agrarian University – MAA after K. A. Timiryazev, Russia, Moscow*

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности сушки нетканых клеёных материалов, приведены результаты экспериментального исследования свойств материала как объекта сушки и кинетики его конвективной сушки в лабораторных условиях.

Abstract: Some features of the drying process of nonwoven laminated materials were researched, the results of experimental study of the properties of the material as an object of drying and the kinetics of its convective drying in laboratory conditions were shown.

Ключевые слова: нетканые клеёные материалы, объект сушки, кинетика сушки.
Keywords: nonwoven laminated materials, the drying object, the drying kinetics.

Увеличение объемов выпуска нетканых клеёных материалов - НКМ различного назначения связано с повышением скоростей всех технологических процессов, при этом лимитирующим часто является процесс сушки. Кроме того, процесс сушки во многом определяет качество готового материала и энергетические затраты на его производство [15].

Основой НКМ, как и тканей, являются различные текстильные волокна, во многом определяющие их свойства. При изготовлении волокнистой основы НКМ используются натуральные, искусственные и синтетические волокна. Широкое применение химических волокон является одним из важных направлений в развитии ассортимента нетканых материалов.

Современный ассортимент нетканых материалов должен максимально приближаться по своим свойствам и внешнему виду к продукции из натуральных волокон. Как и ткани НКМ относятся к длинномерным плоским материалам, в которых волокна связаны между собой тем или иным способом и образуют двухмерную гибкую структуру. Это позволяет использовать для их сушки однотипное оборудование (конвективные, контактные, радиационные сушилки). Наиболее распространенными видами современного оборудования для сушки НКМ являются комбинированные сушилки, использующие в своем составе радиационные, контактные и конвективные сушильные установки в различных сочетаниях и последовательности. Однако НКМ по сравнению с тканями имеют свою специфику, прежде всего, за счет наличия в них связующего, структурообразование которого в процессе сушки приводит к снижению скорости процесса [15, 13, 7, 9-11].

В производстве нетканых материалов в качестве основы связующих веществ применяются эластомеры (каучуковые связующие) и пластические массы (термопластичные и термореактивные связующие). Виды связующих различны: дисперсии полимеров, порошки, легкоплавкие волокна, пленки и др. [15, 11].

При получении нетканых материалов методом пропитки всегда существует проблема миграции связующего в процессе сушки, которая зависит от применяемого спо-

соба сушки, в частности, известно, что значительная миграция связующего происходит при конвективной сушке [15, 9, 10].

Более равномерного распределения связующего можно добиться при высушивании с помощью инфракрасных лучей (ИК-лучей) [7, 9-11]. Терморadiационная сушка по сравнению с конвективной позволяет вести процесс с большей скоростью и со значительно меньшей миграцией связующего.

Исследования показывают, что равномерное распределение связующего по толщине нетканого полотна может быть получено при применении высокочастотной сушки. Однако такая сушка имеет преимущества для объемных материалов и не эффективна для плоских НКМ. Сушка токами высокой частоты (ТВЧ) характеризуется очень высокой интенсивностью удаления влаги. При этом благодаря уменьшению времени процесса лучше сохраняются свойства волокон. Кроме того, сушка ТВЧ позволяет регулировать температуру внутри материала независимо от температуры его поверхности, что дает возможность более интенсивно удалять влагу из середины материала и избежать миграции связующего [15].

Несмотря на значительные технические преимущества сушки ТВЧ по сравнению с обычными видами сушки, применение ее в текстильной промышленности ограничено высокими капитальными затратами и большими эксплуатационными расходами.

Миграции связующего можно избежать независимо от способа сушки при применении сенсibilизированных связующих [15, 6]. На кафедре технологии нетканых материалов МГТУ имени А.Н. Косыгина проведены работы по созданию и применению термосенсibilных (термочувствительных) латексов на технологических линиях в случае применения таких связующих, до поступления в конвективную сушилку пропитанный холст проходит камеру теплового удара ($t = 160^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1-2$ мин.). Латекс спонтанно коагулирует и в сушилку поступает с меньшим содержанием влаги и, соответственно, миграция связующего снижается [15, 6].

Такое решение проблемы миграции связующего позволяет увеличить производительность оборудования за счет повышения рабочих температур при сушке нетканых полотен.

Нетканые материалы, полученные импрегнированием волокнистых холстов дисперсиями полимеров (латексами), проходят стадии сушки и термообработки. Термообработку нетканого материала после сушки проводят при более высоких температурах ($150-170^{\circ}\text{C}$), чем сушку с целью вулканизации (поликонденсации) полимерных связующих и повышения физико-механических свойств нетканого материала. Оборудование для термообработки нетканых материалов не имеет принципиальных отличий от сушильного, и выбирается в зависимости от вида используемого связующего. Обычно машины имеют две температурные зоны: для ускорения прогрева материала до заданной температуры и для выдерживания его при этой температуре. В первой зоне нагревание производится горячим воздухом или инфракрасными излучателями, во второй - горячим воздухом [15].

Для исследования выбраны плоские нетканые клееные материалы, получаемые пропиткой волокнистого холста из смеси лавсановых и вискозных волокон водными дисперсиями акриловых сополимеров. Проведены исследования свойств НКМ как объекта сушки, которые базировались на экспериментальных изотермах сорбции-десорбции паров воды, полученных на термостатируемой вакуумной сорбционной установке с пружинными весами Мак-Бена-Бакра [1-5].

Обработка экспериментальных изотерм сорбции-десорбции даёт возможность оценить не только геометрические размеры реальных пор в материале, но и особенности строения материала с учётом видов связи распределяемого компонента с ним, влияние изменения пористой структуры материала на механизм массопередачи [1, 8, 12].

Для различных образцов НКМ были рассчитаны [1-3] основные сорбционно-структурные характеристики, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Основные сорбционно-структурные характеристики НКМ

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

Полученные характеристики НКМ (размер и объем пор) являются эффективными характеристиками диффузионного сопротивления протеканию процесса массопередачи, которое оказывает пористая структура материала при сушке или других процессах термовлажностной обработки (промывке, пропитке) [1, 8, 12, 14].

Проведено исследование процесса конвективной сушки нетканых клееных материалов в лабораторных условиях, контактной и конвективной сушки в промышленных условиях, которые требуют дальнейшего анализа и обобщения.

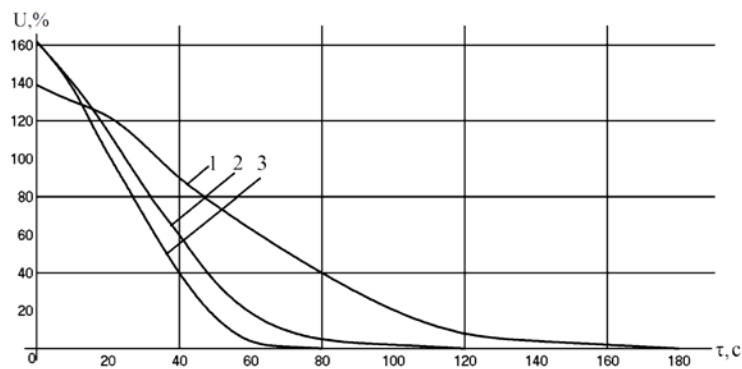


Рис. 1. Кинетика конвективной сушки НКМ методом продольного обдува при разных скоростях воздуха.

В лабораторных условиях проведены исследования влияния режима конвективной сушки методом двухстороннего продольного обдува, состава волокнистого холста и типа используемого связующего на кинетику процесса сушки НКМ.

Изучение процесса сушки проводилось на установке Тамбовского института химического машиностроения в рамках научного договора между МГТУ имени А.Н. Косыгина (МГУДТ), Ивановского НИЭКМИ и ТИХМ.

Исследование кинетики конвективной сушки в зависимости от режимных параметров проводилось для НКМ на основе волокнистого холста (вискоза-30%, лавсан-70%),

пропитанного связующим на основе акронала. Установлено, что увеличение температуры сушильного агента со 140 до 190°C при постоянной скорости обдува воздухом - 10 м/с, сокращает время сушки на 35 с.

Изменение скорости воздуха от 5 м/с (кривая 1) до 15 м/с (кривая 3), (кривая 2 соответствует скорости обдува 10 м/с) при одинаковой температуре равной 165°C, увеличивает интенсивность сушки приблизительно в 2,5 раза (рис. 1).

Время сушки НКМ, полученных пропиткой акриловым связующим, различных по составу волокнистых холстов при температуре 165°C и скорости воздуха 10 м/с, уменьшается с увеличением содержания вискозы в его составе (рис.2). Такую закономерность можно вероятно объяснить тем, что присутствие вязких волокон способствует образованию более плотной структуры нетканого материала, с уменьшением его толщины и увеличением теплопроводности.

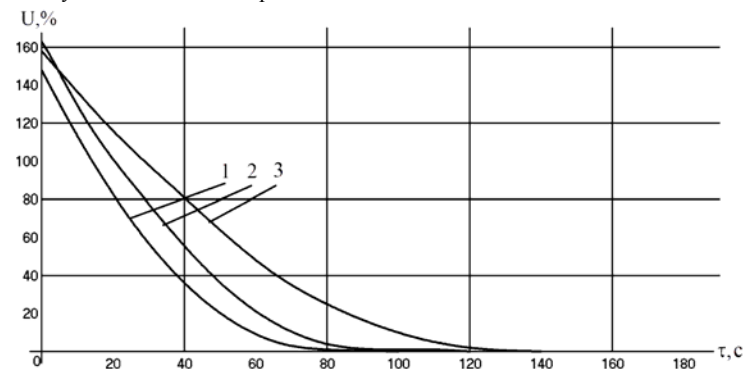


Рис. 2. Кинетика конвективной сушки НКМ методом продольного обдува при разных составах волокнистого холста.

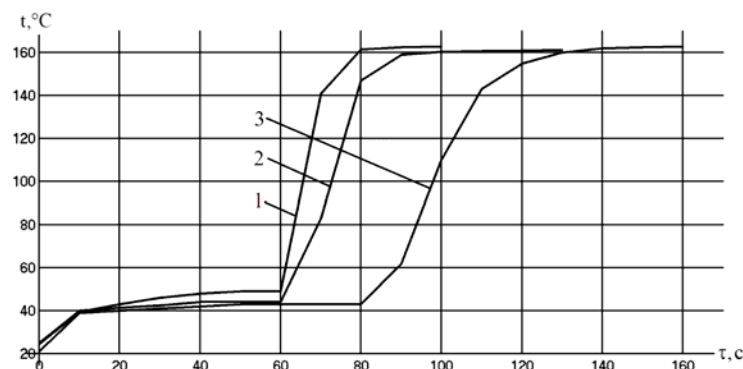


Рис. 3. Кинетика нагрева НКМ при разных составах волокнистого холста.

Кривая 1 на рис.2 соответствует волокнистому холсту из 100 % вискозы, кривая 2 - холсту из 30 % вискозы и 70 % лавсана, а кривая 3 - холсту из 100 % лавсана.

Сравнение экспериментальных кинетических кривых сушки, показало, что наименьшее влияние из всех факторов на продолжительность сушки НКМ оказывает вид пропиточной композиции.

Более полную картину протекания процесса сушки можно получить по кривым нагрева (рис. 3), которые позволяют точнее определить время окончания процесса, выделить на кинетической кривой сушки периоды постоянной и падающей скорости.

Кривые нагрева НКМ получены при температуре 165°C и скорости воздуха 10 м/с и соответствуют волокнистым холстам, пропитанным акриловым связующим, кривая 1-вискоза 100%, кривая 2-вискоза 30 % и лавсан 70 %, кривая 3-лавсан 100 %.

Следует отметить, что производство нетканых текстильных материалов широкого назначения является одним из наиболее перспективных и эффективно развивающихся производств. В области сушки и термовлажностной обработки нетканых материалов необходимо продолжить работы, направленные на снижение миграции связующего при сушке нетканых материалов, полученных импрегнированием волокнистых холстов дисперсиями полимеров (латексами) за счёт повышения степени отжима полотна перед сушкой, использовать для пропитки вспененные латексные связующие, применять термочувствительные латексы, подвергая перед сушкой пропитанный ими холст тепловому удару, использовать комбинированные методы, включая терморadiационную сушку, сушку токами высокой частоты.

Список литературы

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 клеевых материалов // Текстильная промышленность, № 1, 1992, С.30.
3. Анализ сорбционных свойств текстильных материалов как объектов сушки / Сажин Б.С., Кошелева М. К., Литвинова Т. А., Олегла И. // II сборник научно-исследовательских работ МТИ-ЛМТИ. -М.-Либерец, 1983. -С. 377-382.
4. Сушка нетканых текстильных материалов и пути повышения ее эффективности. Обзорная информация ЦНИИТЭИлегпром / Кошелева М. К., Малышева М. Ф., Реутский В. А., Сажин Б. С. -М., 1990. -40с.
5. Реутский В.А., Кошелева М.К., Власов А.Е. Исследование процессов сушки и термообработки нетканых клеевых материалов // Текстильная промышленность, № 3, 1992, С.376.
6. Горчакова КМ., Малоюкова Е.Б., Грицкова И.А. Влияние термосенсибилизирующих добавок на агрегативную устойчивость акриловых связующих для нетканых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. -1989. -N5. -С. 42-46.
7. Малышева М. Ф. Определение рациональных режимов сушки нетканых клеевых материалов с использованием термоизлучения: Дис. канд. т.н. -М.: МТИ, 1984. -237с.
8. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой.-М.: Химия, 1980. - 248с.
9. Данилов О. Л. Экспериментальное исследование процесса сушки нетканых фильтрующих материалов: Дис. канд. т. н. -М.: МЭИ, 1966.-196с.
10. Леончик Б. И., Данилов О. Л., Устинова Е. Т. Выбор методов сушки клеевых нетканых материалов // Текстильная промышленность.-1965. -N 1. -С. 55-59.
11. Тихомиров В. Б., Кан Г. Э., Самойлова Л. В. Оптимизация процессов пропитки и сушки с целью улучшения распределения связующего в нетканых материалах // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. -1970. -N 1. -С. 84.
12. Лыков А. В. Теория сушки. -М.: Энергия, 1968. -472с.
13. Кузьмин В. И. Исследование процесса сушки клеевых нетканых текстильных материалов конвективным, радиационным и радиационно-конвективным способом: Дис. канд. т. н. -Л., ЛИТ ЛП, 1967. -134с.
14. Коновалов В. И., Коваль А. М. Пропиточно-сушильные и клеепромазочное оборудование. -М.: Химия, 1989. -224с.

15. Бершев Е. Н., Горчакова В. М., Курицына В. В., Овчинникова С. А. Физико-химические и комбинированные способы производства нетканых материалов. Учебник для вузов. - М.: Легпромбытиздат, 1993. - 352 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШКИ ВОЙЛОКА STUDY OF KINETICS OF FILTRATION DRYING OF THE FELT

Н.М. Шарпар, Л.И. Жмакин
N.M. Sharpar, L.I. Zhmakin

Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
(e-mail: NMSharpar@gmail.com, LI_zhmakin@mail.ru).
Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow

Аннотация: Изложены результаты экспериментального исследования кинетики сушки войлока, активно используемого в качестве эффективной тепловой и звуковой изоляции в промышленном и гражданском строительстве, для теплоизоляции участков технологических трубопроводов и различного оборудования.

Summary: There are results of the experimental study of the kinetics of felt drying, used as heat and sound insulator in industrial and civil building, for heatproof of the areas of the technological pipelines and various equipment

Ключевые слова: капиллярно-пористые материалы; сушка; фильтрация; массообмен.
Keywords: capillary-porous materials; drying; filtration; mass transfer.

Процессы сушки войлочных полотен, связанные с удалением из них влаги, широко распространены в технологии изготовления этих материалов. Они представляют интерес и при эксплуатации войлочных изделий различного назначения. В промышленности широко используют три способа сушки: контактный, предусматривающий соприкосновение с нагретой поверхностью; конвективный, осуществляемый за счет обдува нагретым теплоносителем, и радиационный, использующий энергию теплового излучения. Иногда эти способы сушки сочетаются. Известна также фильтрационная сушка [1], при которой влага удаляется из материала за счет фильтрации через него подогретого воздуха. Такая сушка проводится в сетчато-барабанных установках, где установлены несколько вращающихся перфорированных барабанов, внутренние полости которых сообщаются с отсасывающим вентилятором. Фильтрационная сушка войлока изучалась на опытной установке [2].

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. Образец войлока после его смачивания в сосуде с водой и взвешивания закреплялся в рабочем участке установки. Включался вытяжной вентилятор, который обеспечивал фильтрацию через образец либо холодного, либо предварительно нагретого в электрокалорифере воздуха. Перепад давления воздуха на образце, а, следовательно, и скорость фильтрации, регулировались изменением числа оборотов двигателя вентилятора. Через определенные моменты времени образец вынимался и взвешивался на аналитических весах. По убыли массы содержащейся в войлоке влаги определялось влагосодержание образца W и строились кривые сушки, т.е. зависимости $W=f(\tau)$.

На рис. 1 и 2 представлены опытные данные по кинетике сушки войлока, полученные при скорости фильтрации воздуха равной 0,03 м/с.

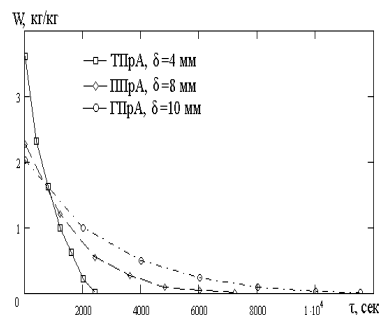


Рис. 1. Кривые сушки образцов войлока фильтрацией воздуха с температурой 58°C

Обработка кривых сушки заключалась в расчете скоростей сушки, которые характеризуют интенсивность процессов массообмена в пористом материале. Скорость сушки определяли численным дифференцированием зависимостей влагосодержания от времени

$$R = - \frac{dW}{d\tau}$$

Результаты расчетов скорости фильтрационной сушки войлока показаны на рис. 3 и 4.

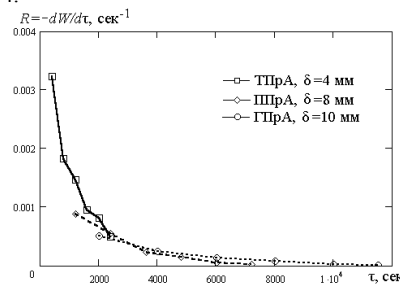


Рис. 3. Скорость сушки образцов войлока фильтрацией воздуха с температурой 58°C

По кривым $W=f(\tau)$ находили также необходимую длительность процесса сушки войлока, который должен заканчиваться по достижении материалом кондиционного влагосодержания W_k . Его величина представляет собой равновесное влагосодержание войлока при комнатных условиях ($t=23^\circ\text{C}$, $\phi=40\%$).

Выводы

По материалам экспериментальных исследований кинетики фильтрационной сушки войлока можно отметить следующее.

1) При фильтрации воздуха через войлочные образцы их влагосодержание уменьшается во времени нелинейно. Скорость сушки, а, следовательно, и интенсивность массообмена в слое войлока непрерывно падает, т.е. на кривых сушки невозможно выделить стадию постоянной скорости этого процесса.

2) В начале сушки, когда воздух движется через полностью смоченный образец, из него удаляется капиллярно связанная влага. Скорость сушки при этом значительно выше, т.к. воздушный поток выдавливает из капилляров влагу на поверхность материала, где она интенсивно испаряется. Парциальное давление водяных паров на поверхности материала при этом равно давлению насыщения.

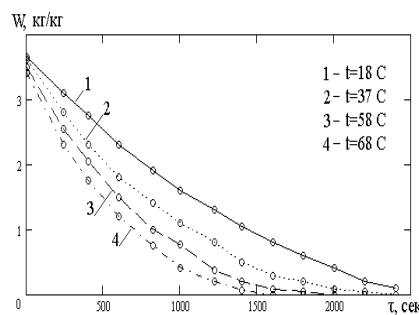


Рис. 2. Кривые сушки войлока ТПрА при различных температурах воздуха

4) На рис. 2 - 4 видно, что максимальные скорости, а, значит, минимальные времена сушки фильтрацией наблюдаются у войлока ТПрА. У других марок войлоков времена сушки до кондиционного влагосодержания гораздо выше. Для образцов тонкошерстного войлока ТПрА была исследована зависимость времени и скорости сушки от температуры фильтруемого через него воздуха. Полученные результаты вполне очевидны, т.е. с увеличением температуры скорость сушки растет (см. рис. 4). Все эти опытные данные относятся к одной и той же скорости фильтрации воздуха 0,03 м/с.

Список литературы

1. Н.М. Шарпар, Л.И. Жмакин. Эффективность теплообмена при вынужденной конвекции теплоносителя (воздух) через пористые слои капиллярно-пористого текстильного материала. Хим. волокна, 2014. №2.-С.56-59
2. Н.М. Шарпар, Л.И. Жмакин. Исследование кинетики сушки нетканого материал в условиях вынужденной конвекции. Известия вузов. «Технология текстильной промышленности». Иваново, 2013. №5, С.113-115.

УДК 677.016.253

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ СМЕСОВЫХ ТКАНЕЙ

THE RESEARCH AND INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF WET THERMAL TREATMENT OF BLENDED FABRICS

О.Р. Дорняк*, И.В. Фокина**, М.С. Апалькова**
O.R. Dorniyak*, I.V. Fokina**, M.S. Apalkova**

* Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова
(ordorniyak@mail.ru)

* Voronezh state forest technical University named after G. F. Morozov
**Московский государственный университет дизайна и технологии
(e-mail: oxtpraxat@yandex.ru)

**Moscow state University of design and technology, Moscow, Russia

Аннотация: В работе представлены результаты исследований, связанных с повышением эффективности массообменного процесса промывки смесовых тканей при его интенсификации воздействием на промывной раствор физических полей.

Abstract: The results of research related to increasing the efficiency of mass transfer of the washing of blended fabrics with its intensification effect on the washing liquor of the physical fields were shown.

Ключевые слова: смесовые ткани, промывка, интенсификация, физические поля.
Keywords: blended fabrics, washing, intensification, physical fields.

Представляемая работа связана с совершенствованием производственной и экологической безопасности в отделочном производстве текстильных предприятий и сни-

жением техногенного воздействия на окружающую среду. Возможность повышения производственной и экологической безопасности при совершенствовании массообменных процессов отделочного производства текстильного предприятия изучалась во многих работах. Однако процессы промывки после крашения и печати изучены недостаточно, а они вносят значительный негативный вклад в производственную и экологическую безопасность.

Целью работы является исследование технологических процессов промывки текстильных материалов после крашения и печати для совершенствования их производственной и экологической безопасности при обоснованном выборе и использовании интенсифицирующих физических полей.

Установлено, что задача массообмена при промывке смесовой ткани, состоящей из вискозных и полиэфирных волокон, смешанная и процесс может быть интенсифицирован использованием физических полей.

В лабораторных условиях проведены исследования кинетики процесса промывки смесовой ткани после крашения и печати. Характеристика ультразвуковой установки, использованной в лабораторных экспериментах, представлена в таблице 1. Установка позволяет использовать ванну с ультразвуковыми излучателями, встроенными в ее днище.

Таблица 1. Характеристика ультразвукового устройства «Реут 001»

Показатель	Значение
Питание устройства, В	220
Потребляемая мощность, Вт	70-100
Рабочая частота, кГц	35
Время непрерывной работы, ч	10

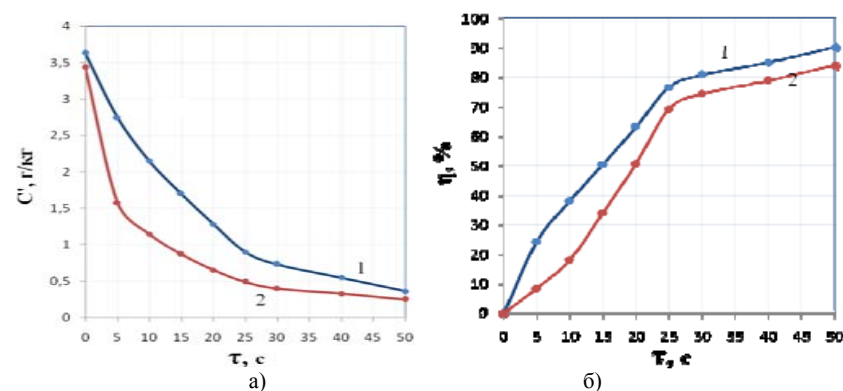


Рис. 1 Кинетика промывки после печати смесовой (вискозно-лавсановой) ткани в лабораторных условиях при температуре 60°C

а) изменение концентрации незафиксированной печатной краски

б) изменение степени промывки

1 – без ультразвука; 2 – с ультразвуком

При проведении экспериментальных исследований использовался технологический режим, предполагающий применение смеси ПАВ в промывном растворе.

На рис. 1 представлены кривые кинетики промывки смесовой ткани после печати с ультразвуковым воздействием на промывной раствор и без него, кроме того на этом же рисунке показано – изменение степени промывки.

Эти результаты показывают, что время промывки сокращается на 35-40 %.

Совместно со специалистами НТЦ «ТЕХНОСНИК» разработаны рекомендации по использованию ультразвукового воздействия на действующем промывном оборудовании.

На втором этапе работы исследовалось воздействие магнитного поля на промывной раствор. Параметры омагничивающего устройства приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристика омагничивающего устройства

Показатель	Значение
Значение магнитной индукции в зазорах между магнитами, не менее, мТл	100
Масса, не более, кг	0,4
Габариты, мм	Ø 75x116
Внутренний диаметр подсоединяемого шланга, мм	12
Максимально допустимое давление на входе устройства, не более, кг/см ²	4

Таблица 3. Сравнительный анализ основных показателей, характеризующих производственную и экологическую безопасность цеха мокрой отделки

Показатель	Промывка без ультразвука/омагничивания	Промывка с ультразвуком/омагничиванием	Снижение (повышение) показателя, %
Время нахождения в рабочей зоне и воздействия опасных и вредных факторов, т, с	1807200/180000	1048176/101880	42/15
Концентрация кальцинированной соды в промывном растворе, С, г/л.	0,3	0	100
Концентрация кальцинированной соды в сточных водах, С, г/л.	0,3	0	100
Концентрация ПАВ в промывном растворе, С, г/л.	0,9	0,4	56
Концентрация ПАВ в сточных водах, С, г/л.	0,8	0,36	56
Количество кальцинированной соды в сточных водах, т/год	1,1	0	100
Количество ПАВ в сточных водах, т/год	4,4	2,46	56

Анализ полученных результатов показывает, что продолжительность процесса промывки при использовании для интенсификации магнитного поля сокращается в среднем на 15 %.

Анализ параметров работы большого количества промышленных аппаратов для электромагнитной водоподготовки позволил выбрать аппарат для омагничивания и предложить схему включения выбранного омагничивающего устройства в технологическую цепочку с красильно-промывной машиной.

В таблице 3 представлены результаты сравнительного анализа основных показателей, характеризующих производственную и экологическую безопасность цеха мокрой отделки при действующих и интенсифицированных режимах промывки смесовой ткани. Как видно из таблицы, совершенствование процесса промывки с использованием физических полей и смеси ПАВ приводит к снижению времени нахождения в рабочей зоне, где действуют опасные и вредные факторы, устранению или снижению концентрации так называемой «жесткой химии» как в рабочем растворе, так и в сточных водах.

Оценка экономии от снижения материальных затрат (с учетом затрат на интенсифицирующие устройства) и сокращения платы за сброс сточных вод показала, что использование данных способов интенсификации может быть экономически оправданным.

Список литературы

1. Сажин Б.С. Процессы сушки и промывки текстильных материалов/ Б.С. Сажин, М.К. Кошелева, М.Б. Сажина. Москва: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2013-301с.
2. Кошелева М.К., Попов И.А., Богачёва Т.И., Шацких С.Н. Интенсификация процесса промывки вискозно-лавсановой ткани после печати. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2010. № 1.112-115 С.

УДК 66-963

ПРИДАНИЕ СОВОКУПНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПРЕССОВЫХ СУКОН GIVING OF SET OF OPERATIONAL PROPERTIES IN THE COURSE OF THERMOMOIST PROCESSING OF PRESS CLOTH

Г.И. Хазанов, М.А. Апарушкина
G. I. Hazanov, M. A. Aparushkina

Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
(e-mail: paxt@yandex.ru)

Moscow State University of design and technology, Russia, Moscow

Аннотация: В работе рассмотрены исследования по усовершенствованию технологии аппретирования прессовых сукон. Предложена в качестве аппрета композиция состава: смола ЭТМ – 662 отвердитель. Для выбора условий аппретирования использовался метод рототабельного центрального композиционного планирования эксперимента. Получено уравнение регрессии второго порядка и выбраны рациональные полимерные композиции для аппретирования прессовых сукон.

Abstract: the paper presents a research on the improvement of technology apprecilove press felts. Proposed as sprays composition composition: resin ETM – 662 hardener. For selection apprecilove method was used rotatable Central composite design of experiments. The obtained regression equation of the second order and selected rational polymer composition for apprecilove press felts.

Ключевые слова: термовлажностная обработка; прессовые сукна; рототабельное планирование; полимерная композиция; эксплуатационные свойства.

Keywords: hygrothermal treatment; pressing of cloth; rotatable planning; polymers; performance characteristics.

Представленная работа является продолжением исследований [1], направленных на усовершенствование технологии аппретирования технических сукон для прессовой части бумагоделательных машин.

Прессовые сукна выполняют функцию фильтра и упругой пористой подкладки в зонах прессования, отжима и отсоса воды из бумажной массы. При выполнении указанных функций, сукна подвергаются вытяжки по длине, усадки по ширине, износу, особенно по краям. Поэтому, для придания изделиям стабильности линейных размеров, закрепления ворса при сохранении обезвоживающей способности, осуществляется аппретирование текстильного материала.

Таблица 1. Факторы, уровни и интервалы их варьирования состава смолы
ЭТМ – отвердитель 662

Факторы	Уровни варьирования					Интервал варьирования
	X ₁ , X ₂	-1,414	-1	0	1	1,414
K ₁	10	15	25	35	40	10
K ₂	30	33,3	40	46,7	50	6,7

K₁ (г/л), X₁ – концентрация смолы ЭТМ в натуральном и безразмерном масштабе.

K₂ (% от концентрации ЭТМ), X₂ – концентрация 662 отвердителя в натуральном и безразмерном масштабе.

Таблица 2. Результаты планируемого эксперимента состава смолы
ЭТМ – 662 отвердитель

№ опыта	X ₁	X ₂	У _{рас}	У _{экс}	(У _{рас} – У _{экс}) ²
1	+	+	260,2	259,9	0,09
2	-	+	257,8	251,9	34,81
3	+	-	282,9	275,7	51,84
4	-	-	313,3	300,5	163,84
5	-1,414	0	252,1	250,3	57,24
6	1,414	0	248,2	251,9	13,69
7	0	-1,414	300	310,7	114,49
8	0	1,414	254,1	265,1	1
9	0	0	250,5	251,9	1,96
10	0	0	248,9	251,9	9
11	0	0	246,4	251,9	30,25
12	0	0	255,6	251,9	13,69
13	0	0	258,2	251,9	39,69

У_{рас}, У_{экс} – расчетные и экспериментальные значения водопоглощения, %.

На текстильных предприятиях аппретирование проводится на пропиточно-сушильном агрегате «Туне Еуреке» (Норвегия). Нанесение аппретирующего раствора на сукно осуществляется валиком. Затем прессовое сукно подвергается сушке, совмещенной с термообработкой на сушильном валу агрегата. В случае применения, в качестве аппретирующего раствора, состава водорастворимая эпоксидная смола ЭТМ – низкомолекулярный отвердитель, необходимые эксплуатационные свойства текстильного материала зависят от температуры термообработки. Высокое качество прессовых сукон обеспечивается при температуре 130°C и выше, что соответствует температуре

сушильного вала порядка 140-150°C. Получение подобной температуры сушильного вала вызывает определенные сложности. Поэтому, представляет интерес создание новых полимерных композиций менее чувствительных к температуре термообработки.

Нами изучалась возможность применения для аппретирования прессовых сукон полимерных композиций состава смола ЭТМ – 662 полимерный отвердитель.

Для выбора рациональных условий аппретирования использовался метод рототабельного центрального композиционного планирования эксперимента, на основе которого проводилось определение полиномиальной регрессионной многофакторной модели второго порядка с последующей оптимизацией процесса методом канонического преобразования уравнений регрессии и сканирования переменных. В качестве выходной переменной максимизировалось водопоглощение сукна u (%). Факторами служили концентрации смолы ЭТМ и 662 отвердителя. Факторы, уровни и интервалы их варьирования представлены в таблице 1, а результаты эксперимента в таблице 2.

После обработки экспериментальных данных, найдено уравнение регрессии второго порядка

$$Y = 251,9 - 4,2X_1 - 16,1X_2 + 8,2X_1X_2 + 2,1(X_1)^2 + 18(X_2)^2$$

Y (%) – водопоглощение.

Из анализа полученного уравнения выбраны рациональные полимерные композиции для аппретирования прессовых сукон:

4. Смола ЭТМ – 30 г/л, отвердитель 662 – 10 г/л.

5. Смола ЭТМ – 25-30 г/л, отвердитель 662 – 12,5-15 г/л.

Сукна, аппретированные указанными составами, прошли успешное испытание на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности.

Список литературы

1. А.с. 1799936 (СССР) Композиция для аппретирования волокнистых материалов. Оп. 7.03.93. Бюл. №5.

УДК 66.011

ПРИМЕНЕНИЕ КАНАЛЬНОГО МЕТОДА НАГРЕВА ПАРОМ ПОВЕРХНОСТИ СУШИЛЬНОГО ЦИЛИНДРА В ТЕКСТИЛЬНОЙ ОТРАСЛИ THE APPLICATION OF THE CHANNEL METHOD OF STEAM HEATING THE SURFACE OF DRYING CYLINDER IN THE TEXTILE INDUSTRY

Е.В. Шувалов

E.V. Shuvalov

(Московский государственный университет дизайна и технологии)
shuve@yandex.ru

Аннотация. В статье проанализированы проблемы развития современных энергоэффективных технологий в области контактной сушки волокнистых материалов. Дана характеристика основных конструктивных недостатков существующих систем удаления конденсата из сушильных цилиндров. Предложен новый, каналный, метод нагрева сушильных цилиндров барабанной сушильной машины паром и произведен анализ его преимуществ перед стандартным.

Abstract: The article analyzes the problems of development of modern energy technologies in the field of the contact drying fibrous materials. The article characterizes the main factor of the current shortcomings of the existing systems of removal of a condensate from Sushilgo-vermental cylinders. A new channel, the method of heating dryer drum dryer steam and analysis of its advantages over the standard.

Ключевые слова: контактная сушка волокнистых материалов; каналный метод нагрева сушильных цилиндров; коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении конденсата в канале.

Keywords: contact drying fibrous materials; the channel method of heating drying cylinders; the heat transfer coefficient in turbulent flow of condensate in the channel.

Процессы сушки волокнистых материалов в текстильной промышленности являются энергоемкими. Таким образом, для снижения себестоимости готового изделия необходимо применять современное энергоэффективное оборудование. Современная конструкция сушильных барабанов, в которых сконденсировавшийся пар удаляется с помощью сифона, имеет ряд недостатков, одними из которых являются:

1. Низкий коэффициент теплоотдачи от пара к стенке цилиндра, обусловленный термическим сопротивлением конденсатной пленки, наличием в цилиндре неконденсированных газов, требует увеличенного расхода пара.

2. Потери пара в конденсатоотделительной системе при неисправной работе оборудования. Таким образом, из-за неисправности конденсатоотводчиков доля стоимости энергозатрат, покрывающих потери с пролетным паром, доходит в среднем до 2 % себестоимости выпускаемой ткани.

Принцип предлагаемой тепловой схемы барабанной сушильной машины с применением каналной системы нагрева паром контактной поверхности заключается в том, что греющий пар, пройдя ряд сушильных барабанов и потеряв часть своей первоначальной энтальпии в процессе теплоотдачи и снизив давление за счет трения в канале, возвращается в тепловой компрессор, где смешиваясь со свежим паром, прошедшим через парогенератор восстанавливает свои параметры. Неиспользованный в каналах сушильных барабанов свежий пар направляется к тепловому потребителю. В качестве теплового потребителя может быть, например, турбина малой мощности, или теплообменные аппараты, используемые в технологических циклах. Конденсат от теплового потребителя сжимается питательным насосом и подается обратно в парогенератор. В дальнейшем данный замкнутый цикл многократно повторяется.

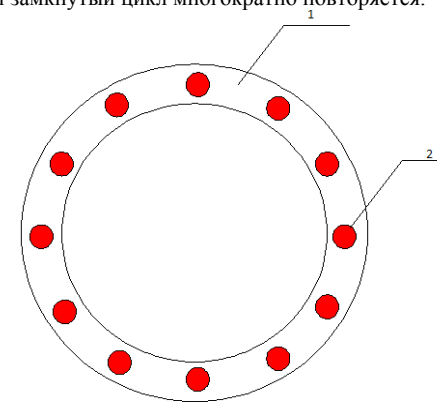


Рис.1 Система каналов в обечайке сушильного барабана новой конструкции.
1 – рубашка цилиндра, 2 – канал паровой

Предлагаемая новая конструкция сушильного барабана представляет собой обечайку с просверленными в ней каналами рис.1, в которых за счет перепада давления происходит разгон пара, что создает условия для сильно турбулентного течения конденсатной пленки с возможным его отрывом от стенки канала, уносом и последующем испа-

рением в потоке пара. Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке барабана, рассчитанный по методике Лабунцова [1], используя наши экспериментальные данные, составил ≈ 44000 вместо ≈ 7000 у барабана стандартной конструкции.

В ходе проведенных экспериментов по сушке льняной ткани с поверхностной плотностью при естественной влажности $g=240$ от начального влагосодержания $\approx 0,96$ кг/кг до конечного $\approx 0,136$ кг/кг было определено общее время процесса сушки и построена зависимость плотности теплового потока от времени сушки волокнистого материала, изображенная на рис.2, что дало возможность рассчитать количество сушильных барабанов в барабанной сушильной машине (Б.С.М.), а так же значения энтальпий теплоносителя на выходе из каждого барабана.

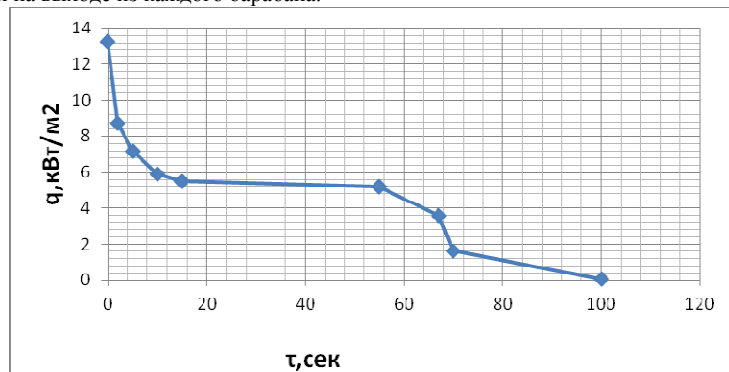


Рис.2 Зависимость плотности теплового потока, подводимого к поверхности материала, от времени сушки.

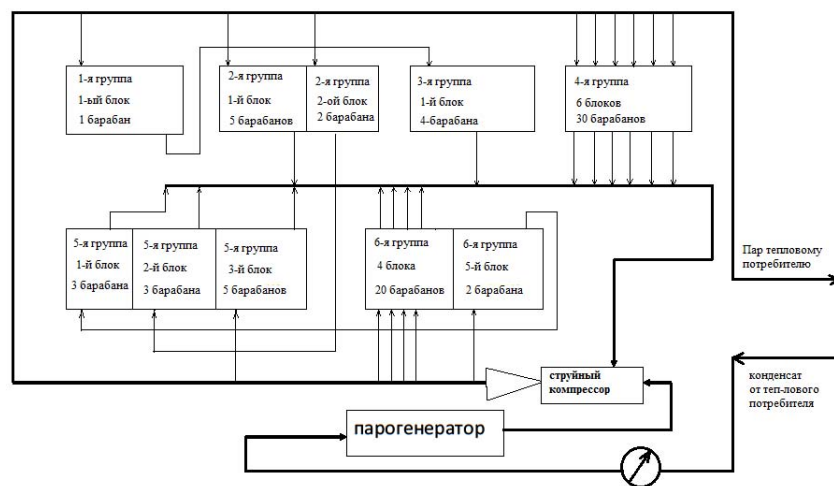


Рис.3 Тепловая схема Б.С.М.

Рассчитав падение давления в канале барабана при заданной скорости течения пара, можно установить максимальное число барабанов, на выходе из которых параметры пара становятся не эффективными для дальнейшего использования. Данные барабаны, последовательно соединенные по пару, входят в состав блока барабанов внутри паро-

вой группы. Исходя из наших расчетных данных, каждый блок сушильных барабанов содержит их количество равное 5 шт. После прохождения паром сушильных барабанов блока он удаляется в линию соединенную со всасывающим патрубком струйного компрессора. Если число барабанов в составе какого-либо блока меньше максимально возможного, то пар, выходящий из него, возможно применять для нагрева барабанов других блоков. Таким образом, на рис.3 пар на выходе из второго блока барабанов второй группы является греющим для второго блока барабанов пятой паровой группы. Полная тепловая схема разработанной Б.С.М., приведена на рис.3.

Разработанная тепловая схема Б.С.М принципиально отличается от схем существующих систем пароснабжения [2]:

1. системы параллельного пароснабжения и отвода конденсата;
2. системы группового пароснабжения и отвода конденсата.

Помимо теплоэнергетических преимуществ, ее достоинством является технологическая упрощенность и, как следствие, уменьшение количества установленного оборудования, из-за чего надежность же работы самой системы многократно возрастает.

Список литературы

1. Д.А.Лабунцов. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. — М.: Издательство МЭИ, 2000. — 388 с.;
2. В.С.Куров, Н.Н.Кокушин. Бумаго- и картоноделательные машины. — СПб.: Изд-во политехнического ун-та, 2006. — 588 с.

УДК 677.027

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАГРЕВА В ПОЛЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОТДЕЛОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА USE OF HEATING IN THE HIGH FREQUENCY FIELD IN TECHNOLOGICAL PROCESSES OF FINISHING PRODUCTION

Ольга Г. Циркина
Olga G. Tsirkina,

Ивановский государственный политехнический университет,
Россия, Иваново
(e-mail:ogtsirkina@mail.ru)
Ivanovo State Polytechnical University

Аннотация: в работе обоснована возможность замены традиционной тепловой обработки тканей в технологических цепочках отделочного производства на нагрев в поле токов высокой частоты при непрерывной схеме их отделки и повышения эффективности различных химико-текстильных процессов.

Abstract: in work possibility of replacement of traditional thermal treatment of fabrics in technological chains of finishing production on heating in the high frequency field at the continuous scheme of their finishing and increase of efficiency of various technological processes is proved.

Ключевые слова: диэлектрический нагрев; поле токов высокой частоты; текстильные материалы; технологический процесс; отделочное производство

Keywords: dielectric heating; high frequency field; textile materials; technological process; finishing production

В текстильном отделочном производстве одной из энергоемких операций является стадия тепловой обработки волокнистого материала. Прогресс в технике и технологии красильно-отделочного производства неразрывно связан с использованием физических методов воздействия на текстильный материал в процессах его химической отделки. К числу подобного рода воздействий относится диэлектрический нагрев, основанный на использовании энергии поля токов высокой частоты (ТВЧ). Все волокна, вне зависимости от их химической природы, являются диэлектриками, способными нагреваться в электрическом поле при протекании в них поляризационных процессов, которые сопровождаются выделением теплоты за счет сил трения в результате колебательного движения групп атомов или сегментов макромолекул полимера. Помимо этого, технологические составы, используемые при отделке текстильных материалов, являются водными и содержат электролиты. Молекулы таких диполей в такт пульсации электрического поля переориентируются по направлению вектора напряженности поля, что также за счет сил трения приводит к разогреву материала [1].

Целью представленной работы является обоснование возможности замены традиционной тепловой обработки на нагрев в поле токов высокой частоты при непрерывном способе обработки тканей (рис.1), и повышение эффективности различных технологических процессов их отделки.

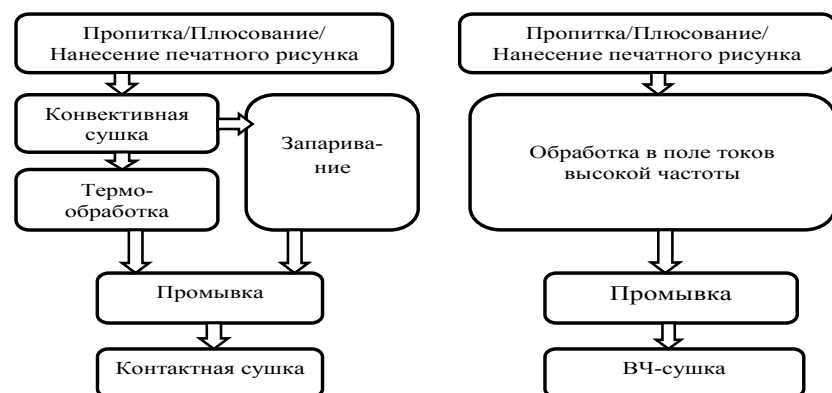


Рис.1 Традиционные и предлагаемые схемы построения непрерывных технологических процессов отделочного производства

Основным энергетическим фактором, определяющим эффективность нагрева материала в ВЧ-полях, является величина диэлектрических потерь, т.е. электрическая мощность, которая затрачивается на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле - P [1]:

$$P = 0,55 \cdot 10^{-12} \cdot \text{tg} \delta \cdot \varepsilon \cdot E^2 \cdot f \quad (1),$$

где $\text{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, ε – диэлектрическая проницаемость материала, E – напряженность электрического поля, В/мм, f – частота поля, Гц.

Таким образом, характер поглощения веществом энергии зависит от параметров электромагнитного поля и диэлектрических характеристик обрабатываемого материала.

К настоящему времени на кафедре ХТБМ ИГХТУ разработан ряд технологий, использующих диэлектрический нагрев [2,3]. Однако для реализации предлагаемых процессов отделки требуется предварительный подбор большого числа технологических и технических параметров, обеспечивающих максимально эффективный разогрев материала в поле ТВЧ для каждого из этапов с учетом вида ткани.

В ходе анализа и систематизации литературных и экспериментальных данных получены математические зависимости изменения диэлектрических свойств тканей в процессе их высокочастотного нагрева, что позволило выбрать энергетически выгодные условия обработки [4]. Выявлено, что для всех технологических процессов отделочного производства первостепенное влияние на величину $\text{tg} \delta$ оказывают геометрические характеристики обрабатываемого материала, концентрация наиболее сильного электролита, влагосодержание ткани и частота поля. Таким образом, оптимизированы технологические составы и рекомендованы режимы ВЧ-обработки тканей для различных этапов отделки текстильных полотен. Это позволило повысить интенсивность окраски тканей в процессах колорирования на 7-10% в сравнении с ранее предложенными для ВЧ-технологий рецептурами и снизить водопотребление на этапе промывки на 10-15% за счет увеличения степени фиксации красителя. Предложенные математические зависимости могут также использоваться для прогнозирования конечного результата химико-текстильного процесса, расчета величины удельной мощности и позволяют быстро корректировать рецептуру технологических растворов при смене ассортимента обрабатываемых тканей.

Список литературы:

1. Лыков, А.В. Тепло и массообмен в процессах сушки /А.В. Лыков. – М.– Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 518 с.
2. Циркина, О.Г. Влияние структурных характеристик хлопчатобумажных тканей на эффективность фиксации активных красителей в поле ТВЧ / О.Г. Циркина, А.Л. Никифоров, И.Б. Блиничева, Б.Н. Мельников // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1993. – №6 – С.47-51.
3. Шубина, Е.В. Взаимосвязь диэлектрических характеристик и качественных показателей текстильных материалов при малосминаемой отделке в поле токов высокой частоты / Е.В. Шубина, А.Л. Никифоров, О.Г. Циркина // Известия вузов. Технология текстильной промышленности.–2003.–№2.–С. 55-57.
4. Циркина, О.Г. Кластерный анализ показателей диэлектрических свойств текстильных материалов при изменении условий их обработки в отделочном производстве /О.Г. Циркина, М.В. Ермолаев, А.Л. Никифоров //Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2013.–№11.–С.79-81.

Секция 4. СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА

УДК [631.365 + 664.723] (477) : 662.99

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКИ**СУШКИ ЗЕРНА В УКРАИНЕ****ISSUES TECHNOLOGY AND ENGINEERING
OF GRAIN DRYING IN UKRAINE****Георгий Н. Станкевич**
Georgy N. Stankevich*Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса,
(e-mail: georg-st@mail.ru).**Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine, Odessa*

Аннотация: Проведен анализ состояния техники и технологии сушки зерна на хлебозаготовительных предприятиях Украины. Показаны преимущества и недостатки существующих и новых типов зерносушилок. Рассмотрены пути совершенствования технологии и техники сушки зерна, способствующие снижению затрат топлива, повышению производительности сушилок и обеспечению сохранности качества просушенного зерна.

Ключевые слова: зерно, зерносушилки, сушильный агент, топливо, качество зерна.

Abstract: The situation of grain drying technique and technology on Ukrainian grain processing enterprises has been analyzed. The advantages and disadvantages of existing and new types of grain dryers has been reviewed. The improving ways of grain drying technique and technology, contributing to reduce fuel costs, improve productivity of dryers and secure the quality of the dried grain has been reviewed.

Keywords: grain, grain dryers, drying agent, fuel, grain quality.

Сушка зерна — одна из важнейших и одновременно наиболее энергозатратных технологических операций послеуборочной обработки и хранения зерна. Правильно просушенное зерно способно долгое время надежно храниться и обеспечивать после переработки высокое качество производимой из него пищевой продукции. Режимы сушки зерна различных культур, зависящие от назначения зерна, его влажности, способа сушки и продолжительности хранения для существующих в Украине в 90-е годы зерносушилок, регламентировались отраслевой инструкцией по сушке и эксплуатации зерносушилок, введенной в действие для предприятий Государственной акционерной компании «Хлеб Украины» в 1997 году [1].

Техника сушки зерна. В конце прошлого века в Украине начал стремительно изменяться парк зерносушильной техники. Помимо самых распространенных шахтных прямоточных зерносушилок ДСП-32от, небольшого количества шахтных рециркуляционных типа РД-2х25 и шахтных прямоточно-рециркуляционных А1-ДСП-50, страна начала наполняться импортными зерносушилками новых типов от разных производителей.

В первую очередь некоторые отечественные фирмы наладили поставку на предприятия **колонковых модульных зерносушилок** производства США («Mathews Company», «Farm Fans», «Delux», «Sukup» и других) на условиях лизинга. Была создана сеть сервисного обслуживания указанных зерносушилок, способная оперативно устранять на территории Украины возникающие при эксплуатации сушилок неполадки и поломки. Все это способствовало быстрому распространению колонковых модульных зерносушилок на предприятиях различных форм собственности.

Колонковые зерносушилки, в отличие от общеизвестных шахтных, не имеют газораспределительных коробов, характеризуются простотой конструкции и низкой металлоемкостью. В сушилках зерновые колонны толщиной 305 мм гравитационно движутся

между перфорированными стенками (решётами). Вентиляторы, подающие сушильный агент и наружный воздух, размещены непосредственно у сушильных камер или даже смонтированы в них. В отличие от отечественной практики, в этих сушилках, широко использован модульный принцип компоновки, когда из унифицированных узлов или модулей создают оборудование различной производительности, что упрощает изготовление, монтаж и уменьшает стоимость. Каждый модуль представляет собой самостоятельную сушилку с одним-двумя тепловентиляторными агрегатами. При необходимости можно наращивать производительность сушилок, добавляя один или несколько модулей, устанавливая их один над другим с помощью автокрана.

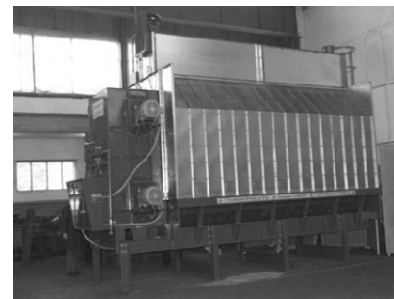


Рис. 1 – Колонковая модульная зерносушилка «Украина»

Со временем машиностроители Украины освоили изготовление колонковых моделей зерносушилок. Примером могут служить модели, производимые в г. Харьков (рис. 1) и г. Хорол. Сушилки «Украина» охватывают диапазон производительностей 5...50 т/ч при снижении влажности зерна пшеницы с 17 до 12 %. Они автоматизированы, оснащены современными теплогенераторами, работающими на природном или сжиженном газе. Теплогенераторы имеют все виды защит, обеспечивают любой режим сушки, полное сгорание топлива и высокую пожаробезопасность. Сушилки встраиваются в любую существующую в хозяйстве технологическую схему послеуборочной обработки и хранения зерна. Использование оцинкованного металла обеспечивает долговечность и надежность конструкции.

В то же время колонковые зерносушилки имеют и ряд недостатков. Прежде всего, повышенная неравномерность нагрева и сушки зерна по всей толщине слоя (305 мм). Сушилки не защищены снаружи от действия ветров, которые могут приводить к существенному снижению скорости сушки зерна с подветренной стороны. При несоблюдении рекомендованных режимов сушки масличных культур отверстия ситовых поверхностей сушилок могут «замазливаться». В случае временной остановки зерно в них быстро остывает, что приводит к перерасходу топлива на повторный разогрев зерна. При сушке мелкосеменных культур (рапс, сорго, лён, горчица) сушилки комплектуются ситами с уменьшенными размерами отверстий решет. Поэтому, последующая сушка на этих моделях традиционных зерновых культур приводит к снижению их производительности из-за повышенного аэродинамического сопротивления решет с мелкими отверстиями. И если хозяйство выращивает наряду с традиционными культурами и мелкосеменные, то в этом случае ему необходимо использовать разные сушилки с различными размерами отверстий в решетках: одни для традиционных культур, а другие — для мелкосеменных. Ситовые поверхности сушилок часто нужно очищать от примесей и пыли, что требует их остановки и выпуска зерна.

Отдельную группу представляют **колонковые башенные зерносушилки**. Их приобретают, как правило, крупные предприятия для сушки больших потоков зерна кукурузы (250 т/ч и более). Применяют такие зерносушилки и для подсушивания семян подсолнечника на маслоэкстракционных заводах. Толщина слоя в башенных сушилках аналогична колонковым — 305 мм. Для снижения неравномерности сушки зерна они имеют встроенные инверторы, позволяющие менять между собой внутренние и внешние потоки зерна. Башенные зерносушилки имеют такие же преимущества и недостатки, как и колонковые модульные зерносушилки (горизонтального типа).

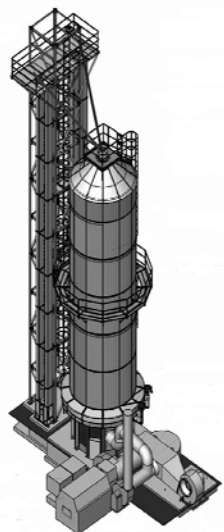


Рис. 2 – Комплекс сушильный КС-АСТРА на базе зерносушилки АСТРА-ИНГУЛ 11...17-3,6 с универсальным теплогенератором на твердом биотопливе и теплообменником

В Украине освоен выпуск башенных зерносушилок марки «АСТРА-ИНГУЛ» производительностью 25...44 т/ч при снижении влажности зерна пшеницы с 19 до 15 %. Мощность горелок составляет 1,6...3,0 МВт. В отличие от зарубежных башенных зерносушилок, у отечественных теплогенератор вынесен наружу, что практически исключает возможность возгораний, особенно при сушке семян подсолнечника. Все модели башенных сушилок компании «АСТРА» могут комплектоваться теплогенераторами, работающими и на альтернативном биотопливе — дрова, древесные отходы (опилки, щепа), агроотходы (солома в брикетах, лузга), торф, пеллеты и др. (рис. 2). При необходимости за теплогенератором, искрогасителем, камерой дожигания и смесителем может устанавливаться теплообменник с экономайзером, позволяющий подавать в сушилку чистый горячий воздух. Экономия при использовании биотоплива очевидна, учитывая соотношение цен разных видов традиционного и альтернативного топлива и их теплотворную способность. Так, использование соломы в тюках для получения теплоносителя (пиролизное сжигание) экономичнее пеллет из соломы в 2,1 раза, природного газа — 3,3 раза, дизтоплива — в 8,3 раза.

Однако наиболее распространенными все же остаются *шахтные зерносушилки*, которые являются универсальными, обеспечивают более равномерную сушку и хорошее качество просушенного зерна.

Некоторые типы новых шахтных зерносушилок предложил старейший отечественный производитель — ОАО «Карловский машиностроительный завод» (KMZ Industries): это прямоточные ДСП-10, ДСП-20, прямоточно-рециркуляционные ДСП-25, А1-ДСП-50, спаренные 2×А1-ДСП-50 (сушильно-очистительный комплекс «Суховий») и последняя из разработок — усовершенствованная А1-ДСП-50Е (рис. 3). Эти сушилки позволяют обеспечить сушку зерна различных культур с производительностью в диапазоне 10...100 т/ч (при снижении влажности зерна пшеницы с 20 до 14 %). По затратам топлива (1,22 кг/т·%) они близки и импортным зерносушилкам.

В Украине значительно увеличилась доля импортных шахтных зерносушилок. В отличие от отечественных зерносушилок типа ДСП с двумя параллельно расположенными шахтами, импортные зерносушилки в большинстве — одношахтные. Как правило, они закрыты и теплоизолированы со всех сторон. Работают зерносушилки преимущественно на всасывание на газообразном топливе. По



Рис. 3 – Усовершенствованная модель зерносушилки А1-ДСП-50Е

сравнению с отечественными, в импортных сушилках применяются более мягкие и энергоэкономные нисходящие режимы сушки. Есть в Украине модели зерносушилок разных иностранных фирм с рекуперацией теплоты отработавшего в охлаждающей зоне воздуха и частично отработавшего в конце сушильной зоны сушильного агента, которые хорошо себя зарекомендовали на крупных предприятиях. Теплогенераторы сушилок зачастую позволяют работать как на смеси топочных газов, так и на чистом подогретом атмосферном воздухе. Некоторые сушилки комплектуются также системами очистки отработавшего сушильного агента и воздуха от пыли и легковетесных примесей, что позволяет предприятиям выдерживать санитарные и экологические требования.

Небольшую группу составляют *мобильные (передвижные) зерносушилки*, используемые для сушки зерна в фермерских хозяйствах, сервисных предприятиях и передвижных механизированных отрядах, которые стремятся увеличить период использования зерноуборочных комбайнов, перемещая их с юга на север. Мобильные сушилки могут быть колонкового, башенного либо шахтного типа. Использование относительно недорогих передвижных сушилок, способных работать в любом месте и при любых погодных условиях, — это реальный путь повышения эффективности производства зерновых, бобовых и масличных культур.

В Украине выпускается передвижная зерносушилка «АСТРА-ИНГУЛ-М», предназначенная для сушки всех видов зерновых, масличных и бобовых культур: пшеницы, кукурузы, подсолнечника, рапса, сои и других. Особенностью этой сушилки является отсутствие шнековой или норийной системы (с изнашивающимися деталями, требующими постоянного обслуживания, да еще и повреждающих зерно), которая заменена пневмотранспортером (аэродинамическим перемещением зерна в процессе загрузки, циркуляции и выгрузки), что способствует также подсушиванию зерна и, что важно, обеспечивает постоянную очистку от пыли и легких примесей. Благодаря этому не требуется сепарация зерна при загрузке в сушилку. При этом повышается эффективность работы сушилки, экономится топливо и снижается вероятность возгораний.

Технология сушки. В зерносушилках, работающих на предприятиях Украины, реализованы различные технологические способы сушки, имеющие свои преимущества и недостатки. По способу подведения теплоты практически все зерносушилки являются конвективными с гравитационным медленно движущимся слоем зерна, что обеспечивает простоту конструкции сушилок. У этих зерносушилок сравнительно невысокий тепловой КПД, в большинстве на уровне 40 %. Его можно несколько повысить применением различных технологических и теплотехнических мероприятий. Нужно обратить внимание, что в качестве сушильного агента в подавляющем большинстве сушилок применяется смесь атмосферного воздуха и продуктов сгорания топлива — жидкого или газообразного. Применение нагретого воздуха, получаемого в теплогенераторах непрямого нагрева, повышает расход топлива на сушку (по разным оценкам на 20...40 %), что сдерживает применение этого экологически чистого способа сушки. Отмечаются случаи применения некоторыми предприятиями вместо светлых видов жидкого топлива более дешевого печного топлива, что приводит к резкому ухудшению качества просушенного зерна: происходит загрязнение его продуктами неполного сгорания топлива, в том числе и канцерогенными веществами.

Зерносушилки с кондуктивным (контактным) подводом тепловой энергии для подсушивания круп по сравнению с конвективными имеют еще меньший тепловой КПД, что объясняется меньшей площадью контакта поверхности зерна с сушильным агентом. Зерносушилки с другими способами подвода энергии (инфракрасным, микроволновым и др.) практически не получили промышленного применения из-за низкой производительности и повышенных энергозатрат.

Во многих проспектах к зерносушильной технике, активно продвигаемой на украинском рынке, относительно процесса сушки используются такие выражения как «порции

онная сушка», «проточная», «рециркуляционная» и др. Эти термины, относящиеся к способам движения зерна в сушилках, часто путают между собой и неправильно понимают. Здесь нужно иметь в виду следующее. *Порционная сушка* применяется в простейших сушилках — бункерных, представляющих собой бункер с сетчатыми стенками. Загруженная в такую сушилку порция зерна продувается сушильным агентом вертикально или радиально (в зависимости от конструкции), высушивается до конечной влажности в неподвижном состоянии, охлаждается атмосферным воздухом и выгружается из сушилки. Если в этой сушилке организовать сушку порции зерна путем его циркуляции, то есть перекачкой зерна по замкнутому контуру (работа сушилки «сама на себя»), то это и есть *порционная циркуляционная сушка*. Недостаток первого способа — большая неравномерность сушки зерна по высоте слоя, второго — повышенное содержание механически поврежденного при циркуляции зерна. Оба способа имеют также повышенные затраты теплоты, поскольку после охлаждения и выпуска зерна и заполнения сушилки новой порцией сырого зерна металлические конструкции снова будут прогреваться, отбирая теплоту, подводимую к зерну.

Указанного недостатка не имеют *прямоточные зерносушилки*. В них происходит постоянная подача зерна в надсушильный бункер, его сушка в сушильных зонах, охлаждение в охладительной зоне и выпуск из сушилки. При этом прогревание конструкций сушилки стабилизируется, и теплота, подводимая к зерну, будет тратиться более рационально — на его сушку. По этому способу сушки работают все шахтные, колонковые и башенные зерносушилки. Однако, для запуска этих сушилок необходимо просушить находящееся в них зерно с помощью указанного выше порционного циркуляционного способа и, после достижения необходимой конечной влажности, сушилку переводят на более энергосберегающую и качественную прямоточную сушку. Равномерность сушки при таком способе выше, особенно в шахтных зерносушилках.

На некоторых зернозаготовительных предприятиях в связи с недостаточно высокой квалификацией операторов по сушке зерна встречается использование шахтных и колонковых сушилок для порционной циркуляционной сушки. Такое непонимание — прямой путь к перерасходу топлива и увеличению количества битого при сушке зерна.

Недостатком прямоточного способа сушки является ограниченный влагосъем за один пропуск зерна через сушилку, следствием чего является необходимость предварительного формирования партий зерна с близкими значениями влажности, что оговаривается действующей инструкцией по сушке. Указанного недостатка не имеет *рециркуляционный способ* сушки, при котором в потоке можно сушить зерно с любой начальной влажностью. Особенностью рециркуляционных сушилок является то, что в них сушится не сырое зерно, поступающее в сушилку, а его смесь с почти сухим (рециркулирующим) зерном, причем поток рециркулируемого зерна многократно превосходит поток сырого зерна, поступающего в сушилку. Именно это делает сушилку практически не чувствительной к колебаниям входной влажности сырого зерна, поскольку она практически не влияет на влажность смеси сырого и рециркулируемого зерна. Недостатком рециркуляционной сушки является некоторое увеличение количества битого зерна (через многократную его рециркуляцию) и повышенная неравномерность по влажности отдельных зерен в просушенной смеси. Однако при дальнейшем хранении влажности отдельных зерен постепенно выравниваются (хотя вследствие явления гистерезиса полного выравнивания влажности отдельных зерновок все же не происходит). Необходимо отметить, что в практике зерносушения применяются несколько схем рециркуляционной сушки зерна, описанных в специальной литературе [2].

Таким образом, лучшее качество просушенного зерна обеспечивают шахтные прямоточные зерносушилки. В случае сушки зерна с высокой влажностью лучше использовать несколько последовательно работающих прямоточных сушилок. Однако при этом надо иметь возможность формировать и накапливать отдельные партии зерна с близкими влажностями в досушильных бункерах или в зернохранилищах. Если такой

возможности нет, то можно воспользоваться одним из вариантов рециркуляционной сушки.

Режимы сушки. Под режимом сушки обычно понимают совокупность значений определенных параметров сушильного агента и зерна, в первую очередь температуру сушильного агента. Одноступенчатый температурный режим сушки используется в сушилках небольшой производительности, как правило, порционных. Наиболее распространены многоступенчатые восходящие или нисходящие режимы сушки. Более прогрессивными являются нисходящие режимы сушки, они более экономичны и предотвращают перегрев зерна в сушилке. Поэтому наиболее распространенные на предприятиях Украины зерносушилки ДСП-32от с восходящим режимом сушки реконструируют на нисходящие режимы.

Многие зарубежные сушилки вообще не имеют четкого разделения сушильных зон на отдельные степени сушки. В них температура сушильного агента постепенно снижается по мере сушки зерна, обеспечивая плавный бесступенчатый нисходящий режим сушки. Эти сушилки часто предусматривают частичное повторное использование отработанных сушильного агента и воздуха, что уменьшает на расход топлива на сушку. Доля таких совершенных сушилок в Украине быстро возрастает, несмотря на их более высокую стоимость. Конечно, в первую очередь их покупают крупные зернопроизводящие компании, особенно с иностранными инвестициями.

Некоторые технологические приемы сушки позволяют снизить расход топлива на сушку и повысить качество зерна. Это, например, двухэтапная сушка, известная за рубежом как «драйерация». Суть способа заключается в том, что зерно в сушилке сушат не до конечной влажности, а недосушивают на 1,5...2,0 % и, не охлаждая его, направляют в бункер или металлический силос с системой активного вентилирования. После отлежки около 8...10 часов зерно постепенно охлаждают, удаляя остатки влаги, поднявшейся изнутри зерна на его поверхность. Такой способ широко применяют за рубежом при сушке зерна кукурузы, который позволяет уменьшить на 20...30 % удельный расход топлива и существенно снизить ее трещиноватость. В Украине этот способ сушки также успешно применяют, особенно при сушке кукурузы, например, на предприятиях крупнейшей компании «НИБУЛОН», поскольку он дает реальное повышение качества просушенной кукурузы и экономит топливо.

Известный способ сушки зерна с предварительным подогревом, позволяющий повысить производительность сушилок и снизить удельные затраты топлива на сушке, к сожалению в обновленном парке зерносушилок Украины не используется. Он сохранился лишь в небольшой части устаревших рециркуляционных зерносушилок типа РД-2х25. Подчеркнем также, что в зарубежных зерносушилках рециркуляционный способ сушки с предварительным нагревом зерна вообще не используется. И лишь в отечественных зерносушилках А1-ДСП-50 и ДСП-25 конструктивно предусмотрен как прямоточный так и рециркуляционный способ сушки (однако, без предварительного нагрева зерна). В некоторых случаях в поточных линиях сушки высоковлажного зерна кукурузы на базе спаренных зерносушилок, например, А1-ДСП-50, применяют рециркуляционные схемы сушки.

Экологические аспекты сушки зерна. Все зерносушилки, и шахтные, и колонковые, и башенные, при сушке зерна выбрасывают в окружающую среду отработанные сушильный агент и воздух, содержащие в себе пыль и легкие примеси. В шахтных сушилках с отводящими коробами кроме пыли и примесей может выдуться также битое и щуплое зерно. Такие зерносушилки становятся источником загрязнения окружающего воздуха и прилегающей территории. На сегодняшнее время не существует надежных и дешевых способов очистки выбросов сушилок от загрязняющих веществ. Причин здесь несколько. Во-первых, это слишком большие объемы отработавших сушильного агента и воздуха, которые необходимо очищать (160 и более тыс. м³/ч), во-вторых, —

их повышенная влажность. Поэтому такой важный аспект как повышение экологичности зерносушилок — слишком дорого стоит.

Наиболее известные отечественные шахтные зерносушилки А1-ДСП-50 оснащены двухступенчатой системой очистки, состоящей из осадочных камер для гравитационной очистки отработавшего сушильного агента от легких примесей и инерционных пылеотделителей жалюзийного типа для очистки от пыли. Однако эффективность такой системы невысока — например, пыль и кукурузная красная пленка ею полностью не задерживаются.

Шахтные зерносушилки некоторых ведущих зарубежных фирм, полностью закрытые от внешней среды, для очистки отработанных сушильного агента и воздуха могут комплектоваться довольно громоздкими горизонтальными циклонами. Другие фирмы устанавливают на выходе из каждой сушильной зоны специальные устройства (циклофены) для осаждения пыли и легких примесей. Но при сушке, например, кукурузы в холодных климатических условиях, характерных для Украины, такие устройства от присутствующих в отработанном сушильном агенте влаги, пыли и легких примесей могут залипать и даже замерзать.

Колонковые модульные и башенные сушилки совсем не имеют устройств для уменьшения выбросов. Не имеют их и простые зерносушилки небольшой производительности, и тем более, передвижные. Однако экологическая проблема для последних и не стоит — она более важна для мощных сушилок, работающих вблизи жилых зон, и могущих привести к загрязнению окружающей среды.

Экологичность сушилок касается не только загрязнения их выбросами в окружающую среду, это касается также и загрязнения зерна продуктами неполного сгорания топлива, о чем шла речь выше, когда рассматривали способы подвода теплоты в зерносушилках.

Нужно отметить, что наибольшее загрязнение вредными продуктами зерно получает при сушке смесью воздуха и топочных газов. И это касается большинства зерносушилок. Степень загрязнения зерна зависит от топлива: наибольшее загрязнение дает печное топливо (его применение вообще не допустимо), значительно лучше в этом плане светлые виды жидкого топлива (дизельное, тракторный керосин) и практически не загрязняют зерно природный и сжиженный газ. Зерно совсем не загрязняется при сушке чистым подогретым в калориферах (теплогенераторах) наружным воздухом, но это увеличивает расход топлива, что и тормозит применение экологически чистых способов сушки нагретым атмосферным воздухом.

Энергосбережение в сушке зерна. В изложенном выше материале так или иначе шла речь об экономии топлива на сушку, повышении теплового коэффициента полезного действия (КПД) сушилок и их энергоэффективности. Из-за потерь теплоты на нагрев зерна, с отработавшим сушильным агентом, через стенки сушилки в окружающую среду, в виде термодинамических потерь, в большинстве зерносушилок только 40...55 % тепловой энергии расходуется полезно, то есть на испарение влаги.

Небольшой части тепловых потерь можно избежать, что и делается в некоторых конструкциях зерносушилок. Это полный возврат отработавшего теплого воздуха из зоны охлаждения на повторное использование. При этом часть теплоты все же теряется с охлаждаемым зерном, поскольку его невозможно охладить до температуры окружающей среды. Однако такой способ сушки все же позволяет сэкономить около 10 % топлива.

Результаты расчетов и многолетних производственных испытаний показывают, что на сушку можно возвращать также часть отработавшего в конце процесса сушки сушильного агента. Это позволяет экономить еще 15...20 % топлива.

Можно также меньше тратить теплоты на испарение влаги и в самой сушилке. Для этого нужно организовывать промежуточные отлежки зерна. Это снимает отрицательное действие явления термовлагопроводности, позволяет влаге из внутренних слоев

переместиться к поверхности зерна и тем самым облегчает ее испарение. Некоторые фирмы такую отлежку зерна предусматривают перед зоной охлаждения. Это наряду с экономией топлива, способствует лучшему охлаждению зерна на счет интенсивного испарения поверхностной влаги, что очень важно при сушке и охлаждении зерна в летнее время.

Нужно обратить внимание также на то, что расход топлива существенно зависит от температуры наружного воздуха и может изменяться в довольно широких пределах. Так, при возрастании температуры наружного воздуха с 5 °С (осенне-зимний период) до 30 °С (летние условия) расход топлива уменьшается на 50...60 %.

В последнее время нормы расхода топлива, указываемые в технических характеристиках отечественных и зарубежных зерносушилок, приводятся в расчете на 1 т · %. Это не совсем правильно, поскольку не учитывается начальная и конечная влажность зерна, влияющих на расход теплоты на испарение влаги. Ведь снижение влажности зерна при сушке с 20 до 19 % по расходам теплоты не равносильно сушке зерна с 15 до 14 % влажности, хотя и в первом и во втором случае снимается тот же 1 % влаги. Практически нигде не указывается калорийность газа, для которого определяют расходы топлива на сушку.

Подытоживая можно заключить, что многие проблемные вопросы сушки являются общими для специалистов в области технологии и техники сушки зерна. И решать их нужно общими усилиями ученых и практиков, вынося и обсуждая на различных региональных и международных конференциях.

Список литературы

1. Інструкція по сушінню продовольчого, кормового зерна, насіння олійних культур та експлуатації зерносушарок. – Одеса-Київ: ДАК “Хліб України”, 1997. – 72 с.
2. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Анатазевич В.І. Сушіння зерна: Підручник. – Київ: Либідь, 1997. – 352 с.

УДК 664.723.047

КИНЕТИКА ОХЛАЖДЕНИЯ ЗЕРНА ПОСЛЕ СУШКИ НА УСТАНОВКАХ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ KINETICS OF THE GRAIN COOLING AFTER ITS DRYING ON A FORCED VENTILATION PLANT

**В.Ф Сорочинский
V.F.Sorochinsky**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки (ФГБНУ «ВНИИЗ»), Россия, Москва (e – mail: vlafest@bk.ru)
Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific and Research Institute for Grain and Products of its Processing (FSBSI «VNIIZ»),
Russia, Moscow.

Аннотация: Приведены результаты экспериментальных исследований кинетики конвективного охлаждения нагретого зерна для реализации технологии «драйаэрации». Получены уравнения регрессии для расчета продолжительности охлаждения и величины снижения влажности для зерна пшеницы и риса в зависимости от начальной влажности зерна, скорости фильтрации воздуха, высоты слоя зерна и разницы между температурой зерна и охлаждающего воздуха.

Abstract: The article provides the results of experimental studies of kinetics of the heated grain convective cooling for “dry aeration” technology implementation. The regression equa-

tions for estimation of cooling period and moisture content reduction depending on initial moisture content of grain, air filtration rate, height of grain layer and difference between the temperature of grain and the temperature of cooling air have been obtained for wheat grain and rice.

Ключевые слова: сушка, охлаждение, кинетика, вентилирование, температура, влажность, фильтрация.

Keywords: : drying, cooling, kinetics, aeration, temperature, moisture content, filtration.

В соответствии с Инструкцией по сушке зерно после зерносушилки должно выходить с температурой, не превышающей на 10^0C температуру атмосферного воздуха. Это определяет, особенно в летний период уборки урожая, относительно высокую температуру зерна, направляемого в зернохранилище, достигающую $30 - 35^0\text{C}$. Кроме того, зерно после сушки может выходить из зерносушилки с колебаниями по влажности, достигающими $0,5-1,0\%$, в результате неравномерности по влажности сырого зерна, поступающего на сушку, а также возможной недостаточной автоматизации параметров процесса сушки: колебаний температуры и расхода сушильного агента, неравномерности движения зерна по сечению сушильной шахты, засоренности выпускных устройств и т.д.

Снизить температуру просушенного зерна до поступления его в зернохранилище можно с использованием специальных охлаждающих шахт (колонок), устанавливаемых возле зерносушилок. Однако более предпочтительным является применение метода «драйаэрации», когда зерно выпускают из зерносушилки с влажностью на $1,0-1,5\%$ превышающей критическое значение для сухого зерна и, после отлежки, медленно охлаждают. При этом охлаждение зерна может осуществляться как в специальных охладителях зерна, так и непосредственно в зернохранилищах: зерноскладах и силосах элеваторов.

В процессе «драйаэрации» происходит не только выравнивание зерновой массы по влажности и температуре, но и досушивание зерна. Подобная технология наиболее эффективна для сушки сильных и ценных сортов пшеницы, семенного зерна, а также зерновых культур, подверженных трещинообразованию при сушке - риса, кукурузы, бобовых культур.

При медленном охлаждении этот способ позволяет использовать для испарения влаги из зерна теплоту, аккумулированную зерновой массой в большей степени, чем при относительно быстром охлаждении в охладительной зоне зерносушилки. При этом отлежка (термостатирование) зерна перед его охлаждением служит для выравнивания влаги в зерновках, распределение которой в конце процесса сушки неравномерно. Кроме того, при использовании такой технологии предотвращается пересушивание зерна, сохраняется его качество, повышается производительность и коэффициент полезного действия зерносушилок.

Исследования проведены на стендовой установке представляющей собой блок из трех теплоизолированных колонок высотой 2350 мм каждая, внутренним диаметром 250 мм , установленных на общей раме и соединенных последовательно при продувке воздухом. В каждой колонке на расстоянии от газораспределительной решетки $200, 650, 1100, 1550$ и 2000 мм расположены съемные сетчатые кассеты для отбора зерна и измерения его влажности и хромель-копелевые термопары для измерения его температуры [1].

Исследования проведены на зерне риса сорта «Спальчик» и пшеницы сорта «Вега» влажностью соответственно $16,2 - 17,2\%$ и $15,1 - 18,5\%$, температурой нагрева $37,1 - 55,0$ и $43,3 - 53,0^0\text{C}$. Температура охлаждающего атмосферного воздуха изменялась от 8 до 20^0C , относительная влажность воздуха - $50 - 80\%$, высота слоя зерна - $1,6 - 6,0$

м, скорость фильтрации воздуха в слое - $1,7 - 22,8\text{ см/с}$, удельные подачи воздуха составляли $19 - 334\text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{т})$.

При охлаждении зерна в плотном слое в зависимости от скорости фильтрации воздуха могут возникнуть существенные различия в температуре и влажности верхнего и нижнего слоя зерна (рис.1). Как видно из графика при охлаждении нагретого зерна в плотном слое значительной высоты это различие зависит от скорости фильтрации воздуха. Например, для зерна начальной влажности $16,7\%$ при высоте слоя $4,2\text{ м}$ и низкой скорости фильтрации воздуха $4,9\text{ см/с}$ верхний слой увлажняется, и даже через 10 часов вентилирования не снижает свою влажность ниже начального значения, а расхождение в температурах верхнего и нижнего слоя максимальное.

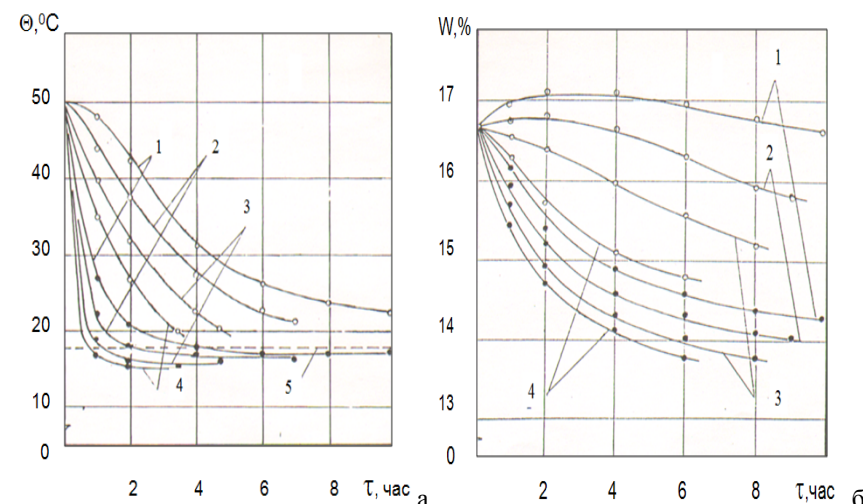


Рис.1. Изменение температуры (а) и влажности (б) верхнего и нижнего слоев риса - зерна в процессе охлаждения: 1 - скорость фильтрации воздуха $V_{\phi} = 4,9\text{ см/с}$; 2 - $8,4$; 3 - $12,2$; 4 - $22,8$; 5 - температура охлаждающего воздуха. Высота слоя зерна $H_0 = 4,2\text{ м}$, начальная температура зерна $\Theta_n = 50^0\text{C}$, начальная влажность зерна $W_n = 16,7\%$; o - верхний слой зерна; • - нижний слой зерна.

С увеличением скорости фильтрации воздуха до $12,2\text{ см/с}$ охлаждение верхнего слоя происходит с началом процесса, а разность температур между верхним и нижним слоем уменьшается. При этом уменьшение температуры нижнего слоя может достигать значений даже ниже температуры воздуха за счет испарения влаги из зерна.

С уменьшением скорости фильтрации воздуха несколько увеличивается вынос влаги в верхний слой зерна, одновременно увеличивается количество испаренной влаги из нагретого зерна в процессе охлаждения. При этом влажность верхнего и нижнего слоев зерна снижается соответственно на $0,7$ и $1,3\%$ (рис.2). Полученные экспериментальные данные подтверждают вывод о необходимости в процессе «драйаэрации» установления оптимального значения скорости охлаждения зерна после сушки для максимального испарения из него влаги за счет теплоты, ранее пошедшей на нагрев зерна. При этом после охлаждения температура зерна в нижнем и верхнем слоях зерновой насыпи была соответственно на $2,7$ и $1,7$ ниже температуры охлаждающего воздуха.

Увеличение влажности верхнего слоя зерна при низких скоростях фильтрации воздуха объясняется сорбцией влаги на поверхность зерна из воздуха, являющегося в этом случае сушильным агентом и имеющим повышенное влагосодержание за счет

испарения влаги из нижних слоев. Для зерна риса в слое высотой 6 м увеличение влажности в верхнем слое при охлаждении может достигать 0,5 – 0,8%. С увеличением скорости фильтрации воздуха и снижением высоты слоя сорбция влаги в верхнем слое и разница по влажности верхнего и нижнего слоя существенно уменьшается.

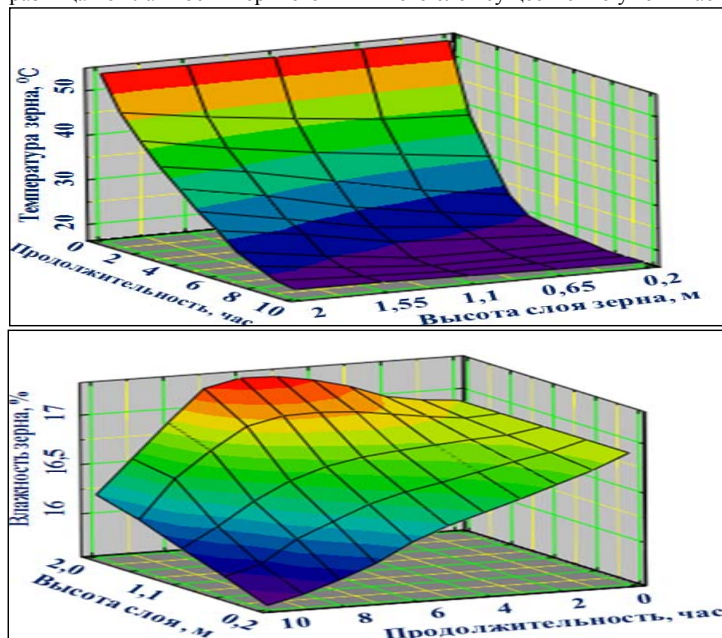


Рис.2. Изменение температуры и влажности слоя нагретого зерна в процессе охлаждения: начальная влажность зерна 16,9%, температура 54⁰С; температура охлаждающего воздуха 20⁰С; скорость фильтрации воздуха 3,5 м/с; удельная подача воздуха 87 м³/(ч.т); высота слоя зерна 2 м.

Минимальную скорость фильтрации воздуха при активном вентилировании нагретого зерна, при которой не будет происходить его увлажнения в верхнем слое можно назвать условно «критической скоростью вентилирования». В общем случае она будет зависеть от начальной влажности и температуры зерна, высоты слоя, начальной температуры и относительной влажности охлаждающего воздуха.

В диапазоне высоты слоя зерна риса и пшеницы от 2 до 6 м, температуры 40-50⁰С, влажности 16,2-17,0%, охлаждаемого воздуха температурой 10-20⁰С при относительной влажности 50-80% эту величину можно определить по эмпирической зависимости:

$$V_{кр} = 0,6 + 2,3H_0, \quad (1)$$

где $V_{кр}$ – «критическая» скорость вентилирования, см/с;

H_0 – высота слоя зерна, м

Продолжительность охлаждения зерна риса при равной начальной влажности и температуре несколько меньше, чем зерна пшеницы, одновременно больше величина снижения влажности, что объясняется более интенсивным испарением влаги из цветковых пленок зерна риса.

С ростом скорости фильтрации воздуха с 5-7 до 15-20 см/с продолжительность охлаждения уменьшается в среднем для зерна риса с 10 до 3,5 ч, а для зерна пшеницы с 12 до 5ч. При этом сьем влаги для зерна риса возрастает с 1,2 до 1,7%, для зерна пшеницы – с 0,5 до 1,5% (рис.3а).

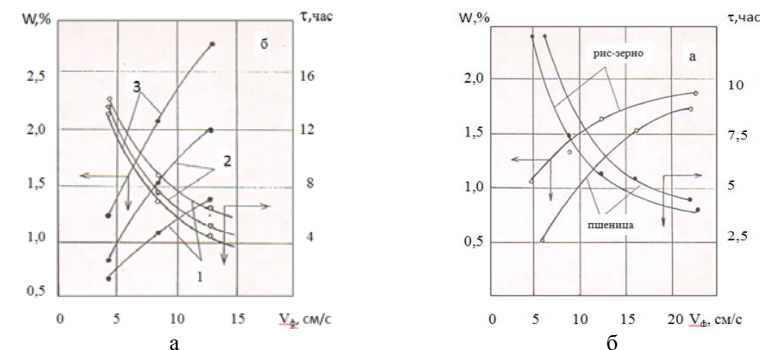


Рис.3. Изменение влажности (а) и продолжительности (б) охлаждения слоя зерна от скорости фильтрации воздуха:

а - начальная влажность зерна $W_n = 16,7\%$, начальная температура зерна $\Theta_n = 49,7^{\circ}\text{C}$, температура охлаждающего воздуха $t_0 = 17,5^{\circ}\text{C}$, высота слоя зерна $H_0 = 4,2\text{ м}$;

б – начальная влажность зерна пшеницы $W_n = 15,2\%$, 2 – 17,0, 3 – 18,2. Начальная температура $\Theta_n = 46,6^{\circ}\text{C}$, температура охлаждающего воздуха $t_0 = 19,5^{\circ}\text{C}$, высота слоя зерна $H_0 = 1,6\text{ м}$.

С увеличением начальной влажности зерна увеличивается количество испаряемой влаги и уменьшается продолжительность охлаждения (рис.3б). При скорости фильтрации воздуха 4,9 см/с для слоя зерна пшеницы высотой 1,6 м с увеличением начальной влажности зерна с 15,2 до 18,2% величина снижения влажности возрастает с 0,75 до 1,25%, а при скорости фильтрации 12,2 см/с – с 1,45 до 2,75%. При этом продолжительность охлаждения при низких скоростях фильтрации незначительно зависит от влажности зерна, но с увеличением скорости фильтрации воздуха влияние влажности зерна возрастает. При скорости фильтрации воздуха 12,2 см/с и увеличении влажности зерна с 15,2 до 18,0% продолжительность охлаждения снижается с 6,3 до 4,3 часов.

Полученные результаты по количеству испаренной влаги из нагретого зерна и продолжительности охлаждения удовлетворительно согласуются с данными [2,3].

Для расчета продолжительности охлаждения нагретого слоя зерна и величины снижения влажности получены уравнения регрессии:

- для зерна пшеницы:

$$\tau = 7,58 + 0,75 H_0 - 0,15 W_n + 0,35(\Theta_n - t_0) - 0,67 V_{\phi}, \quad (2)$$

$$\Delta W = 0,33 W_n - 0,24 H_0 - 0,02(\Theta_n - t_0) + 0,09 V_{\phi} - 3,78, \quad (3)$$

- для зерна риса:

$$\tau = 12,76 + 1,99 H_0 - 1,09 W_n + 0,34(\Theta_n - t_0) - 0,45 V_{\phi}, \quad (4)$$

$$\Delta W = 0,42 W_n - 0,26 H_0 - 0,065(\Theta_n - t_0) + 0,05 V_{\phi} - 3,0. \quad (5)$$

Множественные коэффициенты корреляции уравнений (2) и (3) составляют 0,93 и 0,94; уравнений (4) и (5) – 0,97 и 0,98.

Область определения уравнений (2) и (3): $1,6 \leq H_0 \leq 4,4\text{ м}$; $15,1 \leq W_n \leq 18,5\%$; $23,8 \leq (\Theta_n - t_0) \leq 35,8^{\circ}\text{C}$; $4,2 \leq V_{\phi} \leq 16,0\text{ см/с}$; $43,3 \leq \Theta_n \leq 53,0^{\circ}\text{C}$; $15,1 \leq t_0 \leq 19,8^{\circ}\text{C}$.

Область определения уравнений (4) и (5): $2,0 \leq H_0 \leq 6,0\text{ м}$; $16,2 \leq W_n \leq 17,2\%$; $24,7 \leq (\Theta_n - t_0) \leq 37,0^{\circ}\text{C}$; $4,2 \leq V_{\phi} \leq 16,5\text{ см/с}$; $37,1 \leq \Theta_n \leq 55,0^{\circ}\text{C}$; $8,0 \leq t_0 \leq 20,0^{\circ}\text{C}$.

В практике активного вентилирования на элеваторах и хлебоприемных предприятиях используется величина удельных подач воздуха q (м³/(ч.т) представляющая собой отношение расхода воздуха на одну тонну вентилируемого зерна. С учетом этого

параметра получены уравнения регрессии для зерна пшеницы и риса при расчете продолжительности вентилирования и величины снижения влажности:

$$\tau = \exp[5,02 - 0,15 W_n - 0,059(\Theta_n - t_0) - 0,0051q], \quad (6)$$

$$\Delta W = 0,337 W_n + 0,016(\Theta_n - t_0) + 0,004 q - 5,59, \quad (7)$$

Множественные коэффициенты корреляции уравнений (6) и (7) составляют 0,92 и 0,91. Область определения уравнений (6) и (7): $15,1 \leq W_n \leq 18,5\%$; $23,8 \leq (\Theta_n - t_0) \leq 35,2^\circ\text{C}$; $19 \leq q \leq 375$.

Уравнения (6) и (7) отражают теплофизические процессы, происходящие в слое нагретого зерна при его охлаждении. Так, продолжительность охлаждения уменьшается с ростом начальной влажности зерна за счет испарения влаги, а также с увеличением удельных подач воздуха, за счет увеличения скорости его фильтрации, и снижения температуры охлаждающего воздуха. Величина снижения влажности увеличивается с ростом начальной влажности и температуры зерна, а также удельных подач воздуха за счет увеличения его скорости в указанном диапазоне изменения этих параметров.

Полученные результаты послужили основанием для разработки режимов охлаждения зерна в технологиях «драйэрации» при ее производственной проверке на различных зерносушилках и системах активного вентилирования [4].

Выводы.

1. Приведенные исследования показывают, что процессе «драйэрации» происходит не только выравнивание зерновой массы по влажности и температуре, но и досушивание зерна. Вместе с тем, эффективность этого процесса существенно зависит от режимных параметров. Полученные данные подтверждают вывод о необходимости в процессе «драйэрации» установления оптимального значения скорости охлаждения зерна после сушки для максимального испарения из него влаги за счет теплоты, ранее затраченной на нагрев зерна.

2. Установлена минимальная скорость фильтрации воздуха при активном вентилировании нагретого зерна в зависимости от высоты слоя в области исследуемых параметров, при которой не будет происходить его увлажнение в верхнем слое, которую предложено назвать условно «критической скоростью вентилирования».

3. Для расчета продолжительности охлаждения нагретого слоя зерна пшеницы и риса-зерна и величины снижения влажности получены уравнения регрессии в зависимости от скорости фильтрации воздуха, высоты слоя, начальной влажности зерна, разницы между температурой нагретого зерна и охлаждающего воздуха, а также от удельных подач воздуха для практического использования.

Список литературы.

1. Сорочинский В.Ф. Повышение эффективности конвективной сушки и охлаждения зерна на основе интенсификации тепломассообменных процессов: дис. ... докт. техн. наук. М., 2003.

2. Есаков В.Т. Двухстадийная энергосберегающая сушка зерна на предприятиях АПК: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1986.

3. Анискин В.И. Технологические и технические решения проблемы сохранности зерна в сельском хозяйстве: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1985.

4. Сорочинский В.Ф. Применение активного вентилирования в технологии двухстадийной сушки зерна (Четвертая Междун. научно-практич. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка) (СЭТТ-2011)» (20–23 сентября 2011, Москва, Россия): сборник трудов, том 2, секция 4 / ФГОУ МПО МГАУ им. В.П. Горячкина. – М., 2011. – С. 26–32.

УДК 66.047.3.085.1: 633.85

СОВМЕЩЕННЫЙ ПРОЦЕСС СУШКИ И СТИМУЛЯЦИИ СЕМЯН С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ COMBINED SEEDS DRYING AND STIMULATING PROCESS WITH PULSED INFRARED RADIATION

С.П. Рудобашта*, Г.А. Зуева, Н.А. Зуев*, Е.Ю. Зотова***
S.P. Rudobashta*, G.A. Zueva**, N.A. Zuev*, E.U. Zotova*****

** Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия, Москва,
(e-mail: rudobashta@mail.ru)*

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

*** Ивановский государственный химико-технологический университет,
Россия, Иваново,
(e-mail: zueva_galina15@mail.ru)*

Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia, Ivanovo

**** Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. академика
Д.К. Беляева, Россия, Иваново,*

Ivanovo State Agrarian Academy named after academician D.K. Belyaev

Аннотация. Изучено стимулирующее воздействие осциллирующей инфракрасной сушки семян сельскохозяйственных культур, обладающих разной всхожестью. Стимулирующее воздействие оценивали по изменению энергии прорастания и всхожести семян. В опытах варьировали длительность предварительного увлажнения семян, длительности осциллирующей ИК-сушки, длительности хранения семян после ИК-сушки. Установлены режимы процесса осциллирующей инфракрасной сушки, при которых оказывается оптимальное стимулирующее действие на семена. Показано, что эффект стимуляции сохраняется длительное время.

Abstract. The stimulating effect of the oscillating infrared drying seed crops, which have different germination, has been studied. The stimulating effect was evaluated for change in the germination energy and germination degree. The duration of prewetting seeds, the duration oscillating IR drying, seed storage duration after IR drying are varied in experiments. The regimes of oscillating infrared drying process is given, which has the optimum stimulating effect on seeds. It is shown that the stimulation effect continues for a long time storage.

Ключевые слова: семена горчицы и лука, осциллирующая инфракрасная сушка, энергия прорастания, всхожесть семян, стимуляция семян.

Keywords: mustard seeds and onion seeds, oscillating infrared drying, germination energy, germination degree, seeds stimulation

Эффективным способом стимуляции семян сельскохозяйственных культур, т.е. улучшения их посевных качеств - повышения энергии прорастания и всхожести, является импульсная (осциллирующая) инфракрасная термообработка (ИК-сушка) семян, которая может проводиться как после сбора семян (ИК-сушка семян с полевой влажностью), так и непосредственно перед посевом, когда семена замачиваются и подвергаются импульсной инфракрасной ИК-сушке исключительно с целью стимуляции [1]. Осциллирующий режим сушки материалов в электромагнитном поле заключается в чередовании стадий облучения материала со стадиями охлаждения материала при выключенном источнике облучения путем обдува материала газовой средой с невысокой температурой. Такой щадящий режим позволяет избежать перегрева материала, поддерживать температуру высушиваемого материала в заданных пределах и тем самым сохранять высокие посевные качества. Кроме того, как показано в [1-3], импульсная (осцил-

лирующая) сушка семян, проводимая при колебании температуры материала в диапазоне от 34°C до 40°C не только сохраняет посевные качества семян, но и стимулирует их, вызывая увеличение энергии прорастания и всхожести.

Разработка аппаратурно-технологического оформления процесса импульсной ИК-сушки семян требует построения математической модели процесса термообработки и исследования оптимальных технологических режимов и параметров с целью достижения наибольшего стимулирующего эффекта. Нами разработана математическая модель тепломассопереноса при сушке в осциллирующем электромагнитном поле, адекватная реальному процессу [4]. В данной работе исследовали режимы и параметры технологии импульсной инфракрасной термообработки семян сельскохозяйственных культур, при которых достигается наибольший эффект стимуляции, снижаются затраты на сушку, посев и повышаются посевные качества семенного материала.

Ранее было установлено, что осциллирующая ИК-сушка, проводимая с семенами, собранными с поля, не только обеспечивает быстрое обезвоживание материала, но и вызывает их стимуляцию, выражающуюся в увеличении их энергии прорастания и всхожести [2,3]. В связи с этим в данной работе были проведены экспериментальные исследования уже по целенаправленной предпосевной стимуляции семян путем их предварительного замачивания и последующей осциллирующей ИК-сушке. Опыты проводили на установке, снабженной системой автоматического регулирования температуры. В качестве излучателей использовали лампы OSRAM Siccatherm, поскольку они, как было показано ранее, дают наибольший стимулирующий эффект [2].

Семена высушивали в монослое при постоянном его обдуве атмосферным потоком воздуха. Температура поверхности семян в процессе сушки осциллировала в пределах от $t_{\min} = 34^{\circ}\text{C}$ до $t_{\max} = 40^{\circ}\text{C}$. Исследования проводили с семенами, обладающими разной всхожестью: семенами горчицы белой сорта ВНИИМК-12, имеющей высокую всхожесть, и семенами лука репчатого сорта Штутгартер ризен, имеющем низкую всхожесть.

Варьировали следующие параметры процесса: время предварительного замачивания семян и длительность ИК-сушки. Определяли их влияние на всхожесть (В, %) и энергию прорастания (ЭП, %) семян.

Опыты по определению этих показателей проводили в 4-х кратной повторности согласно ГОСТ 12038-84. Стимулированные семена, а также контрольные образцы семян высевали на фильтровальную бумагу и проращивали при 20°C в растильях в течение времени, которое определено соответствующим нормативным документом (таблица 1).

Таблица 1. Условия проращивания семян согласно ГОСТ 12038-84

Культура	Условия проращивания				Срок определения, сут.		Дополнительное условие для семян, находящихся в состоянии покоя
	Ложе	Температура, °С		Освещенность			
		Постоянная	Переменная		Энергия прорастания	Всхожесть	
Горчица белая	НБ	20	20-30	Т	3	6	Предварительное охлаждение; KNO ₃
Лук репчатый	МБ, НБ	15- 20	-	Т	5	12	Предварительное охлаждение

Условные обозначения: НБ - на фильтровальной бумаге; МБ - между слоями фильтровальной бумаги; Т - темнота.

Для определения влагосодержания семян, как после замачивания, так и конечной - после ИК-сушки, пользовались руководящим нормативным материалом ГОСТ 12041-82.

В опытах варьировали вид семян, длительность замачивания, длительность сушки, длительность хранения семян после ИК-стимуляции.

В [1] представлены результаты нашего исследования влияния энергии прорастания и всхожести семян горчицы белой при сушке импульсным ИК-способом. Было выявлено, что наибольший стимулирующий эффект (увеличение всхожести на 6,5 % и энергии прорастания на 15 % по сравнению с контролем) происходит при предварительном замачивании семян горчицы в течение 3 часов и длительности импульсной ИК-сушки 60 мин. За контроль в опытах принимали всхожесть и энергию прорастания семян, высушенных в естественных условиях.

Исследования показали, что предпосевную ИК-стимуляцию целесообразно проводить в первую очередь применительно к семенам с плохой всхожестью, представителем которых, как было отмечено, являются семена лука репчатого. На рисунках 1, 2 приведены данные по результатам предпосевной ИК-сушки (стимуляции) семян лука.

Результаты проведенных опытов по определению влияния начальной влажности (времени предварительного замачивания) на энергию прорастания и всхожесть представлены на рис.1. Продолжительность импульсной ИК-сушки (термообработки) для всех опытов этой серии устанавливали одну и ту же (40 мин). Предварительные исследования показали, что именно при этой продолжительности ИК-сушки достигался наибольший стимулирующий эффект для семян лука. Из рисунка видно, что максимальный стимулирующий эффект имеет место при замачивании семян лука в течение 3 часов. Энергия прорастания возрастает с 13 % (для необработанных семян) до 73%, а всхожесть с 50 % до 84 %. Вместе с тем можно заметить, что предварительное замачивание семян лука даже в течение 10 минут вызывает резкое повышение энергии прорастания и всхожести семян, по сравнению с неувлажненными (исходными) семенами (всхожесть возрастает до 83%, а энергия прорастания – до 72%). Дальнейшее увеличение длительности времени замачивания приводит к незначительным изменениям указанных показателей стимуляции.

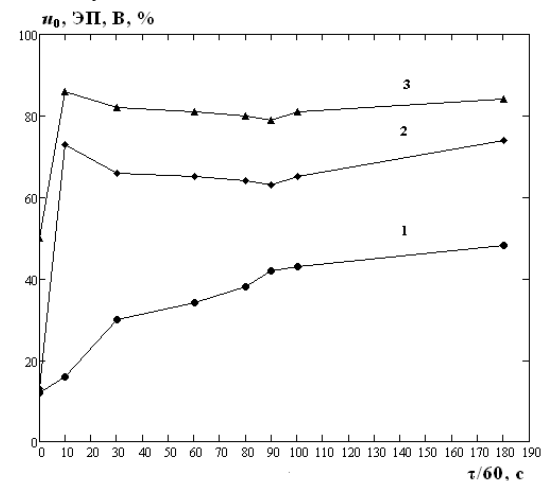


Рис. 1. Зависимость начального влагосодержания u_0 , % (1), энергии прорастания ЭП, % (2), всхожести В, % (3) семян лука от времени замачивания при одной и той же продолжительности ИК-сушки 40 мин (контроль: начальное влагосодержание 12 %, энергия прорастания 13%, всхожесть 50 %)

Результаты проведенных опытов по определению влияния начальной влажности (времени предварительного замачивания) на энергию прорастания и всхожесть представлены на рис.1. Продолжительность импульсной ИК-сушки (термообработки) для всех опытов этой серии устанавливали одну и ту же (40 мин). Предварительные исследования показали, что именно при этой продолжительности ИК-сушки достигался наибольший стимулирующий эффект для семян лука. Из рисунка видно, что максимальный стимулирующий эффект имеет место при замачивании семян лука в течение 3 часов. Энергия прорастания возрастает с 13 % (для необработанных семян) до 73%, а всхожесть с 50 % до 84 %. Вместе с тем можно заметить, что предварительное замачивание семян лука даже в течение 10 минут вызывает резкое повышение энергии прорастания и всхожести семян, по сравнению с неувлажненными (исходными) семенами (всхожесть возрастает до 83%, а энергия прорастания – до 72%). Дальнейшее увеличение длительности времени замачивания приводит к несущественным изменениям указанных показателей стимуляции.

За контроль в опытах принимались всхожесть и энергия прорастания семян, высушенных в естественных условиях.

Таким образом, результаты эксперимента показали, что в случае с луком наблюдается большой стимулирующий эффект. Так, при длительности замачивания 3 часа и длительности импульсной ИК-сушки 40 мин всхожесть семян лука увеличивается на 68 %, а энергия прорастания – в 4,6 раза по сравнению с контролем.

На рисунке 2 представлены результаты экспериментального исследования длительности импульсной ИК-термообработки на энергию прорастания и всхожесть семян. Время замачивания, следовательно, и начальную влажность для всех экспериментальных точек устанавливали одну и ту же - 3 часа. Как отмечено выше, эта длительность замачивания соответствует начальной влажности, при которой достигается лучший эффект стимуляции семян лука. Как видно из рисунка 2 максимальный эффект стимуляции достигается при длительности импульсной ИК-термообработки, равной 40 мин.

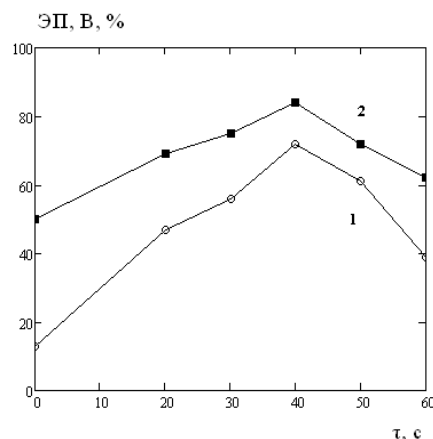


Рис. 2. Зависимость энергии прорастания ЭП, % (1) и всхожести В, % (2) семян лука от продолжительности ИК-сушки при одинаковой длительности замачивания (3 часа)

Было также установлено, что эффект стимуляции сохраняется длительное время, о чем свидетельствуют данные таблицы 2. Это означает, что стимулировать семена можно как непосредственно перед посевом, так и в процессе сушки семян, собранных с поля, – применяя осциллирующий ИК- способ.

Таблица 2. Влияние длительности хранения семян на стимулирующий эффект

№	тип семян	контроль		высадили сразу после ИК-сушки		высадили через 4 месяца		высадили через 8 месяцев	
		ЭП, %	В, %	ЭП, %	В, %	ЭП, %	В, %	ЭП, %	В, %
1	горчица	85	93 ± 3	92	95 ± 4	95	99 ± 1	94	98 ± 2
2	пшеница	87	92 ± 4	89	97 ± 5	91	97 ± 4	97	99 ± 1
3	лук	13	50 ± 3	73	84 ± 6	65	71 ± 3	60	70 ± 4

Выводы.

1. Проведенные исследования показывают, что предпосевная обработка семян путем их замачивания и последующей осциллирующей ИК-сушки вызывает значительную стимуляцию семян и поэтому может быть рекомендована в производство.

2. Стимуляция семян способом осциллирующей ИК-сушки наиболее эффективна для жизнеспособных семян с пониженными посевными качествами, к числу которых относятся, в частности, семена лука репчатого Штутгартер ризен.

3. Эффект стимуляции семян, полученный в результате их осциллирующей ИК-сушки, сохраняется в течение 8 месяцев и, возможно, дольше, поэтому этот способ стимуляции можно применять не только в качестве предпосевной обработки семян, но и при сушке семян, собранных с поля.

Список литературы

1. Зуев Н.А., Рудобашта С.П., Зотова Е.Ю., Зуева Г.А. Исследование энергии прорастания и всхожести семян горчицы при сушке импульсным ИК-способом // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. Агроинженерия. 2011. №2 (47). - С. 7-10.
2. Григорьев И.В. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур, нетрадиционных и редких растений. Дисс. ... к.т.н.: 05.20.02. МГАУ. Москва. 2010. - 210 с.
3. Григорьев И.В., Рудобашта С.П. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. Серия Агроинженерия. 2009. №4 (35). - С. 7-10.
4. Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуев Н.А. Тепломассоперенос при сушке в осциллирующем электромагнитном поле// Теоретические основы химической технологии. 2011. Т.45, №6. - С. 641-647.

УДК 631.365.22

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕРНА В ШАХТНЫХ СУШИЛКАХ

OPTIMIZATION OF THE SYSTEM OF CONTROLLING THE TEMPERATURE OF THE GRAIN IN SHAFT DRIERS

Н.М. Андрианов *, А.В. Николаенко *, Шуньчи Мэй **, Юн Сюе **
N. M. Andrianov *, A. V. Nikolaenok *, Shunqi Mei **, Yong Xue **

*Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

Novgorod State University,

**Уханьский текстильный университет

**Wuhan Textile University

Аннотация: Предложена система, обеспечивающая распределенный контроль и адаптивное регулирование температуры зерна в шахтной сушилке.

Abstract: System provides distributed monitoring and adaptive control of grain temperature in the shaft dryer is offered.

Ключевые слова: зерно, сушка, шахтные сушилки, тепловые режимы.

Keywords: grain, drying, silo dryers, thermal regimes.

Введение. В шахтных сушилках, кроме абсолютных значений допустимого нагрева зерна, дополнительно задаются ограничения на разброс этих значений во времени и пространстве. Для интенсификации сушки необходимо повышать надежность оперативного контроля температуры зерна, что обеспечивается не только точностью измерительного оборудования, но и рациональной структурой системы управления.

Задачей исследования являлось изучение динамики процессов нагрева зерна в сушилке с целью обоснования структуры системы регулирования его температуры.

Результаты исследования. Сушилка сложная динамическая система [1, 2], входные и выходные переменные, которой взаимосвязаны. Состояние процесса определяется температурой $\Theta_3(t)$ и влажностью $W(t)$ зерна, их начальные значения $\Theta_{30}(t)$ и $W_0(t)$ определяют условия сушки, а температура теплоносителя $\Theta_1(t)$ и экспозиция $\omega(t)$ – режим обработки. Переменные $\Theta_{30}(t)$ и $W_0(t)$ в течение времени изменяются стохастически, что возбуждает колебания переменных $\Theta_3(t)$ и $W(t)$ в интервале, превышающем агротехнический допуск. Период колебаний существенных частот сопоставим с экспозицией.

Взаимные корреляционные функции процессов по каналам преобразования возмущающих воздействий подтверждают существование между ними тесной корреляционной связи, сдвиг максимума которой, практически равен экспозиции. Коэффициенты взаимной корреляции процессов $W_0(t) - \Theta_3(t)$ и $W(t) - \Theta_3(t)$ в зависимости от режима сушки переменны и принимают как положительные, так и отрицательные значения (табл. 1). При низких влажностях зерна ($W_0 < 20\%$) коэффициенты отрицательны, а при

высоких – положительны. Корреляционной связи процессов $\Theta_{30}(t) - \Theta_3(t)$ не обнаружено, но обнаружена тесная связь процессов $W_0(t) - \Theta_3(t)$, чем подтверждается, что основным возмущающим воздействием сушки являются колебания $W_0(t)$. Наибольшие значения коэффициента корреляции процессов $W(t) - \Theta_3(t)$ соответствуют зерновому слою с низкой влажностью ($W < 16\%$), что подтверждает возможность косвенной оценки его влажности по температуре нагрева. Это можно использовать в системах для принятия оперативного решения об окончании сушки.

Таблица 1. Коэффициенты взаимной корреляции процессов

Наименование процессов	Диапазон изменения
$W_0(t) - \Theta_3(t)$	-0,48...0,32
$W_0(t) - W(t)$	0,37...0,61
$W(t) - \Theta_3(t)$	-0,77...0,39

Наибольшее и однозначное влияние на Θ_3 оказывает температура теплоносителя Θ_1 , а на влажность W экспозиция ω [2]. Изменение ω неоднозначно влияет на Θ_3 , из чего следует, что ее нельзя использовать для управления температурой Θ_3 . Таким образом, в системе Θ_1 должна использоваться для управления температурой зерна, а ω для управления его влажностью.

При постоянной температуре теплоносителя Θ_1 изменение W_0 и ω ведут к изменению температуры зерна Θ_3 . Это подтверждает, что стабилизация Θ_1 не обеспечивает стабилизации Θ_3 . Для повышения качества регулирования в системе должен быть реализован принцип стабилизации не температуры, а количества теплоты, подаваемой в сушильную камеру теплоносителем [2, 3].

Динамические свойства сушилки (табл. 2) в различных по высоте зонах описываются разными передаточными функциями, что обусловлено качественными отличиями протекающих в них процессов [1]. Изменчивость по высоте сушилки значений параметров передаточных функций (табл. 3) характеризует её как распределенную динамическую систему, постоянные времени которой возрастают в направлении увеличения ряда коробов.

Таблица 2. Передаточные функции и статические коэффициенты передачи сушилки СЗШ-8

Канал передачи	Статический коэффициент передачи		Передаточная функция	
	Единица измерения	Пределы изменения	2–4 ряд коробов	6–15 ряд коробов
$\Theta_1 - \Theta_3$	°C/°C	0,035–0,351	$\frac{K_{\Theta_1, \Theta_3} \cdot e^{-\tau_{01} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	
$\square - \Theta_3$	$\frac{K_{\Theta_2, \Theta_3} \cdot e^{-\tau_{02} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	°C/мин ⁻¹	$\frac{K_{\Theta_2, \Theta_3}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	
$\frac{W_0 - \square_3}{\frac{K_{\omega \Theta_3} (T'' \cdot p^2 + T' \cdot p + 1)}{T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}}$	°C/%	-1,769–1,009	$K_{W_0, \Theta_3} \cdot e^{-\tau \cdot p}$	

Таблица 3. Постоянные времени передаточных функций

Постоянная времени	Пределы изменения по каналам передачи, мин	
	$\Theta_1 - \Theta_3$	$\omega - \Theta_3$
T_1	10,06–19,53	-25,83–(-14,24)
T_2	4,49–9,23	7,69–14,39
T_3	–	-7,98–(-4,61)
T'		–
-2,19–68,21 T''		–
69,14–46,12 τ_0	3,7–5,1	–

$$K_{W_0, \Theta_3} \cdot e^{-\tau \cdot p}$$

Неравномерность процессов оценивали в нижнем сечении сушилки. Разброс влажности в отдельных точках сечения достигает $\pm 2,5\%$, а температуры $\pm 7^\circ\text{C}$, что превышает агротребования. Неодинаковый нагрев зерна обуславливает необходимость построения многоточечной системы, а неоднозначность приращения температуры зерна при изменении W и ω подтверждает, что в горизонтальном сечении невозможно заранее определить место, в котором на всех режимах наблюдался бы его максимальный нагрев. Это обуславливает необходимость применения поисковых алгоритмов.

Предлагаемая система [4, 5] (рис. 1) содержит камеру сушки 1 с выгрузным аппаратом 2. Теплоноситель из теплогенератора 3, подается в камеру сушки через диффузор 4, а удаляется из нее вентилятором через диффузор 5. Изменение температуры теплоносителя осуществляется регулирующим органом 6, а изменение скорости газа в зерновом слое – регу-

лирующим органом 7. Стабилизация тепловых режимов осуществляется двумя независимыми контурами – регулирования температуры и скорости теплоносителя. Каждый из контуров содержит датчик 12 (13), задатчик 14 (15) и элемент сравнения 16 (17), который через регулирующий прибор 18 (19) соединен с регулирующим органом 6 (7). Одновременная стабилизация температуры и массовой подачи теплоносителя обеспечивает стабилизацию подачи теплоты.

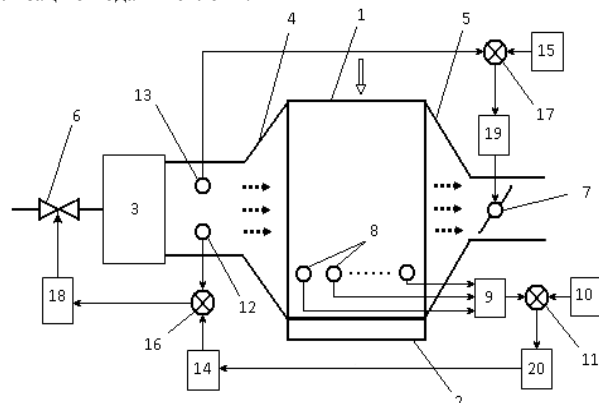


Рис. 1. Схема системы регулирования температуры зерна (обозначения в тексте): \Rightarrow – направление движения зерна; $\bullet\bullet\bullet$ – направление движения теплоносителя

Система контроля температуры зерна включает датчики 8, блок селекции 9, выделяющий максимальный сигнал, задатчик 10 и элемент сравнения 11, сигнал рассогласования которого через корректирующий элемент 20 изменяет задание подчиненного контура регулирования температуры теплоносителя. Система обеспечивает распределенный контроль и адаптивное регулирование температуры зерна, что повышает точность поддержания тепловых режимов и интенсифицирует сушку.

Список литературы

1. Андрианов Н. М. Исследование шахтной зерносушилки как объекта управления // Успехи современного естествознания. 2004. № 9. С. 86-91.
2. Андрианов Н. М., Галкин А. Д. Регулирование тепловых режимов в сушилке с гравитационным движущимся слоем // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 4. С. 30-33.
3. Колесов Л. В., Андрианов Н. М. Исследование средств управления температурой теплоносителя топочного агрегата // Техника в сельском хозяйстве. 1988. № 1. С. 49-51.
4. Колесов Л. В., Андрианов Н. М. Устройство для контроля и регулирования температуры // Авторское свидетельство SU 1425622. 1988, Бюл. № 35.
5. Колесов Л. В., Андрианов Н. М. и др. Способ автоматического регулирования процесса сушки зерна и устройство для его осуществления // Патент RU 2135917. 1999, Бюл. № 24.

УДК 664.732 : [663.1 : 582.661.21] : 531.3

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ ЗЕРНА АМАРАНТА STUDY OF THE KINETICS OF DRYING OF GRAIN AMARANTH

Георгий Н. Станкевич*, Н.А. Валентюк**
Georgiy N. Stankevich*, N.A. Valentyuk**

*Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса,
(e-mail: georg-st@mail.ru).

**Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса,
(e-mail: naval100@mail.ru).

Odessa National Academy of Food Technologies Ukraine Odessa

Аннотация: Проведено исследование кинетики процесса конвективной сушки зерна амаранта при использовании различных режимов. Предложенные режимы конвективной сушки обеспечивают снижение влажности зерна амаранта и позволяют сохранить его качество до последующей целевой переработки.

Abstract: The convection drying kinetics of amaranth grain has been investigated using various modes. The proposed convection drying modes provide for dehumidifying of the amaranth grain and allow you to keep the quality up to the subsequent target processing.

Ключевые слова: зерно, амарант, сушка, кинетика сушки, обработка.

Keywords: grain, amaranth, drying, drying kinetic, processing.

Введение. Одной из основных задач, обеспечивающих развитие пищевой промышленности, является производство продуктов питания высокого качества, обеспечивающих удовлетворение потребительского спроса, как на внутреннем, так и на внешнем рынках. К прогрессивным направлениям развития пищевой и перерабатывающей промышленности относится использование для производства пищевой продукции нетрадиционных видов сырья. К одному из таких, нетрадиционных для Украины видов сырья относится зерно амаранта.

Амарант является зерновой культурой, которую применяют в различных отраслях народного хозяйства (пищевой, медицине, животноводстве) многих стран мира. Особенностью амаранта является то, что в его химический состав, по сравнению с традиционно культивируемыми и выращиваемыми в Украине зерновыми культурами, входит сравнительно большое количество энергетически и биологически ценных веществ, соотношение и состав которых формирует уникальные особенности и высокие потребительские свойства продуктов переработки амаранта, например, богатое скваленом амарантовое масло [1].

Природно-климатические условия Украины и ботанические особенности данной культуры, такие как неравномерность созревания семян в метелках, поздний и растянутый период созревания, обуславливают довольно высокую (20...22 %) влажность амаранта в период уборки урожая. Наличие в химическом составе зерна данной культуры 4...7 % высокоценного масла обуславливает допустимую влажность при хранении не более 10 %. Для снижения влажности свежесобранного зерна амаранта необходимо применять щадящие режимы сушки для сохранения уникального, сбалансированного по аминокислотному составу белка [2].

Целью работы было исследование закономерностей кинетики конвективной сушки и нагрева зерна амаранта для обоснования рациональных режимов его сушки и хранения.

Объектом исследования было зерно амаранта сорта «Ультра» урожая 2014 г., выращенное в хозяйствах Одесской обл. Конвективную сушку амаранта нагретым воздухом проводили на экспериментальных стендах кафедры технологии хранения зерна ОНАПТ с использованием общеизвестных методов исследования [3]. Для проведения

исследования использовали два образца с исходной влажностью 14,6 % и 19,5 %. Амарант сушили при температуре сушильного агента t равной 50 и 60 °С. Толщина слоя зерна амаранта была принята 0,1 м, скорость сушильного агента 0,6 м/с, что соответствует условиям работы шахтных сушилок.

Результаты и их обсуждение. Математическое описание кинетики процесса сушки проводили на основании экспериментальных кривых сушки и температурных кривых нагрева зерна, которые аппроксимировали уравнениями соответственно

$$w = \frac{a + c\tau + e\tau^2}{1 + b\tau + d\tau^2}, \quad \theta = \theta_0 + \frac{\tau}{m + n\tau}, \quad (1)$$

где w – текущее влагосодержание амаранта, %;

τ – продолжительность сушки, мин.;

θ, θ_0 – текущая и начальная температура зерна амаранта, °С;

a – коэффициент, численно равный начальному влагосодержанию зерна w_0 , %;

b, c, d, e, m, n – коэффициенты, значения которых зависят от режимов обработки зерна амаранта и определяются методом наименьших квадратов (табл. 1).

Таблица 1 – Значения кинетических коэффициентов для описания кривых сушки и нагрева зерна амаранта

Коэффициенты	Значения коэффициентов при исходной влажности w_0 и температуре t сушильного агента:			
	$w_0 = 19,50\%$		$w_0 = 14,60\%$	
	$t = 60^\circ\text{C}$	$t = 50^\circ\text{C}$	$t = 60^\circ\text{C}$	$t = 50^\circ\text{C}$
Кривые сушки:				
a	24,224	24,224	17,096	17,096
b	–0,04492	–0,03286	–0,07019	–0,05145
c	–1,06731	–0,78431	–1,19999	–0,86055
d	0,001735	0,001033	0,00325	0,002474
e	0,023983	0,013362	0,040975	0,02881
Кривые нагрева:				
m	0,255083	0,453937	0,29945	0,301517
n	0,02357	0,028665	0,02281	0,024579

Результаты аппроксимации экспериментальных данных, выполненные на ЭВМ по разработанному в ОНАПТ программам, показали хорошую сходимость рассчитанных по предложенным уравнениям кинетики (1) значений с экспериментальными данными конвективной сушки зерна амаранта.

На рис. 1 приведены рассчитанные по уравнениям (1) кривые сушки и температурные кривые нагрева зерна амаранта исходной влажностью 19,5 % и 14,6 % (влагосодержание амаранта соответственно равно 17,10 и 24,22 %). Как видно из полученных результатов, при исследованных режимах сушки по достижении кондиционной влажности амаранта, необходимой для надежного хранения, его нагрев не превышал 50 °С. Исследования также показали, что количество сквалена, определенное с использованием хроматоспектрометра, снизилось незначительно, а количество омыляемых веществ (линоленовой, линоленовой, олеиновой, пальмитиновой и стеариновой кислот) осталось неизменным.

Выводы. Проведенные исследования, анализ кинетики процесса сушки и качества просушенного амаранта показали, что конвективная сушки свежесобранного зерна амаранта при температурах сушильного агента 50...60 °С в условиях шахтных зерносушилок позволяет обеспечить его кондиционную влажность и сохранить потребительские свойства.

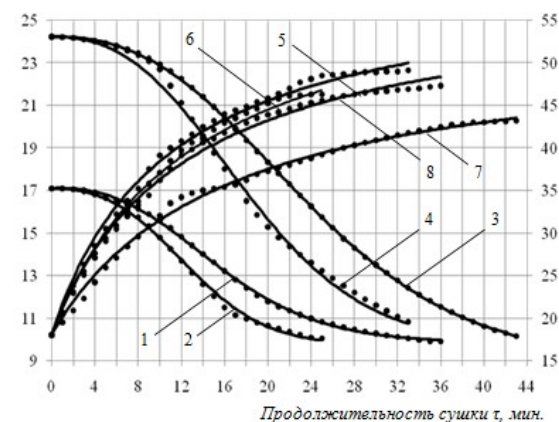


Рисунок 1 – Кривые сушки (1–4) и нагрева (5–8) зерна амаранта с начальным влагосодержанием 17,10 % (1, 2, 5, 6) и 24,22 % (3, 4, 7, 8) при сушке с температурой сушильного агента 50 °С (1, 3, 5, 7) и 60 °С (2, 4, 6, 8)

Список литературы

1. Высочина Г.И. Амарант (*amaranthus l*): химический состав и перспективы использования (обзор) // Химия растительного сырья. – 2013. – №2. – С. 5–14.
2. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Анатазевич В.И. Сушіння зерна: Підручник. - Київ: Либідь, 1997. – 352 с.
3. Сушіння зерна: Лабораторні роботи / Г.М. Станкевич [і др.]. – М.: Колос, 1997. – 136 с.

УДК 664.723.011:633.16

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА ПРОСА IMPROVING THE PROCESS OF DRYING MILLET

Л.К. Овсянникова*, В.В. Юрковская **
L.K. Ovsyannikova*, V.V. Yurkovskaya**

*Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса,
(e-mail: ludok-08@bk.ru).

**Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса,
(e-mail: nika_onaft@mail.ru).

Odessa National Academy of Food Technologies Ukraine Odessa

Аннотация: Данная работа посвящена исследованию процесса двухэтапного способа сушки новых сортов проса (Вітрило, Ювілейне). Этот способ предусматривает два этапа – сушку и охлаждение зерна. Влажное и сырое зерно на первом этапе сушат в конвективных прямоточных зерносушилках в нисходящем температурном режиме до влажности, которая на 1,5...2,0 % превышает кондиционную (для проса – 15,0...15,5 %). На втором этапе зерно направляют в тепломасообменник (емкости для отлежки) и затем охлаждают наружным воздухом до температуры, не превышающей температуру окружающей среды более 10 °С. Исследованы закономерности изменения показателей их качества в процессе сушки. Рассчитаны основные показатели эффективности внедрения технологической линии сушки проса.

Abstract: This paper is devoted to the study of a two-stage drying process of new varieties of millet (Vitry, Yuvileyne). The method comprises two steps - drying and cooling of the grains. Wet and raw grain in the first phase ramjet dried in convective dryers downstream temperature conditions to humidity, which is 1.5...2.0 % higher than the conditioned (for millet – 15.0...15.5 %). The second stage seed directed to teplomasoobmennik (tank binning) and then cooled to ambient air temperature not exceeding ambient temperature over 10 °C. The regularities of changes in indicators of quality in the drying process. Calculated key performance indicators of technological line of drying millet.

Ключевые слова: Просо; двухэтапная сушка; технологическая линия; энергозатраты

Keywords: Millet, two-stage drying, processing line, energy.

С появлением современных сортов проса актуальным является усовершенствование технологии их послеуборочной обработки, применения современных методов сушки и хранения, которое позволит сохранить ценные свойства проса и уменьшить энергозатраты при его обработке.

Процессы сушки и конструкции зерносушилок постоянно совершенствуются. Но возможности снижения расхода топлива и электроэнергии не исчерпаны. Для выбора рациональных температурных режимов сушки мелкосеменных культур, таких как просо, определение производительности зерносушилок при их сушке, а также расходов теплоты и, соответственно, топлива на сушку, необходимо знать, кроме основных свойств данной культуры, и закономерности кинетики их сушки. Известно, что для сушки зерна применяют конвективные зерносушилки.

Постановка задачи: обоснование эффективных режимов термической обработки проса новых сортов (Вітрило, Ювілейне), что позволит снизить энергозатраты на послеуборочной его обработку, улучшить качество и обеспечить их долговременное гарантированное хранение.

Результаты исследования. Исследованы физико-технологические свойства и геометрические показатели свежесобранного зерна проса различных типов при разной влажности, которые могут быть использованы на практике при организации технологического процесса хранения, подготовки и переработки зерна проса для пищевых и кормовых целей.

Установлены закономерности кинетики сушки и охлаждения зерна проса при различных способах термообработки. Главным фактором, влияющим на конечную температуру зерна проса, является температура сушильного агента. На продолжительность процесса сушки и коэффициент сушки в основном влияет начальная влажность зерна. Кроме того, влияет совместное действие температуры сушильного агента и начальной влажности семян. Конечная температура нагревания семян не превышает предельное значение 50 °C (в зависимости от начальной влажности).

Микробиологические показатели зерна проса подтверждают удовлетворительное качество свежесобранного зерна проса и в процессе хранения после его термической обработки, а пробная выпечка хлеба показывает, что зерно проса целесообразно использовать в хлебопекарной промышленности.

Для исследования была составлена математическая модель наиболее распространенной на заготовительных элеваторах и ХПП шахтной прямоточной зерносушилки типа ДСП-32от, в которой можно реализовать двухэтапную технологию сушки зерна по схеме, приведенной на рис. 1.

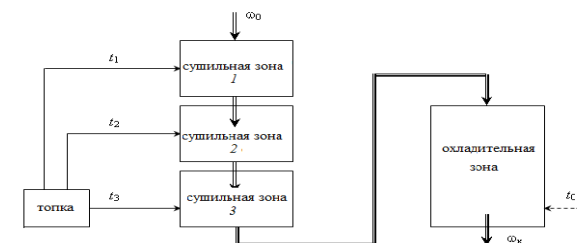


Рисунок 1. Параметрическая схема двухэтапной сушки зерна в зерносушилке типа ДСП-32ОТ

Проведено компьютерное математическое моделирование работы зерносушилок по традиционному и трехступенчатому нисходящему режиму двухэтапного способа сушки зерна проса с начальной влажностью w_0 (18,3...24,2 %). Сущность математической модели и алгоритма расчетов состоит в следующем. Для расчета режимов сушки исходными данными являются влажность w_0 и температура ϑ_0 , т.е. начальные параметры зерна. Объемы сушильных зон V_1 , толщина слоя зерна, скорость агента сушки по зонам и ряд других постоянных величин — конструктивные параметры сушилки. Нормируемая влажность зерна на выходе из сушилки w_k и его температура на выходе из каждой зоны ϑ_1 , $\vartheta_{доп}$ являются граничными условиями. Например, при традиционном способе зерно проса сушили до конечной влажности 13,5 % по двухступенчатому восходящему режиму в соответствии с действующей «Інструкцією по сушінню продовольчого, кормового зерна, насіння олійних культур та експлуатації зерносушарок (Одеса-Київ: ДАК “Хліб України”, 1997. 72 с.).

При двухэтапной сушке зерно проса сушили до влажности 15,5 % по трехступенчатому нисходящему режиму. Для реализации этого режима сушки охлаждающую зону сушилки необходимо подключить газоходом к топке сушилки ДСП-32от. После отволаживания зерна в бункере (силосе), оборудованном системой активного вентилирования, его постепенно охлаждали наружным воздухом.

Шахтную прямоточную зерносушилку рассчитывали с учетом статистики процесса сушки на основе балансовых уравнений. Следует подчеркнуть, что термический к.п.д. сушилок зависит от параметров наружного воздуха. Основные полученные результаты проведенных расчетов зерносушилки при сушке зерна приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Техничко-экономические показатели сушилки

Показатели	Способ сушки	
	традиционный	двухэтапный
Производительность плановая, пл. т/ч	32,00	42,00
Производительность по сырому зерну, т/ч	29,09	38,18
Общее извлечение влаги, %	5,00	7,00
Производительность по выпаренной влаге, т/ч	2,37	3,11
Удельные затраты топлива на сушку зерна, кг/пл. т	11,78	9,79
Термический к.п.д. сушилки, %	51,98	62,35

Анализ приведенных данных показывает, что применение двухэтапного способа сушки позволяет повысить плановую производительность сушилки на 31,2 %, снизить затраты топлива на 20,3 %, а тепловой к.п.д. зерносушилки повысить на 19,9 %.

Использование разработанной математической модели для расчетов прямоточной сушилки позволяет не только выявить технико-экономические показатели ее работы в конкретных условиях, но и рекомендовать более экономичные режимы сушки.

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА THE RESEARCH OF EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT OF THE SEEDS OF SUNFLOWER

Алексей А. Езенков, Станислав П. Рудобашта
Aleksey A. Ezenkov, Stanislav P. Rudobashta

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия, Москва,
(Тел. 8(964)589-59-64 e-mail: Alex702x@yandex.ru).

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

Аннотация: Приведены экспериментальные данные по равновесному влагосодержанию семян подсолнечника: ядра, лузги и семени в целом – при различных температурах, полученные статическим методом с применением насыщенных растворов солей для создания определенных значений влажности воздуха. Полученные изотермы десорбции описаны термодинамическим уравнением Гендерсона. Полученные константы этого уравнения сопоставлены с таковыми для семян других культур.

Abstract: experimental data of equilibrium moisture content of sunflower seeds: kernel, husk and seed in general at different temperatures are shown. The obtained desorption isotherms described by the thermodynamic equation of Henderson.

Ключевые слова: Равновесное влагосодержание, относительная влажность воздуха, изотерма десорбции, семена подсолнечника, семя, ядро, лузга.

Keywords: Equilibrium moisture content, relative humidity, desorption isotherm, sunflower seeds, seed, kernel, husk.

Сушка – это важный технологический процесс послеуборочной обработки семян, необходимый для придания им необходимой влажности, требуемой по условиям хранения. Гигроскопичность семян – одно из важнейших их свойств, определяющих режимы хранения и сушки семян. Знание равновесного влагосодержания семени требуется для определения направления протекания массообменного процесса (сушка или увлажнение), определения движущей силы процесса, в роли которой выступает разность влагосодержаний материала $(u - u_p)$, и правильного выбора климатических условий их хранения. Для семян подсолнечника как коллоидного капиллярно-пористого коллоидного тела характерны все формы связи, которые, по классификации академика Л. А. Ребиндера, подразделяют на химическую, физико-химическую и механическую [1,2].

Равновесная влажность семян подсолнечника, т. е. влажность, при которой семена не отдают и не поглощают влагу, зависит от температуры, относительной влажности атмосферного воздуха, маслянистости семян [3]. При прочих равных условиях равновесная влажность масляных культур в 2 раза меньше, чем зерновых. Это объясняется меньшим содержанием в семенах масляных культур гидрофильных коллоидов и наличием большого количества жира. С увеличением содержания масла в семенах равновесная влажность семян подсолнечника уменьшается, так как с повышением маслянистости, уменьшается содержание гидрофильных веществ и соответственно увеличивается содержание гидрофобных [3]. В [3] приведены данные по гигротермическому равновесию всего семени подсолнечника, согласно которым равновесная влажность семян изменяется в зависимости от относительной влажности воздуха ϕ по зависимости:

$$w_p = 0,623 \cdot \phi^{1,14}, \quad 0,45 < \phi < 0,85. \quad (1)$$

Это уравнение не позволяет рассчитать равновесное влагосодержание семян подсолнечника при различных температурах. Кроме того, семя подсолнечника неоднородно по строению: оно содержит две части, резко отличающиеся по своей структуре и свой-

ствам: ядро и плодую оболочку (лузгу). Для создания уточненной математической модели, описывающей кинетику сушки семени подсолнечника с дифференцированным учетом свойств ядра и лузги, необходимы данные по фазовому концентрационному равновесию этих частей семени.

Целью данной работы являлось экспериментальное определение изотерм десорбции влаги для лузги, ядра и семян подсолнечника в целом при различных температурах.

Исследование проводили на семенах подсолнечника сорта "Лакомка" с маслянистостью до 48-49% статическим методом: влажные семена, ядра и лузга подсолнечника помещали в сосуды с постоянной влажностью воздуха и выдерживали при этих условиях длительное время (около месяца), пока семена не переставали десорбировать влагу в окружающую воздушную среду. Для создания определенной температуры сосуды с семенами помещали в сушильный шкаф, в котором температура поддерживалась автоматически с погрешностью $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Было проведено 3 опыта с температурой, соответственно: 23,5; 35 и 45°C . Для создания определенной относительной влажности воздуха в сосудах (эксикаторах) использовали насыщенные растворы солей (табл.1), значения относительной влажности воздуха над которыми брали согласно [4].

Таблица 1. Соли, использованные в опытах для создания определённых значений относительной влажности воздуха ϕ , %

Соль:	CH ₃ COOK	MgCl ₂	Mg(NO ₃) ₂	NaNO ₂	KJ	NaNO ₃	NaCl	KCL	K ₂ SO ₄
-------	----------------------	-------------------	-----------------------------------	-------------------	----	-------------------	------	-----	--------------------------------

Результаты исследований приведены на рис. 1-3. Как видно из рисунков, полученные изотермы десорбции на исследованном интервале относительной влажности воздуха имеют вид выпуклых кривых, характерных для семян [5-7]. Равновесное влагосодержание составных частей семян подсолнечника неодинаково: она существенно больше у оболочки (лузги) и меньше у ядра. Равновесное влагосодержание семени в целом занимает, как и следовало ожидать, промежуточное положение. Сравнение полученных данных по равновесному влагосодержанию семян подсолнечника с таковым для зерновых культур (пшеница, рожь, ячмень, овес) [6,7], показывает, что оно в среднем на 45% меньше, что, как было пояснено выше, объясняется высоким содержанием в них жира.

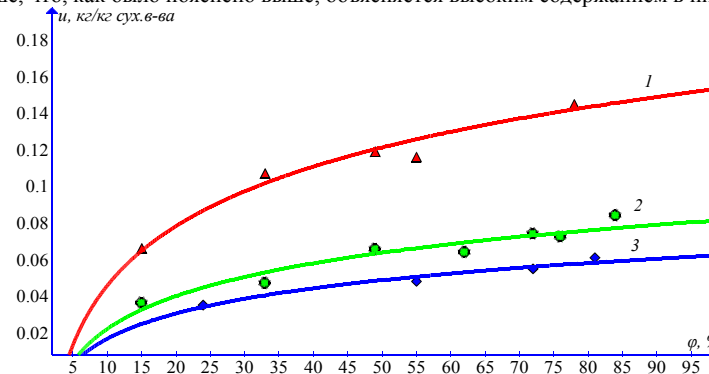


Рис 1. Изотермы десорбции семян подсолнечника сорта "Лакомка" при $t = 35^\circ\text{C}$; 1 – оболочка, 2 – семя в целом, 3 – ядро (точки – эксперимент, линии – расчет по уравнению (2)).

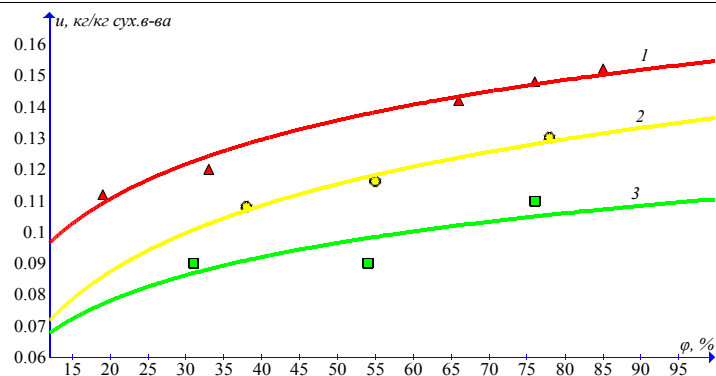


Рис 2. Изотермы десорбции плодовой оболочки (лузги) подсолнечника сорта "Лакомка" при различных температурах t , °C: 1 – 23,5, 2 – 35, 3 – 45 (точки – эксперимент, линии – расчет по уравнению (2)).

Полученные данные по гигротермическому равновесию семян подсолнечника и его составных частей были описаны на основе термодинамического уравнения Гендерсона [9]

$$1 - \delta = (1 + z)^{-1} \exp[1 - 1/(z + 1)] \quad (2)$$

где u_p – равновесное влагосодержание семян, %; T – термодинамическая температура, К; φ – относительная влажность воздуха (доли); a , b – опытные константы.

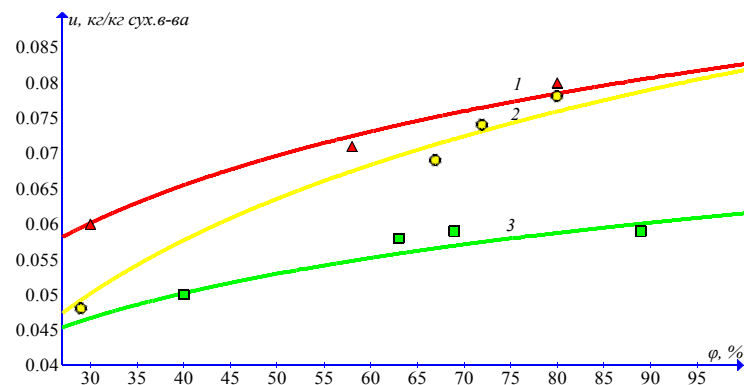


Рис 3. Изотермы десорбции семени (в целом) подсолнечника сорта "Лакомка" при различных температурах t , °C: 1 – 23,5, 2 – 35, 3 – 45 (точки – эксперимент, линии – расчет по уравнению (2)).

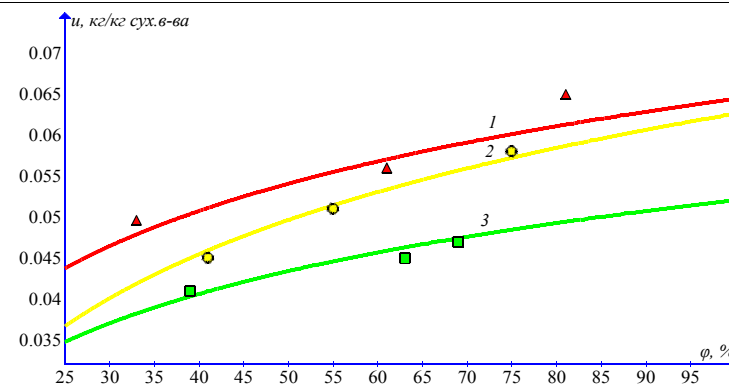


Рис 4. Изотерма десорбции ядра подсолнечника сорта "Лакомка" при различных температурах t , °C: 1 – 23,5, 2 – 35, 3 – 45 (точки – эксперимент, линии – расчет по уравнению (2)).

В результате обработки опытных данных были найдены значения констант этого уравнения: для ядра, для оболочки, для семени в целом (табл.2).

Таблица 2. Значения коэффициентов a и b уравнения Гендерсона, полученные для семени, ядра и оболочки подсолнечника.

Материал	a			b		
	$t = 23,5^\circ\text{C}$	$t = 35^\circ\text{C}$	$t = 45^\circ\text{C}$	$t = 23,5^\circ\text{C}$	$t = 35^\circ\text{C}$	$t = 45^\circ\text{C}$
Семя	$5,25 \cdot 10^{-4}$	$5,89 \cdot 10^{-2}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$	0,198	0,315	0,172
Ядро	$1,91 \cdot 10^{-4}$	$9,46 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-4}$	0,202	0,284	0,211
Оболочка	$5,43 \cdot 10^{-4}$	0,134	$8,19 \cdot 10^{-4}$	0,183	0,271	0,188

На рис. 1- 4 приведены в виде линий зависимости $u_p = f(\varphi)$, построенные по уравнению (2) с использованием констант a и b , приведенных в таблице. Полученные данные могут быть использованы для анализа и кинетического расчета процесса сушки.

Выводы

1. Полученные данные по фазовому концентрационному равновесию ядра и оболочки семян подсолнечника позволяют дифференцированно учитывать их при описании кинетики сушки семени.

2. Константы уравнения Гендерсона для семян подсолнечника отличаются от соответствующих констант для зерновых культур.

2. Полученные значения этих констант позволяет использовать уравнение Гендерсона в технических расчетах для семян подсолнечника.

Обозначения

u – влагосодержание семян, (кг влаги)/(кг сухого материала);

t , T – температура, °C и К соответственно;

w – влажность семян, (кг влаги)/(кг влажного материала);

φ – относительная влажность воздуха.

Индексы: p – равновесный.

Список литературы

1. Лыков А.В. Теория сушки. Изд. 2-е, перер. и доп. М.: Энергия. 1968. – 472 с.
2. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. – 248с.
3. Камышник Л.Д., Журавлев А.П., Хасанова Ф.М. Сушка и хранение семян подсолнечника. М.: Агропромиздат, 1989. – 95 с.
4. Schneider, A. Neue Diagramme zur Bestimmung der relativen Luft - feuchtigkeit über gesättigten, wässrigen Salzlosungen und wässrigen Schwefelsäure - losungen bei verschiedenen Temperaturen // Holz als Roh - und Werkstoff, 1960. Jahrg. 18. Heft 7. S. 269 - 272.
5. Гинзбург А.С., Анискин В.И., Окунь Г.С., Чижиков А.Г. Гигроскопические свойства зерна различных культур. – М.: ЦИНТИ Госкомзагот. СССР, 1967.
6. Гинзбург А.С., Дубровский В.П., Казаков Е.Д., Окунь Г.С., Резчиков В.А. Влага в зерне. М.: «Колос», 1969.
7. Забавин И.С., Рудобашта С.П. Исследование равновесной влажности зерна // Труды международного научно-технического семинара «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов». Воронеж, 2010. С. 330 - 336.
8. С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, Н.А. Зуев. Гигроскопические свойства семян // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. Вып. 1. С. 68-71.
9. Henderson S.M. // Agricultural Engineering. 1952. V. 33. N 1. P. 29 - 32.

УДК 664.723.011-046.46:537.8-962

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ
EXPERIMENTAL SIMULATION OF DRYING PLANT RAW MATERIAL IN ELECTROMAGNETIC FIELD

Игорь И. Яровой
Igor I. Iarovyi

Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса.
(iyarovoy@mail.ru)

Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine.

Аннотация: В статье отражены результаты исследования процессов сушки растительного сырья в среде микроволнового электромагнитного поля.

Abstract: This paper presents the results of research of processes of drying of vegetable raw materials in the environment of the microwave electromagnetic field.

Ключевые слова: влагоизвлечение; сушка растительного сырья; микроволновой нагрев; нагрев в сверхвысокочастотном электромагнитном поле.

Keywords: drying plant raw materials; microwave heating; heating in the microwave electromagnetic field.

Для современных технологий сушки характерно обострение трех основных проблем: энергетическая эффективность процесса влагоизвлечения, экологическая безопасность самой технологии сушки и безопасность полученных высушенных продуктов. На сегодня сушку растительного сырья, зерновых культур в частности, осуществляют преимущественно в шахтных сушильных установках, конвективным способом, применяя в качестве сушильного агента смесь газов - продуктов сгорания углеводородов и атмосферного воздуха. Нельзя считать такую технологию полностью безопасной ни с точки зрения экологии ни с позиции безопасности продуктов, произведенных из высушенного зернового сырья. Не лучшим образом выглядит конвективная сушка и с точки зрения

энергетических затрат, а на фоне роста цен на энергоносители, эта сторона проблемы становится все более актуальной.

При всем разнообразии существующих методов влагоизвлечения, абсолютное большинство из них использует конвекционный механизм энергоподвода. Однако недостатки данного способа, не позволяющие рассчитывать на значительный рост качественных показателей при его применении. Недостатки конвективной сушки могут быть лишь частично устранены, так как их природа лежит в ограничениях присущих физическим процессам конвективного способа теплопередачи.

Современные технологии переработки растительного сырья предъявляют к способам сушки высокие требования, недостижимые для традиционных конвективных технологий. Современная сушильная установка должна сочетать высокое качество обработанного продукта с высокой производительностью, быть экологически безопасной, легко управляемой, энергоэффективной и легко конфигурируемой для различных задач. В качестве альтернативы конвективным технологиям, рассматривается (в числе других) инфракрасная сушка, сушка в микроволновом (МВ) электромагнитном поле и их комбинации [1].

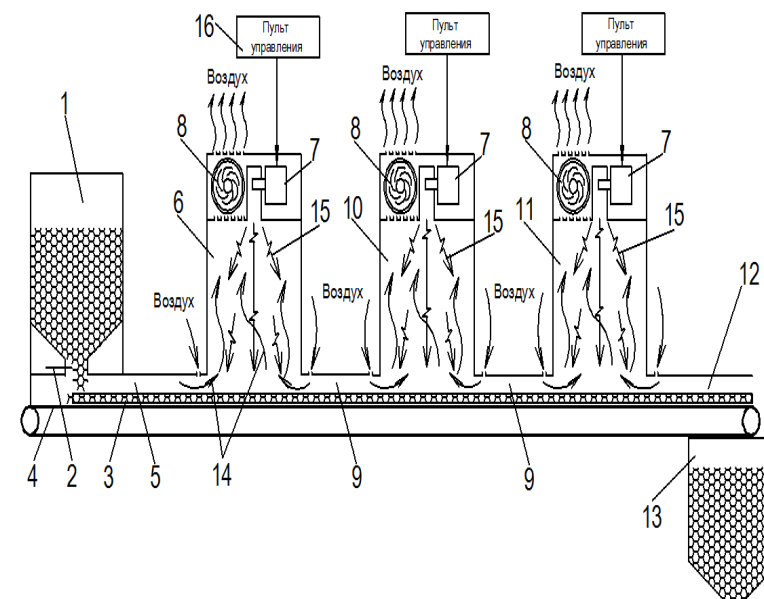


Рис. 1. Микроволновая ленточная сушильная установка ОНАПТ. Конструкция и общий вид установки.

В течение нескольких последних лет на кафедре процессов, аппаратов и энергетического менеджмента ОНАПТ реализуется исследовательская программа по проблематике сушки растительного сырья с использованием технологий микроволнового нагрева. Использование для подвода энергии электромагнитного микроволнового поля, требует новых подходов к конструированию сушильных МВ аппаратов, формирование принципов управления и контроля процесса МВ сушки.

Опыт, полученный при проведении исследований, показывает, что из-за сложности и большого количества факторов, процесс взаимодействия МВ электромагнитного поля с растительным сырьем - влажным материалом с разнородной, волокнисто-капиллярной структурой, может быть подвергнут аналитическому анализу лишь в наиболее обоб-

шенном виде. Поэтому, основным направлением работ в исследовании процессов влагоизвлечения в микроволновом электромагнитном поле избран путь экспериментального моделирования процессов, с последующим анализом результатов.

Для экспериментального моделирования процесса микроволновой сушки растительного сырья в непрерывном потоке, на кафедре создана экспериментальная сушильная установка (рис. 1).

Установка состоит из: бункера для влажного материала 1, с дозирующим устройством 2, ленточного конвейера 4, для транспортировки слоя материала 3, через зоны сушки, входного 5 и выходного 12 шлюзовых туннелей. Основой установки является камеры микроволновой сушки материала 6, 10 и 11, каждая из которых оборудована магнетроном (генератором микроволнового излучения) 7 и вентилятором 8. Камеры соединены между собой шлюзовыми тоннелями 9. Также сушилка имеет бункер для обработанного материала 13 и систему управления мощностью магнетронов сушильных камер 16.

В результате нескольких серий экспериментов были определены основные зависимости между мощностью микроволнового излучения, подводимого к сушильным камерам и температурой слоя зернового сырья (рис. 2а), между температурой слоя сырья и скоростью движения слоя через сушильные камеры (экспозицией сушки) (рис. 2б), некоторые другие.

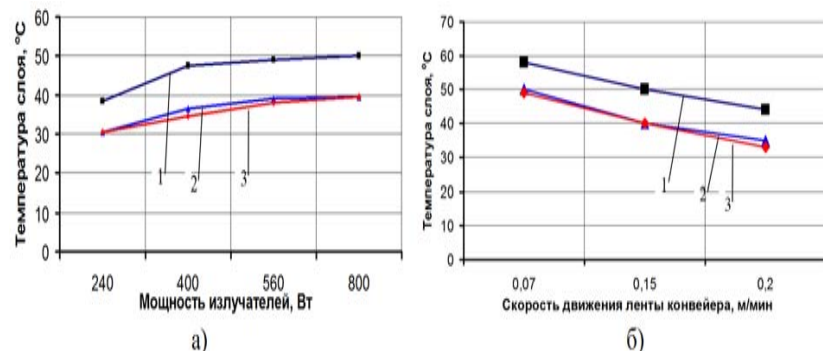


Рис. 2. Зависимости температуры слоя сырья на выходах сушильных камер: а) от мощности МВ излучения; б) от скорости движения слоя. 1, 2, 3 - номера МВ камер.

Снижение содержания влаги в сырье, определялось по результатам измерения влажности сырья до и после его обработки, максимальное снижение влажности составило от 2,75 до 3,7 % при использовании зерна пшеницы (20% о.в.) и полной мощности МВ излучателей сушильных камер (800Вт). В результате полученных экспериментальных зависимостей разработана методика расчета сушильных установок данной конструкции [2].

После апробации способа микроволновой сушки, с помощью данной ленточной сушилки, проводится исследование процессов сушки тонкого движущегося слоя растительного сырья комбинированным воздействием микроволнового и инфракрасного излучения, для чего сушилка оборудована тремя ИК излучателями по 1200 Вт.

С целью дальнейшего развития идеи использования микроволнового электромагнитного поля в качестве среды энергоподвода, решается задача оптимизации энергетических затрат в процессе МВ и комбинированной сушки.

Список литературы

1. Бурдо О.Г., Зиков О.В., Гайда С. Нові принципи термообробки зерна. // Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій / Міністерство освіти і науки України. – Одеса, 1999. – Вип. 20. – С. 223-229.
2. Яровой И.И. Разработка ленточной установки для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем : дис. ... канд. техн. наук. Одесса: ОНАПТ, 2013. – 162 с.

УДК 66.047.3.085.1: 633.85

СУШКА-СТИМУЛЯЦИЯ СЕМЯН ЦВЕТОВ DRYING-STIMULATION OF SEEDS OF FLOWERS

С.П. Рудобашта*, В.В. Агапов*, Д.С. Кашменский*, Г.Д. Левко**
S.P. Rudobashta*, V.V. Agapov*, D.S. Kashmensky*, G.D. Levko**

* Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия, Москва,
(e-mail: rudobashta@mail.ru)

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
** Всероссийский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства
овощных культур, Россия, Московская область
Russian research Institute of breeding and seed production of vegetable crops,
Russia, Moscow region (e-mail: mail@vniissok.ru)

Аннотация. Изучено воздействие осциллирующей инфракрасной сушки на стимуляцию семян цветов. Стимулирующее воздействие оценивали по изменению энергии прорастания и всхожести семян. Показано, что осциллирующая инфракрасная сушка семян вызывает увеличение всхожести и энергии прорастания исследованных семян цветов.

Abstract. The impact of the oscillating infrared drying on stimulation of seeds of flowers were studied. The stimulating effect was assessed by changes of the energy of germination of seeds. It is shown that oscillating infrared drying of seeds increases germination energy of it.

Ключевые слова: осциллирующая инфракрасная сушка, энергия прорастания, всхожесть, стимуляция семян.

Keywords: oscillating infrared drying, germination energy, seeds stimulation

В [1] было показано, что осциллирующая инфракрасная сушка (ИК-сушка) семян овощных культур при осцилляции их температуры в процессе от $t_{\min} = 34^{\circ}\text{C}$ до $t_{\max} = 40^{\circ}\text{C}$ вызывает значительную стимуляцию семян (повышение всхожести и энергии прорастания). Опыты в [1] были проведены с семенами таких овощных культур, как томат, огурец, бобы, свёкла, морковь, петрушка, пастернак, а также с семенами нетрадиционных и редких растений: иссопа, шалфея, змееголовника молдавского, кресс-салата, укропа, собранными с поля, при применении в качестве излучателей ламп «КГТ», «OSRAM», «ELCER». Было установлено, что наибольший стимулирующий эффект дает применение лампы «OSRAM», что объясняется лучшим соответствием ее спектральных характеристик таковым у семян. При осциллирующей ИК-сушке семян с использованием этой лампы их всхожесть в среднем по семенам всех овощных культур увеличивается на 24%, а энергия прорастания - на 30%. Для семян нетрадиционных и редких растений эти цифры составляют соответственно 24% и 82%.

Были проведены далее эксперименты по изучению влияния начальной влажности семян и продолжительности осциллирующей ИК-воздействия на стимулирующий эффект [2] – с семенами лука репчатого сорта «Штутгартен ризен», взятыми со склада, которые предварительно замачивали, а затем подвергали осциллирующей ИК-сушке. Исследования показали, что наибольший стимулирующий эффект по всхожести семян лука репчатого сорта «Штутгартен ризен» достигается при начальном влагосодержании семян (перед ИК-сушкой) ~40% и при последующей ИК-сушке в течение 40 мин. При этом наблюдается увеличение всхожести семян в 1,68 раза и рост энергии прорастания на 72% по сравнению с контролем. Однако, и при более низком начальном влагосодержании семян (в интервале 18 – 40 %) также наблюдается высокий прирост всхожести по сравнению с контролем. Эти исследования показали, что стимулирующий эффект возникает при осциллирующей ИК-сушке не только семян, собранных с поля, но и семян, взятых со склада после их длительного хранения. Это позволяет использовать осциллирующую ИК-сушку семян специально для их стимуляции непосредственно перед посевом путем их замачивания и последующей ИК-сушки. При замачивании семян в течение 10 мин и продолжительности последующей ИК-сушки в течение 40 мин в интервале температур $t_{\min}=34^{\circ}\text{C}$, $t_{\max}=40^{\circ}\text{C}$ энергия прорастания семян лука репчатого сорта «Штутгартен ризен» возрастает на 72%, а всхожесть – на 66 %.

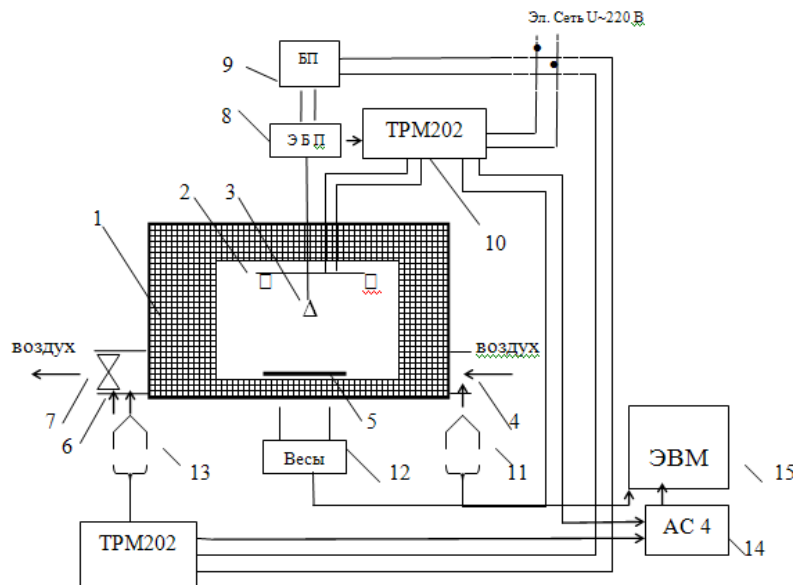


Рис. 1. Принципиальная схема установки для осциллирующей ИК-сушки семян: 1- сушильная камера, 2- инфракрасные электрические излучатели, 3- датчик оптического пирометра, 4- воздухозаборное отверстие, 5-сетчатый поддон с высушиваемым материалом, 6- воздухоотводящий патрубок, 7-вентилятор, 8-электронный блок пирометра, 9-блок питания, 11- термометр сопротивления, 12-лабораторные весы, 13-датчик влажности и температуры, 14- адаптер интерфейса марки AC 4,15- компорт ПЭВМ.

Отмеченные выше исследования, проведенные с семенами овощных культур, показали перспективность применения осциллирующей ИК-сушки для стимуляции семян. В данной работе они были продолжены на семенах цветов. Опыты проводили на установ-

ке, показанной на рис.1. Она содержала сушильную камеру 1, в нижней части которой (заподлицо с днищем в специально вырезанном в нем круглом отверстии) был расположен сетчатый поддон с стимулируемыми семенами 5. В верхней части установки симметрично относительно высушиваемых семян были расположены электрические инфракрасные излучатели 2 (лампы «OSRAM Siccatherm») и датчик оптического пирометра 3. Система автоматического регулирования процесса включала в себя датчик оптического пирометра 3, электронный блок пирометра 8, блок питания 9, автоматический регулятор ТРМ202. Воздух в сушильную камеру поступал извне через воздухозаборное отверстие 4, продувался через внутреннюю часть сушильной камеры с помощью вентиляторов 7 и удалялся в атмосферу через отводящий патрубок 6.

Температуру семян в опытах измеряли с помощью оптического датчика бесконтактного пирометра Raytek MID с выходом стандартного сигнала 4-20 мА. Индикация температуры осуществлялась с помощью 2-х канального измерителя-регулятора ТРМ202. Сигналы от регуляторов ТРМ202 передавались на интерфейс 14 марки AC 4, поступали на компорт ПЭВМ - 15 и архивировались в программе Owen Report Viewer с возможностью последующей обработки данных. Второй канал этого регулятора отображал температуру воздуха на входе в сушильную камеру, измеряемую термометром сопротивления 11 марки дтс 014-50м.в-3.20/0.2.

Порядок эксперимента был следующий:

- включали установку и подключали преобразователь интерфейса AC4;
- устанавливали значения температур на терморегуляторе $t_{\min}=34^{\circ}\text{C}$ и $t_{\max}=40^{\circ}\text{C}$, а также скорость движения наружного воздуха через сушилку $v = 1,8$ м/с (этот режим обеспечивал продолжительность одного температурного цикла осцилляций 23 с.);
- семена увлажняли в течение 10 мин путем помещения их во влажную марлю;
- укладывали семена плотным монослоем на сетчатый поддон в сушилку;
- включали секундомер и начинали опыт;
- осуществляли осциллирующую ИК-сушку (стимуляцию) в течение 40 мин;
- после прекращения опыта выключали обдув и сохраняли полученные опытные данные с помощью программы Owen Report Viewer и CAS MWP – система сбора данных;
- отключали электропитание, подаваемое на излучатели.

Эксперименты проводили с семенами цветов следующих культур: «Долихос сир Каскад» и «Горошек душистый» (табл. 1). За контроль принимали семена, не подвергнутые осциллирующей ИК-сушке. Осциллирующую ИК-сушку семян проводили в лаборатории кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий РГАУ-МСХА, а испытания их на всхожесть – в растительных лабораториях ВНИИССОК, используя стандартную методику проверки семян цветов на всхожесть.

Таблица 1. Результаты опытов по стимуляции семян цветов методом осциллирующей ИК-сушки

№ п/п	Культура	Год урожая	Какой под- работке под- вергались	Опыты на всхожесть, %	Количество штук
1.	Долихос сир Каскад	2011	контроль	48	100
			осциллир. ИК-сушка	100	100
2.	Горошек души- стый	2008	контроль	2	100
			осциллир. ИК-сушка	29	100

Как видно из табл.1, обработка семян исследованных культур методом осциллирующей ИК-сушки существенно повышает их всхожесть: у семян культуры «Долихос сир Каскад» с 48% до 100%, а у семян культуры «Горошек душистый» – с 2% до 29%.

Выводы

1. Осциллирующая ИК-сушка семян цветов, проведенная при осцилляции их температур в интервале от $t_{\min}=34^{\circ}\text{C}$ до $t_{\max}=40^{\circ}\text{C}$, при продолжительности цикла осцилляций 23 с, вызвала повышение всхожести семян культуры «Долихос сир Каскад» с 48% до 100%, а семян культуры «Горошек душистый» с 2% до 29%;

2. Таким образом, установлено, что осциллирующая ИК-сушка стимулирует не только семена овощных культур, что было установлено ранее, но и семена цветов;

3. Стимулировать указанным способом надо семена, имеющие низкую всхожесть.

Список литературы

1. Рудобашта С.П., Григорьев И.В. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур, нетрадиционных и редких растений // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33. № 8. С. 85-90.

Секция 5. СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 66.021.3:691.32:624.012.4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССАХ КОРРОЗИИ БЕТОНА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ MATHEMATICAL MODELING OF MASS TRANSFER IN THE PROCESSES OF CORROSION OF CONCRETE TO ENSURE THE SAFETY AND DURABILITY OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Сергей В. Федосов, Варвара Е. Румянцева, Владимир А. Хрунов
Sergey V. Fedosov, Varvara E. Roumyantseva, Vladimir A. Khrunov

*Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново,
(e-mail: sprinter054@yandex.ru).*

Ivanovo State Polytechnical University, Russia, Ivanovo

Аннотация: Проблема обеспечения безопасности и долговечности зданий и сооружений обуславливает необходимость разработки эффективных рекомендаций для предотвращения разрушения конструкций от коррозии. В статье проведено математическое моделирование массопереноса в процессах коррозии бетона первого вида. Получены выражения, позволяющие прогнозировать динамику и кинетику процессов коррозионной деструкции.

Abstract: The problem of ensuring safety and durability of buildings and structures necessitates the development of effective recommendations to prevent the destruction of structures against corrosion. In the article mathematical modeling of mass transfer in the processes of corrosion of concrete of the first type. The expressions that allows to predict the dynamics and kinetics of corrosion processes of destruction.

Ключевые слова: математическое моделирование; массоперенос; коррозия; цементный бетон; безопасность; долговечность.

Keywords: mathematical modeling; mass transfer; corrosion; cement concrete; security; durability.

Повышение безопасности и долговечности зданий и сооружений является одной из важнейших задач строительства. Решение этой задачи требует знания сущности процессов, протекающих при эксплуатации строительных конструкций, в первую очередь сущности процессов коррозии.

В современном промышленном, гражданском и транспортном строительстве основным материалом для возведения ответственных зданий и сооружений является бетон. Высокая прочность и сравнительная простота работ предопределили широкую область его применения, но воздействие агрессивных сред способно с течением времени ослаблять прочность бетона, снижая тем самым безопасность и долговечность зданий и сооружений.

Как известно, твердение бетона характеризуется химическими реакциями гидратации алита и белита. В результате в твердеющем бетоне образуется свободный гидроксид кальция, содержание которого достигает $10\div 15\%$ (в пересчете на CaO) и который может вымываться из конструкции под воздействием окружающей среды. Уменьшение содержания свободного гидроксида кальция в результате «вымывания» его из бетона жидкостью, вызывает изменение фазового и термодинамического равновесия в системе, приводит к разложению основных составляющих цементного клинкера, таких как полугидрат сульфата кальция, гипс, трехкальциевый алюминат, алит, белит, гиллебран-

дит, ксонотлит, тоберморит, что в свою очередь приводит к необратимой потере прочностных свойств бетона. Установлено, что при потере 10% CaO снижение прочности цементного камня достигает 10%, при потере 20% CaO - уже 25%, а при потере 33% CaO наступает полное разрушение бетона.

Разработка математических моделей процессов коррозии бетона базируется на физических моделях диффузии переносимых компонентов в пористой структуре бетона и математическом аппарате краевых задач массопереноса с использованием дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа.

В работах [1-3] приведены результаты по разработке математических моделей процессов коррозии бетона первого вида, которые могут быть представлены краевой задачей массопроводности вида:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \cdot \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta. \quad (1)$$

$$\text{Начальное условие: } C(x, \tau)|_{\tau=0} = C(x, 0) = C_0. \quad (2)$$

$$\text{Граничные условия: } \frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$k \cdot \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta [C_p(\tau) - C(\delta, \tau)] \quad (4)$$

где $C(x, \tau)$ - концентрация свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , в пересчете на CaO, кг CaO/кг бетона; C_0 - концентрация свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетоне в начальный момент времени в произвольной точке с координатой x , в пересчете на CaO, кг CaO/кг бетона; $C_p(\tau)$ - равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг CaO/кг бетона; k - коэффициент массопроводности в твердой фазе, м²/с; δ - толщина стенки конструкции, м; x - координата, м; τ - время, с; β - коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с.

Решение системы уравнений (1)-(4) для малых чисел Фурье методом интегрального преобразования Лапласа даёт выражения, позволяющие рассчитать профиль безразмерных концентраций переносимого компонента по толщине бетона в произвольный момент времени (5) и концентрацию перенесенного компонента в жидкой фазе (6), т.е. расчета кинетики процесса по твердой и жидкой фазам.

$$\frac{Z(\bar{x}, Fo_m)}{Z_{ж}(0)} = - \frac{Bi_m}{\sqrt{Bi_m^2 - 4K_m}} \sum_{i=1}^2 (-1)^i \exp \left[-a_i(1 - \bar{x}) + a_i^2 Fo_m \right] \times \operatorname{erfc} \left(\frac{1 - \bar{x}}{2\sqrt{Fo_m}} - a_i \sqrt{Fo_m} \right) \quad (5)$$

$$\frac{Z_{ж}(Fo_m)}{Z_{ж}(0)} = 1 - \frac{K_m Bi_m}{\sqrt{Bi_m^2 - 4K_m}} \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} \left\{ 2\sqrt{\frac{Fo_m}{\pi}} + a_i \int_0^{Fo_m} \exp(a_i^2 Fo_m) \operatorname{erfc}(-a_i \sqrt{Fo_m}) dFo_m \right\} \quad (6)$$

$$a_i = \frac{-Bi_m \pm \sqrt{D}}{2}, \quad i=1, 2.$$

где

Результаты практического применения представленной математической модели показаны в публикациях [4, 5].

Безусловным положительным моментом полученных зависимостей является возможность решения обратной задачи, когда имеющиеся экспериментальные данные с помощью данной модели позволяют прогнозировать численное значение свободного гидроксида кальция, что в конечном итоге позволяет с минимальной погрешностью прогнозировать долговечность зданий и сооружений.

Список литературы

1. Федосов, С.В., Румянцев, В.Е., Федосова, Н.Л., Смелцов, В.Л. Моделирование массопереноса в процессах жидкостной коррозии бетона первого вида // Строительные материалы. 2005. №7. С. 60-62.
2. Федосов С.В., Румянцев В.Е., Хрунов В.А., Аксаковская Л.Н. Моделирование массопереноса в процессах коррозии бетонов первого вида (малые значения числа Фурье) // Строительные материалы. №5. 2007. С.70-71.
3. Федосов С.В., Румянцев В.Е., Румянцев К.Е., Хрунов В.А. Моделирование пограничного слоя в процессах массопереноса при жидкостной коррозии железобетонных конструкций // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2011. Т. 54. № 6. С. 96-100.
4. Федосов С.В., Румянцев В.Е., Хрунов В.А., Касьяненко Н.С., Смелцов В.Л. Прогнозирование долговечности строительных конструкций с позиций расчетного и экспериментального исследования процессов коррозии бетона // Вестник Волгоградского ГАСУ, серия «Строительство и архитектура», раздел «Строительные материалы и изделия». 2009. №14 (33). С.117-122.
5. Федосов, С.В., Румянцев, В.Е., Хрунов, В.А., Шестеркин, М.Е. О некоторых проблемах технологии безопасности и долговечности зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры // Строительные материалы. 2015. №3. С.8-11.

УДК 694.14:536.255

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАГЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ

THE INFLUENCE OF HEAT AND MASS TRANSFER DYNAMICS ON CHARACTERISTICS OF EXPLOITATION OF DOWEL CONNECTION

Сергей Викторович Федосов*, Виталий Геннадьевич Котлов**, Мария Анатольевна Иванова***

Sergey Victorovich Fedosov*, Vitaliy Gennadievich Kotlov**, Maria Anatolyevna Ivanova***

* ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет», Россия, Иваново

(e-mail: fedosov-academic53@mail.ru)

Ivanovo State Polytechnical University, Russia, Ivanovo

** ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», Россия, Йошкар-Ола

(e-mail: KotlovVG@volgatech.net)

Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola

*** ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», Россия, Йошкар-Ола

(e-mail: mashasmils@yandex.ru)

Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola

Аннотация. В статье рассматриваются соединения элементов деревянных конструкций, выполненные с помощью нагелей. Исследовано напряженно-деформированное состояние нагельного соединения. Определено влияние условий эксплуатации на расчет соединения. На примере болтового соединения частей древесины решены краевые задачи тепло- и влажопроводности.

Abstract: The paper studies the connections of wood structures elements made with dowels. The stress and strain state of dowel connection is analyzed. The influence of operating conditions on the calculation of connection is estimated. Boundary value problems of heat and moisture permeability on the example of bolted connection of wood pieces are solved.

Ключевые слова: деревянные конструкции; нагельные соединения; напряженно-деформированное состояние; условия эксплуатации; влажность древесины; тепломассообмен.

Key words: wooden structures; dowel connections; stress and strain state; operating conditions; wood moisture content; heat and mass transfer.

Нагельные соединения являются соединениями элементов деревянных конструкций на механических связях и работают на изгиб. Нагели препятствуют взаимному сдвигу соединяемых элементов. Они используются в стыках растянутых элементов, в составных стержнях и балках на податливых связях, в узлах деревянных ферм. Известны следующие виды нагелей по форме поперечного сечения: цилиндрические нагели, пластинчатые нагели и металлические зубчатые пластины. Цилиндрические нагели (болты, гвозди, винты, шурупы) используют при выполнении узловых и стыковых сопряжений элементов. Пластинчатые нагели применяют для соединения нескольких брусков по высоте (сплачивания элементов). Для узловых соединений дощатых элементов в последнее время нашли применение металлические зубчатые пластины (МЗП).

В правильно запроектированном нагельном соединении происходит смятие древесины гнезда и изгиб нагеля, при жестком нагеле может произойти раскалывание древесины между гнездами (хрупкое разрушение). Непосредственно после приложения нагрузки элементы начинают сдвигаться и стремятся опрокинуть нагель, который после некоторого поворота, обусловленного неплотностями и обмятием древесины, упирается в нее и начинает сминать по краям гнезда. При изгибе нагеля увеличивается поверхность его контакта с древесиной, что вызывает появление в ней неравномерных напряжений смятия по всей длине нагеля. Напряжения смятия древесины нагелем имеют разные знаки и их равнодействующие образуют две пары взаимно уравновешенных продольных сил, которые препятствуют повороту нагеля. Равновесие нагеля обеспечивается только продольными силами, параллельными направлению сдвига соединяемых элементов [1].

Для определения несущей способности одного среза нагеля необходимо знать напряженное состояние нагельного соединения. Действующие в соединяемых элементах усилия стремятся сдвинуть их относительно друг друга. Нагель, препятствуя этому, изгибается. Изгиб нагеля зависит от жесткости самого нагеля и смятия древесины нагельного гнезда. Нагель можно рассматривать как балку, лежащую на сплошном упруго-пластическом основании – древесине нагельного гнезда. Напряжения смятия в древесине по длине нагеля распределены неравномерно. Данная неравномерность тем значительнее, чем меньше жесткость нагеля. Кроме того, неравномерно также распределение сминающих напряжений по контуру нагельного гнезда. В целом напряженно-деформированное состояние нагельного соединения характеризуется:

- изгибом самого нагеля;
- смятием древесины нагельного гнезда;
- скалыванием древесины между нагельными;
- раскалыванием древесины поперек волокон.

Опасность скалывания и раскалывания древесины устраняется расстановкой нагелей по конструктивным требованиям [2]. Минимальные расстояния между нагельными и между нагелем и краем соединяемого элемента назначаются так, чтобы разрушение древесины в зоне скалывания и раскалывания заведомо не могло реализоваться, поскольку раньше наступит исчерпание несущей способности по смятию или изгибу нагеля. Дан-

ные расстояния зависят от вида нагелей и толщины соединяемых элементов. Таким образом, несущая способность нагеля на один условный шов сплачивания элементов определяется из условия смятия древесины и изгиба самого нагеля. Для этого необходимо знать диаметр и материал нагеля, толщины соединяемых элементов, направления действия усилия по отношению к волокнам древесины, а также схему соединения.

Другим более удобным методом определения несущей способности нагеля является экспериментально-теоретический метод. В этом случае эпюры напряжения смятия задают по толщине элемента. Нагель рассматривают в виде стержня, работающего в упругопластической среде, а соединения соотносят с одной из трех основных схем: несимметричной односрезной, несимметричной двухсрезной или симметричной двухсрезной схемой [3]. При этом все они могут быть выражены через обобщенную схему нагельного соединения (рис. 1).

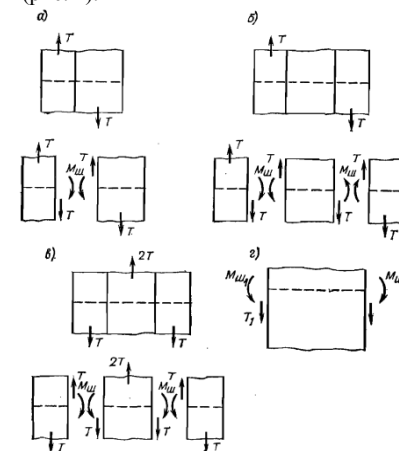


Рис. 1. Основные схемы нагельных соединений: а – несимметричная односрезная; б – несимметричная двухсрезная; в – симметричная двухсрезная; г – обобщенная схема нагельного соединения.

Во время разработки этого метода его автор Коченов В.М. для упрощения расчета ввел ряд предпосылок [4]:

- принята диаграмма деформирования идеального упругопластического материала для смятия древесины и изгиба нагеля;
- в пределах пластического участка напряжения остаются постоянными, равными для древесины расчетному сопротивлению смятия, а для нагеля расчетному сопротивлению изгиба, что для стали приравнивается пределу текучести;
- несущая способность нагеля определяется расчетной предельной деформацией;
- расчетную предельную деформацию ограничивают отношением полной деформации и упругой, которое принимают равным 2;
- ось нагеля принимают прямолинейной до образования в нем пластического шарнира.

На основании перечисленных предпосылок и приведенных основных расчетных схем были приняты прямолинейные эпюры смятия.

Расчетная несущая способность цилиндрического нагеля в соединениях элементов определяется по таблице 20 нормативного документа [2]. В общем случае учет следующих факторов производится умножением значения расчетной несущей способности, определенной по таблице, на соответствующий коэффициент:

- при использовании породы древесины кроме сосны и ели умножением на коэффициент m_n ;
- при различных условиях эксплуатации на коэффициент m_b ;
- при эксплуатации конструкции в условиях повышенной температуры ($+50^\circ\text{C}$) умножением на коэффициент $m_T = 0,8$;
- для конструкций, в которых напряжения, возникающие от постоянных и временных длительных нагрузок, превышают 80% суммарного напряжения от всех нагрузок, умножением на коэффициент $m_d = 0,8$;
- для конструкций, рассчитываемых с учетом воздействия кратковременных (ветровой, монтажной или гололедной) нагрузок, умножением на коэффициент m_n ;
- для элементов, подвергнутых глубокой пропитке антипиренами под давлением, умножением на коэффициент $m_a = 0,9$.

Наиболее важным коэффициентом, учитывающим условия эксплуатации, является коэффициент m_b , зависящий от класса условия эксплуатации. Согласно [2] определены пять классов условий эксплуатации в зависимости от влажности древесины и влажности воздуха. При расчете конструкции мы закладываем некоторое определенное значение влажности, учитываемое коэффициентом m_b . В реальных условиях влажность постоянно меняется. В течение дня температура и влажность воздуха изменяется в больших пределах, что не учитывается в ходе расчета. В связи с этим возникает проблема влияния циклически изменяющихся параметров окружающей среды на расчет нагельных соединений. При расчете значение данного коэффициента влияет на размеры сечения элементов и количество нагелей. Кроме того, влажность влияет на способность древесины сопротивляться воздействию внешних сил, т.е. на прочность и деформативность соединения.

Древесина является анизотропным материалом и ведет себя по-разному при сжатии вдоль и поперек волокон. При сжатии вдоль волокон древесина ведет себя как хрупкий материал. Разрушение происходит при малых деформациях, сопровождается смятием опорных поверхностей, образованием наклонных и вертикальных трещин. Характер разрушения смешанный – сдвигом и отрывом. При сжатии поперек волокон древесина ведет себя как пластичный материал. При этом разрушения материала не наблюдается, поэтому фиксируют условную разрушающую нагрузку, при которой высота образца уменьшается на одну треть. Таким образом, прочность древесины при сжатии вдоль волокон значительно выше прочности при сжатии поперек волокон.

При увлажнении древесины до предела насыщения волокон (30%) прочность и модуль упругости снижается, а деформативность увеличивается. В наименьшей степени влажность влияет на ударную прочность древесины и на прочность при растяжении вдоль волокон. При дальнейшем повышении влажности древесины показатели механических свойств практически не меняются [5]. Зависимость механических свойств древесины при влажности более 30% вполне может быть описана прямой линией. Следовательно, прочностные и деформативные свойства древесины характеризуют лишь наличие связанной влаги в стенках клеток.

Рассмотрим пример нагельного соединения элементов деревянных конструкций – болтовое соединение. Динамика полей температур в древесине при повышении температуры окружающей среды показана на рис. 2а. В принципе, при этом будет происходить нагрев поверхности древесины посредством лучисто-конвективного теплообмена с окружающей средой; однако, кондуктивный теплоперенос между металлом и древесиной будет определяющим; и, вследствие большой разницы между коэффициентами теплопроводности металла и древесины, можно полагать, что температура по радиусу болта распределена равномерно. В течение дневного нагрева температура достигает t_{\max} . После этого температура воздуха начинает понижаться. Соответственно, будут меняться поля температур в древесине, как показано на рис. 2б.

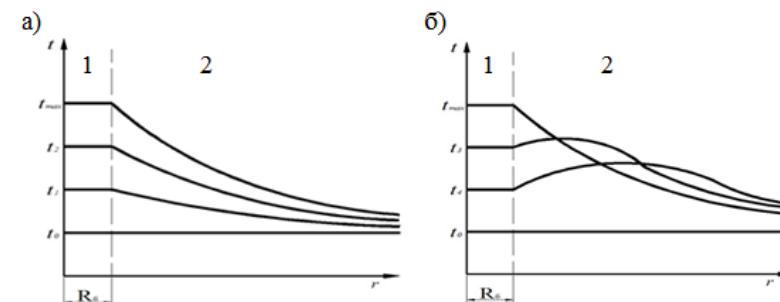


Рис.2. Графики изменения температуры в древесине (2): а – на стадии нагрева металла (1); б – на стадии охлаждения металла (1).

При снижении температуры воздуха до температуры точки росы из воздуха выпадает влага и конденсируется на твердых поверхностях. Наиболее опасно ее появление в месте контакта древесины и металлического крепежного изделия. Оценить степень воздействия этого процесса можно, разработав математическое описание тепло- и влагопереноса в рассматриваемой системе. В соответствии с теорией тепломассопереноса [6] может быть записана следующая система дифференциальных уравнений нестационарного переноса теплоты и влаги:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \text{div}(a \cdot \text{grad}(t)) + \varepsilon \cdot \frac{r^*}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \text{div}(k \cdot \text{grad}(u)) + \text{div}(k \delta_T \text{grad}(t)) + \text{div}(k \delta_T \text{grad}(p)) \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} &= \text{div}\left(\frac{\rho_0}{c^*} k \delta_p \text{grad}(p) - \frac{\varepsilon \rho_0}{c^*} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь: a – коэффициент температуропроводности; ε – критерий фазового превращения ($0 \leq \varepsilon \leq 1$); r^* – скрытая теплота парообразования; c – теплоемкость древесины; k – коэффициент массопроводности; δ_T – коэффициент термодиффузии.

Первое уравнение (дифференциальное уравнение теплопереноса) показывает, что поле температур в древесине определяется тепло- и температуропроводностью материала конструкции, а также внутренним испарением влаги, которое может возникнуть только в местах жаркого климата или пожара в процессе эксплуатации и поэтому может быть удалено из рассмотрения. Второе уравнение (дифференциальное уравнение влагопереноса) отражает тот факт, что движение в нагеле определяется влагопроводностью, термодиффузией и баропереносом. При естественных условиях эксплуатации конструкций вторым и третьим слагаемым второго уравнения можно пренебречь. В этом случае выпадает и третье уравнение системы (дифференциальное уравнение баропереноса). Тогда система 1 переходит в систему 2 независимых уравнений переноса теплоты и влаги:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \text{div}(a \cdot \text{grad}(t)) \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \text{div}(k \cdot \text{grad}(u)) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Данную систему невозможно решить, не дополнив ее начальными и граничными условиями. Необходимо знать состояние системы в момент времени, принимаемый за на-

чало отсчета. Для нестационарного температурного поля и поля влагосодержаний начальные условия примут вид:

$$t(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = t_0(x, y, z) \quad (3)$$

$$u(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = u_0(x, y, z) \quad (4)$$

В качестве обобщенных граничных условий для тепло- и влагообмена поверхности с окружающей средой можем записать следующие выражения:

$$\alpha [t_c(\tau) - t(x, y, z, \tau)] = \lambda \nabla t(x, y, z, \tau) + q_m(\tau) r^* \quad (5)$$

$$q_m(\tau) = \beta [u_{nc}(\tau) - u_c(\tau)] \rho_r = -k \rho_0 [\nabla u(x, y, z, \tau) + \delta_r \nabla t] \quad (6)$$

Система дифференциальных уравнений 2 в совокупности с начальными и граничными условиями называется краевой задачей и в общем виде определяет поведение рассматриваемой системы.

Поскольку представление в цилиндрической системе координат имеет определенные неудобства, заменим ее плоской задачей, представив древесину вокруг болта в виде неограниченных пластин. Тогда краевые задачи тепло- и влагопередачи примут вид [7, 8]:

- краевая задача теплопроводности:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2}, \quad r > 0; \quad R_0 \leq r \leq R_1 \quad (7)$$

$$t(r, \tau)|_{r=0} = t_{1,0}(r) \quad (8)$$

$$t(r, \tau)|_{r=R_0} = t_{0,1} \quad (9)$$

$$t(r, \tau)|_{r=R_1} = t_{R,1} \quad (10)$$

- краевая задача влагопроводности:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2}, \quad r > 0; \quad R_0 \leq r \leq R_1 \quad (11)$$

$$W_{or}(r)|_{r=0} = W_{1,0} \quad (12)$$

$$W(r, \tau)|_{r=R_0} = W_u \quad (13)$$

$$W(r, \tau)|_{r=R_1} = W_p \quad (14)$$

Для упрощения введем в рассмотрение безразмерные переменные вида:

$$T(\bar{r}, Fo) = \frac{t(r, \tau) - t_{R,1}}{t_{0,1} - t_{R,1}}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_1 - R_0}; \quad Fo = \frac{a\tau}{(R_1 - R_0)^2} \quad (15)$$

$$U(\bar{r}, Fo_m) = \frac{W(r, \tau) - W_p}{W_u - W_p}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_1 - R_0}; \quad Fo_m = \frac{k_1 \tau}{(R_1 - R_0)^2} \quad (16)$$

Таким образом, краевые задачи переноса теплоты и влаги запишутся следующим образом:

- краевая задача теплопроводности:

$$\frac{\partial T(\bar{r}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1 \quad (17)$$

$$T(\bar{r}, Fo)|_{Fo=0} = T_{1,0}(\bar{r}) \quad (18)$$

$$T(\bar{r}, Fo)|_{\bar{r}=0} = T_{R,1} \quad (19)$$

$$T(\bar{r}, Fo)|_{\bar{r}=1} = 0 \quad (20)$$

- краевая задача влагопроводности:

$$\frac{U(\bar{r}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo_m > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1 \quad (21)$$

$$U(\bar{r}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = U_{1,0}(\bar{r}) \quad (22)$$

$$U(\bar{r}, Fo_m)|_{\bar{r}=0} = U_u \quad (23)$$

$$U(\bar{r}, Fo_m)|_{\bar{r}=1} = 0 \quad (24)$$

Опуская громоздкие преобразования, приводим окончательное решение задач:

$$T(\bar{r}, Fo) = T_{R,1} \left[(1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\pi n \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \right] + \\ + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\pi n \bar{r}) \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \quad (25)$$

$$U(\bar{r}, Fo_m) = U_u \left[(1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{r}) \int_0^1 U_{1,0}(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \quad (26)$$

Наглядно развитие полей температур в древесине в физических размерных единицах времени и координат представлено на рис. 3.

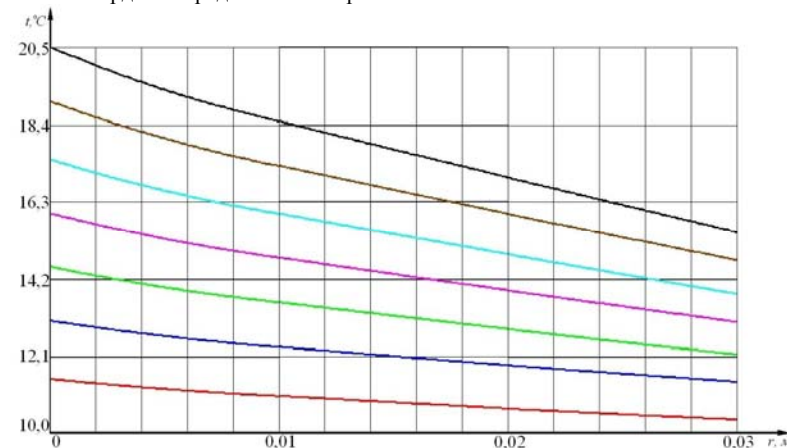
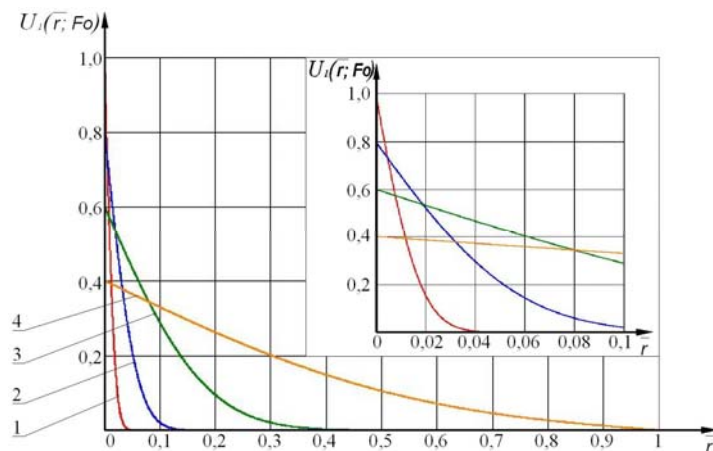
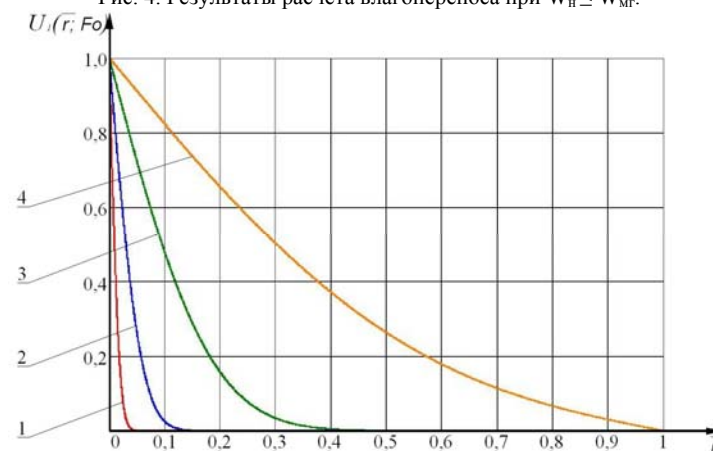


Рис. 3. Прогревание слоев древесины при нагревании нагеля.

Результаты расчета краевой задачи влагопроводности сводятся к двум случаям: когда количество выпавшей влаги оказывается недостаточным для увлажнения древесины до максимального гигроскопического влагосодержания (рис. 4) и когда выпало избыточное количество влаги (рис. 5). Кривые показывают процесс диффузии влаги при значениях диффузионного критерия Фурье: 1 – 0,0001; 2 – 0,001; 3 – 0,01; 4 – 0,1.

Рис. 4. Результаты расчета влагопереноса при $W_n \leq W_{mt}$.Рис. 5. Результаты расчета влагопереноса при $W_n > W_{mt}$.

Таким образом, влияние динамики тепломассопереноса необходимо учитывать при расчете деревянных конструкций на нагелях. В ходе дальнейших исследований планируется разработка практических рекомендаций по мониторингу состояния деревянных конструкций с учетом влияния процессов тепломассопереноса.

Список литературы

1. Конструкции из дерева и пластмасс: учебник для вузов / Э.В. Филимонов [и др.]. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 422 с.
2. СП 64.13330.2011 Деревянные конструкции. Актуализированная версия СНиП II-25-80 / Минрегион России. – М.: ОАО «ЦПП», 2011. – 92 с.
3. Конструкции из дерева и пластмасс: Учеб. для вузов / Ю.В. Слишкоухов, В.Д. Буданов, М.М. Гаппов и др.; под ред. Г.Г. Карлсена и Ю.В. Слишкоухова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 543 с.
4. Коченов В.М. Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1953. – 320 с.

5. Леонтьев Н.Л. Влияние влажности на физико-механические свойства древесины. – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 114 с.

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

7. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 2. Динамика полей температуры при произвольном законе изменения температуры воздушной среды / С.В. Федосов [и др.] // Строительные материалы. - №8. – С. 73-79.

8. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 3. Динамика и кинетика влагопереноса / С.В. Федосов // Строительные материалы. - №9. – С. 63-68.

УДК 66.097.8:669.14.018.291

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СУШКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ SOME ASPECTS OF DRYING OF THE MODIFIED PHOSPHATIC COVERINGS

Варвара Е. Румянцева*, Виктория С. Коновалова**
Varvara E. Roumyantseva*, Victoriya S. Konovalova**

*Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново,
(e-mail: varrym@gmail.com).

** Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново,
(e-mail: kotprotiv@yandex.ru).

Ivanovo State Polytechnical University, Russia, Ivanovo

Аннотация: В статье рассматриваются некоторые аспекты сушки модифицированных фосфатных покрытий. Определение степени изменения защитной способности фосфатных покрытий после нагрева позволяет определить оптимальные режимы сушки. Представленные данные показывают, что модифицированные фосфатные покрытия с повышением температуры теряют свои защитные свойства.

Abstract: Some aspects of drying of the modified phosphatic coverings are considered in the article. Determination of the degree of change of the protective ability of phosphate coating after heating allows to define the optimal drying conditions. The presented data show that the modified phosphate coatings with increasing temperature lose their protective properties.

Ключевые слова: фосфатирование, фосфатные пленки, защита от коррозии, свойства покрытий.

Keywords: phosphate coating; phosphate films, protection from corrosion, properties of the coatings.

Фосфатирование используют для дополнительной защиты от коррозии, повышения твердости, износостойкости, электроизоляционных свойств основного покрытия на черных и цветных металлах. Суть процесса фосфатирования состоит в создании на поверхности защищаемого изделия слоя малорастворимых фосфатов железа, цинка или марганца.

Для снижения пористости покрытий, улучшения их адгезии и придания повышенной стойкости к воздействию агрессивных сред в составы, применяемые для фосфатирования, вводят специальные добавки – модификаторы [1-3].

После нанесения покрытий изделия промываются и высушиваются. Обычно процесс сушки происходит при нормальных условиях в течение 2 – 3 часов, но для ускорения высушивания процесс можно производить при нагреве. При сушке на воздухе в по-

рах покрытия происходит окисление металла, образуется пассивная оксидная пленка, также препятствующая проникновению агрессивной среды к поверхности защищаемого изделия [4].

Сушка покрытий проводилась при температурах 25, 40 и 70°C в сушильном шкафу в течение 20 минут. Каждые 2 минуты образцы взвешивались, проводилась проверка на коррозионную стойкость капельным методом. В качестве индикатора при этом использовали раствор, содержащий $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 80 г/л, NaCl – 33 г/л, HCl (0,1н) – 13 мл/л. Каплю раствора наносили на поверхность, покрытую фосфатной пленкой, и после включения секундомера следили за ее цветом, который менялся от голубого до красного. В таблице 1 представлены результаты испытаний защитной способности образцов после высушивания.

Таблица 1. Результаты испытаний стальных образцов с фосфатным покрытием капельным методом после высушивания

Вид покрытия			Традиционное	Модифицированное покрытие
Контрольное время непосредственно после фосфатирования, сек			60	130
Контрольное время после нагрева, сек	t, °C	25	60	130
		40	57	120
		70	52	100

При увеличении температуры высушивания защитная способность покрытий снижается незначительно. Установлено, что оптимальным режимом сушки будет нагрев при температуре 40 – 50°C в течение 10 – 15 мин.

В литературе [5] указано, что фосфатные покрытия выдерживают кратковременный нагрев до 400 – 450°C. Проверку жаростойкости модифицированных покрытий осуществляли при температурах 100, 200 и 300°C, помещая образцы в муфельную печь на 2 минуты. После извлечения образцов и их остывания проверяли защитную способность фосфатных пленок капельным методом. Данные (таблица 2) показывают, что с увеличением температуры защитная способность покрытий снижается, а при нагреве до 300°C пленки теряют свои защитные свойства.

Таблица 2. Результаты испытаний стальных образцов с фосфатным покрытием капельным методом после нагрева

Вид покрытия			Традиционное	Модифицированное покрытие
Контрольное время непосредственно после фосфатирования, сек			60	130
Контрольное время после нагрева, сек	t, °C	100	50	95
		200	45	79
		300	1	2

Выводы:

1. Оптимальный режим сушки модифицированных фосфатных покрытий: нагрев при 40 – 50°C в течение 10 – 15 мин.

2. Фосфатные покрытия выдерживают кратковременный нагрев до температуры 200°C, однако их защитные свойства при этом снижаются.

Список литературы

1. Федосов С. В., Румянцев В. Е., Румянцев К. Е., Коновалова В. С., Шестеркин М. Е. Особенности холодного фосфатирования арматурной стали // «Вестник гражданских инженеров», Санкт-Петербург: Изд-во СПбГАСУ, 2012. № 2 (31), с. 79.
2. Коновалова В. С., Румянцев К. Е. Оптимизация процесса химического фосфатирования стали // Материалы 9-ой Международной научно-технической конференции «Покрытия и обработка поверхности», Москва, Россия, 2012. с. 64 – 65.
3. Коновалова В.С., Румянцев К.Е., Румянцев В.Е. Модифицированные покрытия для защиты от коррозии стальной арматуры железобетона // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии». Плес, 2011. с. 132.
4. Грилихес С. Я. Оксидные и фосфатные покрытия металлов / Под. ред. П. М. Вячеслава. — 5-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, Ленинградское отд-е, 1985. — 96 с.
5. Лапатухин В. С. Фосфатирование металлов. Исследование процессов ускоренного и холодного фосфатирования. – М.: МАШГИЗ, 1958. – 264 с.

УДК 694.14:536.255

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ HEAT AND MASS TRANSFER IN THE PROCESS OF DOWEL CONNECTIONS OPERATION

Михаил В. Бочков*, Юлия А. Гилёва**, Мария А. Иванова***
Mikhail V. Bochkov*, Yulia A. Gilyova**, Maria A. Ivanova***

* ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
Россия, Иваново

Ivanovo State Polytechnical University, Russia, Ivanovo

** ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»,
Россия, Йошкар-Ола

(e-mail: gilyovaya@volgatech.net)

Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola

*** ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»,
Россия, Йошкар-Ола

(e-mail: mashasmils@yandex.ru)

Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola

Аннотация: В статье рассматриваются основные виды нагельных соединений (цилиндрические нагели, пластинчатые нагели, металлические зубчатые пластины). Определены краевые задачи тепло и влагопереноса, возникающие при соединении элементов деревянных конструкций нагелем в процессе эксплуатации.

Abstract: The paper studies the main types of dowel connections (cylindrical dowels, plate dowels, and metal clamping plates). The boundary problems of heat and mass transfer occurring in the dowel connections of wooden structures elements in the process of operation are outlined.

Ключевые слова: деревянные конструкции; нагели; металлические зубчатые пластины; теплоперенос; влагоперенос.

Key words: wooden structures; dowels; metal clamping plates; heat transfer; moisture transfer.

В строительной практике для соединения элементов деревянных конструкций чаще всего используют нагельные соединения. Нагели – вкладыши, препятствующие взаимному сдвигу соединяемых элементов. Они используются в стыках растянутых элементов, в составных стержнях, балках на податливых связях, узлах деревянных стропильных конструкций. По форме поперечного сечения нагели подразделяются на цилиндрические нагели, пластинчатые нагели и металлические зубчатые пластины.

К цилиндрическим нагелям относятся гвозди, болты, винты, шурупы, шпильки. Цилиндрические нагеля, применяемые для соединения элементов деревянных конструкций, могут быть изготовлены из стали, алюминия, стеклопластика, прочных пород дерева (дуба, бука, березы). Их чаще всего используют при выполнении узловых и стыковых сопряжений элементов.

К пластинчатым нагелям относятся деревянные (изготовленные из твердых пород дерева) и стальные пластинки, которые вставляются в гнезда, прорезанные цепнодолбежным станком в соединяемых элементах. Пластинчатые нагеля применяются в основном для соединения нескольких брусков по высоте – сплачивания элементов.

Металлические зубчатые пластины (МЗП) представляют собой пластины толщиной 1-2 мм, на одной стороне которых в результате штамповки на специальных прессах получают зубья различной формы и длины. Основные параметры зубьев пластины задаются из условия равенства несущей способности зуба на смятие древесины в нагельном гнезде и изгиба зуба и зависят от толщины исходного листа. К настоящему времени разработано много видов металлических зубчатых пластин, отличающихся между собой формой зуба и формой пластины. МЗП применяются для узловых соединений дощатых элементов.

Расчетная несущая способность нагелей устанавливается согласно формулам строительных норм и правил для деревянных конструкций [1]. При этом необходимо учитывать направление передаваемого нагелем усилия по отношению к волокнам, породе древесины, напряжения в элементах, возникающих от постоянных и временных длительных нагрузок, а также условия эксплуатации. Условия эксплуатации учитываются коэффициентом m_b , значение которого зависит от класса условия эксплуатации. Класс определяется в зависимости от влажности древесины и влажности воздуха. В расчетах закладывается определенное значение влажности древесины и влажности воздуха. В реальных условиях эксплуатации эти параметры постоянно изменяются. В течение дня температура и влажность меняются в больших пределах, поэтому появляется проблема учета циклически изменяющихся параметров окружающей среды при расчете нагельных соединений.

В соответствии с теорией тепломассопереноса [2] в нагельном соединении будет происходить перенос тепла и влаги. Влага в соединении появляется при охлаждении в момент, когда температура воздушной среды вокруг металла будет равна температуре точки росы. Причиной конденсации является наличие в воздухе достаточного количества водяных паров и происходящий процесс перепада температур. Тепловлажное состояние древесины под воздействием изменяющихся параметров окружающей среды можно описать следующей системой дифференциальных уравнений [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}(a \cdot \text{grad}(t)) + \varepsilon \cdot \frac{r^*}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} = \text{div}(k \cdot \text{grad}(u)) + \text{div}(k \cdot \delta_T \cdot \text{grad}(t)) \end{cases} \quad (1)$$

Для решения системы необходимо определить начальные (2 – 3) и граничные (4 – 5) условия, которые связывали бы все параметры переноса с температурой и влажностью: где a – коэффициент теплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; ε – критерий фазового превращения ($0 \leq \varepsilon \leq 1$); r^* – скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$; c – теплоемкость древесины, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; k – коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; δ_T – коэффициент термодиффузии.

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

$$u(x, y, z, \tau)_{\tau=0} = u_0(x, y, z) \quad (3)$$

$$\alpha \cdot [t_c(\tau) - t(x, y, z, \tau)] = \lambda \nabla t(x, y, z, \tau) + q_m(\tau) \cdot r^* \quad (4)$$

$$\beta \cdot [u_{nc}(\tau) - u_c(\tau)] \cdot \rho_c = -k \cdot \rho_0 \cdot [\nabla u(x, y, z, \tau) + \delta_T \cdot \nabla t(x, y, z, \tau)] \quad (5)$$

где α – коэффициент теплообмена между конструкцией и окружающей средой; λ – коэффициент теплопроводности; $q_m(\tau)$ – плотность потока влаги на границе раздела сред, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; β – коэффициент влагообмена между конструкцией и окружающей средой; $u_{nc}(\tau)$ – влагосодержание древесины на границе раздела фаз; $u_c(\tau)$ – влагосодержание древесины в объеме среды; ρ_0 – плотность древесины, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Дифференциальные уравнения (1) совместно с начальными (2 – 3) и граничными (4 – 5) условиями образуют краевые задачи тепло и влагопереноса в общем случае. Решая данные задачи и привязываясь к конкретному нагельному соединению, можно найти реальное распределение температур и влажности в системе «нагель – древесина», которое будет отличаться от того, что было первоначально заложено при расчете соединения коэффициентом m_b . Явления тепломассопереноса необходимо учитывать при расчете нагельных соединений, поскольку они оказывают большое влияние на образование плесени в соединении, гниение древесины и коррозию металлических нагелей.

Список литературы

1. СП 64.13330.2011 Деревянные конструкции. Актуализированная версия СНиП 25-80 / Минрегион России. – М.: ОАО «ЦПП», 2011. – 92 с.
2. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
3. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 1. Общая физико-математическая постановка задачи / С.В. Федосов [и др.] // Строительные материалы. – М.: Стройматериалы, 2014. – №7. – С. 86-91.

УДК 691.32:620.193:66.021.3

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ
ДИНАМИКИ И КИНЕТИКИ МАССОПЕРЕНОСА
НА ПРОЦЕССЫ ЖИДКОСТНОЙ КОРРОЗИИ 1 ВИДА
ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ**

**THEORETICAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DYNAMICS
AND KINETICS OF MASS TRANSFER ON PROCESSES LIQUID CORROSION
OF THE 1 TYPE IN CEMENT CONCRETE**

Сергей В. Федосов*, Варвара Е. Румянцева, Игорь В. Красильников***
Sergej V. Fedosov*, Varvara E. Rumjanceva**, Igor V. Krasilnikov*****

*Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново
(e-mail: fedosov-academic53@mail.ru),

**Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново
(e-mail: vargym@gmail.com)

***Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново
(e-mail: korasb@mail.ru)

Ivanovo State Polytechnic University, Russia, Ivanovo

Аннотация: В работе приведена математическая модель процесса коррозии первого вида цементных бетонов в безразмерном виде. Получены решения задачи, описывающие безразмерные концентрации переносимого компонента по толщине бетона и в жидкой фазе, позволяющие рассчитывать динамику и кинетику процесса.

Abstract: The work presents the dimensionless mathematical model of the corrosion process of the first type in cement concrete. Solutions have been obtained, describing the dimensionless concentration of portable component through concrete thickness and in the liquid phase, allowing to calculate the dynamics and kinetics of the process.

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

Keywords: mathematical modeling, mass transfer, corrosion, cement concrete, concentration, the dynamics and kinetics of the process.

За 150 лет исследований процессов коррозионной деструкции бетона, учеными накоплен большой объем научных знаний о коррозионных процессах, протекающих в бетонах и железобетонах: установлены и исследованы принципиальные схемы химических реакций; даны математические описания некоторых коррозионных процессов; создана система нормативных документов по борьбе с коррозией в строительном комплексе [1-4]. Накопленный большой практический материал позволяет создавать математические модели, с помощью которых возможно с требуемой точностью рассчитать долговечность бетонных и железобетонных конструкций.

Ранее нашей научной школой уже были опубликованы работы по теоретическому исследованию процессов массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов, описывающих процесс на начальной стадии [5], учитывающих наличие внутреннего источника «свободного гидроксида кальция» [6], а также с учетом нелинейности кривой равновесия [7]. Все эти модели основаны на теории массопереноса академика Лыкова А.В. [8]

Предметом настоящей публикации являются результаты математического моделирования массопереноса в замкнутой системе «жидкость-резервуар» для процессов коррозии первого вида. Математически, задача массопереноса в безразмерном виде может быть представлена следующей системой уравнений с начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad Fo_m > 0, \quad (1)$$

$$Z(\bar{x}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = \frac{C_0 - C(x, \tau)}{C_0}|_{\tau=0} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}}|_{\bar{x}=0} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{1}{Bi_m} \cdot \frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = [Z_p(Fo_m) - Z(\bar{x}, Fo_m)]|_{\bar{x}=1}, \quad (4)$$

$$-\frac{\partial Z_{ж}(Fo_m)}{\partial Fo_m} = K_m \cdot \frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}}|_{\bar{x}=1}, \quad (5)$$

$$K_m = \frac{m \cdot S \cdot \delta}{V_{жс}} \cdot \frac{\rho_{бет}}{\rho_{жс}} = \frac{m \cdot G_{бет}}{G_{жс}}. \quad (6)$$

В данной системе уравнений обозначено: $Fo_m = \kappa t / \delta^2$ - массообменный критерий Фурье; $Bi_m = \beta \cdot \delta / k$ - массообменный критерий Био; $Z(\bar{x}, Fo_m)$ - безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона; $Z_p(Fo_m)$ - безразмерная равновесная концентрация на поверхности твердого тела; $Z_{ж}(Fo_m)$ - безразмерная концентрация переносимого компонента в жидкой фазе; $C(x, \tau)$ - концентрация «свободного CaO» в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , кг CaO/кг бетона; $C_p(\tau)$ - равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг CaO/кг бетона; k - коэффициент массопроводности в твердой фазе, м²/с; β - коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с; δ - толщина стенки конструкции, м; x - координата, м; τ - время, с; $\rho_{бет}, \rho_{жс}$ - плотности бетона и жидкости, соответственно, кг/м³; m - константа Генри, кг жидкости/кг бетона; K_m - коэффициент, учитывающий характеристики фаз; $G_{бет}$ - масса бетонного резервуара, кг; $G_{жс}$ - масса жидкости в резервуаре, кг.

Решение системы уравнений велось методом 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 было получено общее решение задачи массопроводности, описывающее динамику полей концентраций:

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{Z_p(0)}{K_m + 1} - 2Bi_m \cdot Z_p(0) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{x}) \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo_m)}{[\mu_n^2 (3 + Bi_m) - Bi_m \cdot K_m] \cdot \sin \mu_n + \mu_n [\mu_n^2 - Bi_m (K_m + 2)] \cdot \cos \mu_n} \quad (7)$$

Чтобы получить выражение для расчета кинетики массопереноса в жидкой фазе, возвратимся к выражению (5). Для этого проводятся следующие математические процедуры: сначала решение (7) дифференцируется по \bar{x} , а затем интегрируется по Fo_m . И в результате получаем выражение, описывающее кинетику процесса в жидкой фазе:

$$Z_{ж}(Fo_m) = Z_{ж}(0) + 2Bi_m \cdot K_m \cdot Z_p(0) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n \cdot [\exp(-\mu_n^2 Fo_m) - 1]}{[\mu_n^2 (3 + Bi_m) - Bi_m \cdot K_m] \cdot \sin \mu_n + \mu_n [\mu_n^2 - Bi_m (K_m + 2)] \cdot \cos \mu_n} \quad (8)$$

Таким образом, выражения (7) и (8) позволяют в совокупности производить расчеты динамики массопереноса целевого компонента из внутренних слоев конструкции к границе раздела фаз; а также кинетику перехода этого компонента через границу раздела фаз и переход от границы раздела в объем жидкости в резервуаре. Безусловным поло-

жительным моментом полученных зависимостей является возможность решения обратной задачи, когда имеющиеся экспериментальные данные с помощью данной модели позволят прогнозировать численное значение источника гидроксида кальция.

Список литературы

1. Москвин В.М. Коррозия бетона. М.: Госстройиздат, 1952. 342 с.
2. Полак А.Ф. Математическая модель процесса коррозии бетона в жидких средах // Бетон и железобетон. 1988. №3. С.30-31.
3. Гусев Б.В., Файвусович А.С. Физико-математическая модель процессов коррозии арматуры железобетонных конструкций в агрессивных средах. Теория. М.: Научный мир, 2011. 56 с.
4. Розенталь Н.К. Новый Свод правил по защите строительных конструкций от коррозии // Материалы I Германо-Российской конференции «Инновационные технологии бетона». М.: МГСУ, 2012. С. 6-8.
5. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Аксаковская Л.Н. Моделирование массопереноса в процессах коррозии бетонов первого вида (малые значения числа Фурье) // Строительные материалы. 2007. №5. С.70-71.
6. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Касьяненко Н.С., Красильников И.В. Моделирование массопереноса в процессах коррозии первого вида цементных бетонов в системе «жидкость - резервуар» при наличии внутреннего источника массы в твердой фазе / Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2 (37). С. 65-70.
7. Румянцева В.Е., Красильников И.В., Шестеркин М.Е.. Теоретические исследования динамики и кинетики процесса массопереноса при коррозии бетона первого вида в замкнутой системе «жидкость-резервуар» с учетом нелинейности кривой равновесия. Международная научно-техническая конференция «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и апк» (ПРЭТ-2014) (23-26 сентября 2014, Иваново, Россия): сборник трудов (секционные доклады) / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2014. с. 149-154.
8. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. М.: Гостехиздат, 1954. 296 с.

УДК 625.768

ВЛИЯНИЕ ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ НА ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТОБЕТОНА INFLUENCE WATERCEMENT RELATION TO DEFORMATION PERFORMANCE OF CONCRETE

Антон Г. Белых*, Любовь А. Кукарских**
Anton G. Belikh*, Lubov A. Kukarskih*

*Военный учебно-научный центр «Военно-воздушная академия имени Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж,
(e-mail: sunstroke-777@mail.ru)

**Военный учебно-научный центр «Военно-воздушная академия имени Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж,
(e-mail: kukarskih.liubov@yandex.ru)

Military Educational Research Centre of Air Force «Air Force Academy after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin», Russia, Voronezh

Аннотация: В статье приводится анализ экспериментальных данных количественной оценки влияния водоцементного отношения и пористости на изменение параметров

прочности, трещиностойкости цементобетона с учетом возраста и величины приложенной нагрузки.

Abstract: In article reduce analysis experimental data quantitative assessment influence of watercement relation, porosity to change dimensions strength, fracture strength of concrete with accounting age and value apply load.

Ключевые слова: водоцементное отношение; пористость; деформационные характеристики; прочность; трещиностойкость; цементобетон.

Keywords: watercement relation; porosity; deformation performance; durability; fracture strength; concrete.

Водоцементным отношением принято считать отношение массы воды к массе цемента в растворе, причем учитывается только свободная, не поглощенная заполнителями вода. Водоцементное отношение, по существу, является решающим фактором при регулировании пористости бетона и от его величины зависит непроницаемость. Авторами было выдвинуто предположение, что водоцементное отношение является одним из основных параметров оказывающих существенное влияние на прочностные характеристики бетона.

Пористым цементобетоном называют бетон с открытой структурой крупных пор, содержание пустот в котором зависит от объема растворной части, то есть суммы объемов цемента, песка и воды. Точное дозирование добавляемой воды и надлежащее уплотнение обеспечивает его прочность. Пористый цементобетон отличается от обычного плотного бетона, тем, что состоит из смеси крупного заполнителя и растворной части в количестве, необходимом для склеивания зерен заполнителя. Зерна крупного заполнителя склеиваются вяжущим материалом при контакте друг с другом, а пространство между ними остается свободным и представляет собой систему крупных воздушных пор, размер которых зависит от размера зерен заполнителя. Содержание воздушной пористости может составлять 10-25% от объема раствора бетона в зависимости от назначения (слои основания или покрытия), требуемой прочности и морозостойкости, высокая пористость (до 25%), доступная для воды, достигается за счет прерывистого гранулометрического состава минерального заполнителя.

Как было установлено авторами при исследовании цементобетона [1], наличие влаги в порах и микротрещинах в значительной мере влияет на его поведение под нагрузкой и снижает надежность. Известно, что в любом составе бетона и любой реальной структуре присутствует физическая связанная влага: при положительных температурах в двух фазах – в виде жидкости и пара, при отрицательных в виде льда, жидкости и пара. Как всякое пористое вещество, имеющее в своей структуре значительные объемы пор, связанных между собой в систему взаимодействующую с поверхностью тела, бетон адсорбирует влагу воздуха на поверхности этих пор и микродефектов и всегда находится в состоянии воздушно-влажностного равновесия с окружающей его средой. По этой причине для бетона тяжело говорить о его физико-механических характеристиках как о константе, даже прочность бетона на сжатие в одних и тех же образцах может варьировать до 30%, в зависимости от степени водонасыщения. Так, наличие воды в структуре бетона повышает деформативные характеристики материала – модули упругости и сдвига, коэффициент Пуассона и значительно снижает его физико-механические характеристики – прочность на сжатие, удельную поверхностную энергию и коэффициент сцепления первого рода. В таблице 1 приведены экспериментальные данные, анализируя которые, можно сделать вывод о том, что с увеличением пористости снижается прочность цементобетона, и до определенного момента уменьшается параметр трещиностойкости. Исследования проводились с использованием неразрушающего метода акустической эмиссии, основанном на регистрации сигналов упругих акустических волн генерируемых в материале при его деформации и последующем разрушении [3]. Преимуществами данного метода являются: высокая точность измерений, возможность

локализации источника акустической эмиссии (дефекта структуры материала) с точностью до миллиметров, определение степени опасности данного дефекта для конструкции в целом, возможность постоянного мониторинга эксплуатационного состояния крупномасштабных конструкций, источником сигнала является непосредственно сам дефект при воздействии нагрузки, не требует использования габаритного оборудования. Использование данного метода позволило получить ряд зависимостей, связывающих изменение механических характеристик цементобетона от его пористости, численные параметры данных зависимостей приведены в таблице 1.

Также значительное влияние на изменение прочности и трещиностойкости бетонов оказывают водоцементное отношение и возраст бетона, за счёт возрастания степени гидратации вяжущего[2].

Таблица 1. Влияние пористости на изменение прочности R_{bt} , и параметра трещиностойкости цементобетона

Пористость	Прочность	Параметр трещиностойкости
10.3	4.3	42.2
11.4	4.1	34.1
12.1	3.57	25.6
13-4	339	23.4
14.2	2.93	20.2
37.0	1.8	16.8
35.5	1.6	17.76
52.0	1.4	17.4
65.0	0.9	25.8

При снижении водоцементного отношения с 0,6 до 0,3 происходит возрастание энергии разрушения G_{1c} и критического коэффициента интенсивности напряжений k_{1c} на 66 % при увеличении прочности образцов на 48 % (таблица 2). Закономерность таких различий связана с увеличением плотности и изменением пористости бетона, при этом общая пористость образцов с увеличением В/Ц до 0,6 увеличилась приблизительно на 40 %.

Таблица 2. Влияние различных факторов на изменение прочности и трещиностойкости бетона

Наименование факторов	R_b , МН/м ²	R_{brf} , МН/м ²	E , МН/м ²	G_{1c} , Н/м	k_{1c} , МН/м ^{3/2}	F_c , Н
Водоцементное отношение						
0,3	43,8	4,6	29 800	120,3	1,89	2130
0,4	36,7	3,9	28 300	89,6	1,6	1806
0,5	32,1	3,39	27 400	59,2	1,28	1564
0,6	31,4	3,1	26 900	48,5	1,14	1435
Возраст бетона, сут.						
7	24,9	2,7	25 800	35,6	0,96	1250
14	30,8	2,98	26 300	44,9	1,09	1380
28	31,7	3,22	27 150	53,5	1,21	1491
65	32,1	3,39	27 400	59,2	1,28	1564

Степень гидратации вяжущего также оказывает существенное влияние на изменение пористости, которая с увеличением возраста бетона снижается с 18 % в возрасте 14 суток до 12,2 % спустя три месяца твердения. Изменение структуры бетона сопровождается изменением его свойств, в частности, прочности и трещиностойкости. Проведённые испытания бетона по полным диаграммам деформирования в возрасте 7, 14, 28 и 65 суток показали (таблица 2) тенденцию к непрерывному росту параметров трещиностойкости во времени. Коэффициент интенсивности напряжений в течение двухмесячного твердения бетона увеличился на 33 %, а прочность возросла на 25 %. Изменение параметров трещиностойкости происходило в первые 28 суток, а по истечении 65 суток и его рост практически останавливается.

Таблица 3. Влияние водоцементного отношения на прочность цементобетона с учетом изменения скорости нагружения

В/Ц=0,4				В/Ц=0,5				В/Ц=0,6			
$\lg R_{bt}$, МПа	R_{bt} , МПа	$\lg \dot{\sigma}$		$\lg R_{bt}$, МПа	$\dot{\sigma}$, МПа/с	R_{bt} , МПа		$\lg \dot{\sigma}$			$\lg R_{bt}$, МПа
$1 \lg \dot{\sigma}$											
R_{bt} , $\dot{\sigma}$, МПа		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
120,0013	3,47	-2,9	0,54	0,0014	3,24	-2,85	0,51	0,00158	2,82	-2,8	0,45
0,0025	3,8	-2,6	0,58	0,0025	3,31	-2,6	0,52	0,0025	2,82	-2,6	0,45
0,00398	3,72	-2,4	0,57	0,00398	3,24	-2,4	0,51	0,00398	2,88	-2,4	0,46
0,0126	4,07	-1,9	0,61	0,01	3,55	-2,0	0,55	0,0158	3,24	-1,8	0,51
0,014	3,89	-1,85	0,59	0,0158	3,47	-1,8	0,54	0,0199	3,31	-1,7	0,52
0,0158	4,07	-1,8	0,61	0,0794	3,89	-1,1	0,59	0,025	3,16	-1,6	0,5
0,126	4,17	-0,9	0,62	0,126	3,8	-0,9	0,58	0,1	3,47	-1,0	0,54
0,158	4,47	-0,8	0,65	0,199	3,85	-0,7	0,585	0,158	3,61	-0,8	0,56
0,794	4,89	-0,1	0,69	1,0	4,27	0	0,63	0,251	3,59	-0,6	0,55
1,0	4,73	0	0,675	1,58	4,47	0,2	0,65	0,63	3,72	-0,2	0,57
2,5	4,79	0,4	0,68	1,99	4,37	0,3	0,64	1,0	3,98	0	0,6
10	5,25	1,0	0,72	10	4,89	0,35	0,69	1,58	3,98	0,2	0,6

В результате обработки матрицы математического планирования эксперимента получены уравнения регрессии, связывающие параметры прочности и трещиностойкости бетона с совокупностью изменений характеристик его составляющих:

$$k_{1c} = 1,064 + \frac{0,036}{(B/C)^2} - \frac{125}{\alpha^2} - \frac{0,417}{D_{\max}^2} + \frac{0,0090}{\left(\frac{V_{y.k.}}{V_3}\right)^2} \quad (1)$$

$$G_{1c} = 51,65 + \frac{3,241}{(B/C)^2} - \frac{9354}{\alpha^2} - \frac{16,32}{D_{\max}^2} + \frac{0,358}{\left(\frac{V_{y.k.}}{V_3}\right)^2} \quad (2)$$

$$R_{bif} = 3,046 + \frac{0,063}{(B/L)^2} - \frac{226}{\alpha^2} - \frac{6,654}{D_{\max}^2} + \left(\frac{V_{ц.к.}}{V_3} \right)^2, \quad (3)$$

По величине коэффициентов функций цели в уравнениях регрессии можно судить о влиянии каждого фактора варьирования на параметры прочности и трещиностойкости. Анализ результатов экспериментов, согласно полученным зависимостям (1-3), показывает, что физико-механические свойства бетона повышаются при снижении водоцементного отношения, а также при увеличении максимального размера крупного запол-

нителя D_{\max} , объема заполнителей $\frac{V_{ц.к.}}{V_3}$ и степени гидратации вяжущего a .

Список литературы

1. Баженов Ю.М. Влияние влажности на прочность бетона при различной скорости нагружения / Ю.М. Баженов // Бетон и железобетон. – 1966. – С. 6-8.
2. Берг О.Я. Физические основы теории прочности / О.Я. Берг // – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.
3. Перфилов В.А. Применение метода акусто-эмиссионного контроля для контроля прочности и трещиностойкости композиционных материалов / В.А. Перфилов // Изв. Вузов. Технические науки. – 2005. – С. 92-93.

УДК 666.97:620.193:519.518

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ КОРРОЗИИ II ВИДА ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ В ЖИДКИХ АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF THE MASS TRANSFER PROCESSES AT THE II TYPE CORROSION OF THE CEMENT CONCRETE IN LIQUID HOSTILE ENVIRONMENT

Сергей В. Федосов*, Варвара Е. Румянцева**,
Наталья С. Касьяненко***, Виктория С. Коновалова****
Sergey V. Fedosov*, Varvara E. Roumyantseva**,
Nataliya S. Kasiyanenko***, Victoriya S. Konovalova****

* Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново,
(e-mail: prezident@ivgpu.com).

Ivanovo State Polytechnical University, Russia, Ivanovo

** Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново,
(e-mail: varrym@gmail.com).

Ivanovo State Polytechnical University, Russia, Ivanovo

*** ООО "Научно-исследовательский институт охраны труда в г. Иваново", Иваново
(e-mail: kasiyanenko@gmail.com).

RLS "Research Institute of labor protection in Ivanovo", Ivanovo

**** Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново,
(e-mail: kotprotiv@yandex.ru).

Ivanovo State Polytechnical University, Russia, Ivanovo

Аннотация: Представлены теоретические аспекты жидкостной коррозии бетона II вида. Показаны необходимость изучения коррозии бетонов II вида и использования математических методов моделирования жидкостной коррозии. Экспериментальные ис-

следования воздействия агрессивных сред на цементный бетон позволили определить значения коэффициентов массопроводности и массоотдачи.

Abstract: Theoretical aspects of liquid corrosion of concrete of the II type are presented. The necessity of studying the corrosion of concrete of the II type and to use of mathematical methods of modeling of liquid corrosion are shown. Experimental studies of impact of aggressive environments on the cement concrete allowed to determine the values of the coefficients of mass conductivity and mass delivery.

Ключевые слова: коррозия бетона II вида, массоперенос, жидкостная коррозия.

Keywords: corrosion of concrete of the II type, mass transfer, liquid corrosion.

Принято считать, что к процессам коррозии бетонов второго вида относится взаимодействие гидроксида кальция с солями ($MgCl_2$, $MgSO_4$) и неорганическими кислотами (H_2CO_3 , HCl), растворенными в природных речных, морских и почвенных водах. Процессы коррозии второго вида развиваются с большой скоростью и представляют значительную опасность для бетонных и железобетонных конструкций. При воздействии растворов веществ, образующих с компонентами цементного камня практически нерастворимые аморфные продукты (например, гидроксид магния), в начальной стадии коррозионного процесса происходит уплотнение бетона, замедление скорости процесса. Затем по мере разрушения гидратированных соединений цементного камня снижается прочность и долговечность бетонной конструкции.

В работах профессора В.М. Москвина и его научной школы [1 – 3] отмечается, что процессы коррозии бетона второго вида, сопровождающиеся химическим взаимодействием агрессивной среды и компонентов бетона, протекают по следующей схеме (рис.1.).

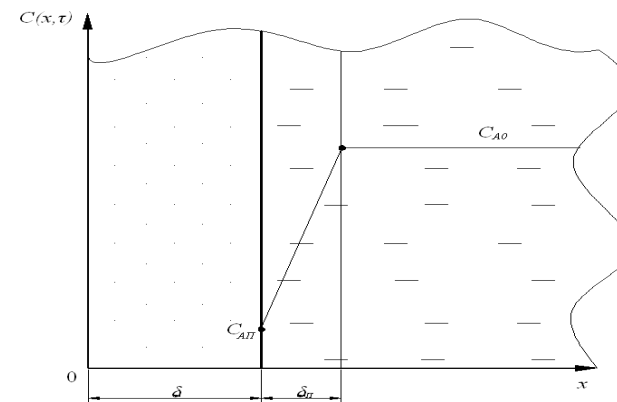


Рис. 1. К иллюстрации пленочной модели массоопереноса с химической реакцией
 δ - толщина изделия; $\delta_{П}$ - толщина пограничного слоя

Вещество $A_{ж}$ – реагент из объема жидкой фазы (резервуара) посредством массоотдачи переходит к границе раздела фаз, где взаимодействует с реагентом бетонной конструкции (гидроксидом кальция).

Процессы взаимодействия гидроксида кальция при солевой коррозии протекают по схеме:



Гидроксид кальция (B_T) взаимодействует с агрессивным компонентом ($A_{ж}$), в результате на поверхности бетона образуется твердая фаза (F_T) – слой не растворимого продукта реакции, а Ca^{2+} переходит в жидкую фазу, далее механизм усложняется, по-

является стадия диффузии реагента $A_{\text{ж}}$ через слой не растворимого продукта (F_{T}), а граница реакции продвигается вглубь материала. Отметим, в свою очередь, что данный механизм в процессах химической технологии изучен и математически описан достаточно полно [4, 5].

Между тем первой и важнейшей особенностью массопереноса в процессах жидкостной коррозии является фактор времени. Процессы химической технологии протекают порой за секунды, максимум за часы. Коррозионные процессы длятся месяцами, годами; часто оставаясь незаметными внешне, и лишь через годы, а то и десятилетия наступает необратимое разрушение и обвал конструкций.

На начальном этапе рассмотрения процессов коррозии II вида целесообразно полагать развитие по диффузионно-кинетическому механизму: диффузия Ca^{2+} посредством массопроводности из материала изделия к границе раздела фаз, диффузия компонента ($A_{\text{ж}}$) из объема к границе раздела фаз и химическое (кинетическое) взаимодействие компонентов в пограничном слое.

Интенсификация гидродинамических условий потока повышением скорости обтекания и, его турбулизацией является главной целью химико-технологических процессов, приводящей к увеличению скорости процесса и сокращению его длительности.

И, наоборот, целью эксплуатации строительных объектов является увеличение долговечности, а значит – создание условий для снижения скорости коррозионных процессов.

В работе рассматривается случай воздействия агрессивных растворов на цементный бетон – это 0,001% водного раствора HCl и 2% водного раствора соли MgCl_2 . Концентрации агрессивных сред, в количестве $\text{pH} = 5$ для водного раствора неорганической кислоты и 5000 мг/л каионов Mg^{2+} приняли в соответствии с ГОСТ 27677-88 «Защита от коррозии в строительстве. Бетоны. Общие требования к проведению испытаний» по таблице 3 приложения 2, как допускаемую концентрацию.

Выводы:

Экспериментальные исследования позволяют установить значения коэффициентов массопроводности и массоотдачи. Для рассматриваемых систем значения коэффициентов массопроводности находится в диапазоне $2,52 \cdot 10^{-9} - 1,25 \cdot 10^{-10}$ ($\text{м}^2/\text{с}$), коэффициент массоотдачи в жидкой фазе – $0,97 \cdot 10^{-8} - 1,24 \cdot 10^{-9}$ ($\text{м}/\text{с}$).

Для цементных бетонов продолжительность начального периода коррозии второго вида при воздействии 2% водного раствора MgCl_2 составит порядка 2,8 года с момента пуска конструкции в эксплуатацию до критической концентрации гидроксида кальция (1,1 г/л) в порах бетона, а для 0,001% водного раствора HCl – 5,1 года, при которой начинается разложение высокоосновных составляющих цементного камня.

Список литературы

1. Москвин В.М. Коррозия бетона. – М.: Госстройиздат, 1952. – 342 с.
2. Защита строительных конструкций промышленных зданий от коррозии / Под ред. Иванова Ф.М. и Савиной Ю.А. – М.: Стройиздат, 1973. – 174 с.
3. Москвин, В.М. О роли ионного и солевого состава раствора при сульфатной коррозии бетона / В.М. Москвин, Г.В. Любарская // Бетон и железобетон. – 1982. – №9. – с.16 -18.
4. Федосов, С.В. Массоперенос гидроксида кальция в процессах коррозии бетона второго вида / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, В.А. Хрунов, В.Л. Смельцов // Ученые записки инженерно-строительного факультета. – Иваново: Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, 2008. – с. 28 - 32.
5. Федосов, С.В. О некоторых проблемах математического моделирования жидкостной коррозии бетона второго вида / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко // Вестник отделения строительных наук выпуск №13. – Москва. – Орел. – 2009. – с.93 – 101.

УДК 539.217.691

ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА РАЗРУШЕНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД EFFECT OF AN WAVE PROCESS ON THE FRACTURE OF A WATER SATURATED POROUS MEDIUM

Любовь А. Кукарских*, Антон Г. Белых
Liubov A. Kukarskikh*, Anton G. Belikh****

**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж,
(e-mail: kukarskih.liubov@yandex.ru).*

***Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж,
(e-mail: sunstroke-777@mail.ru).*

*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: Изучаются диссипативные процессы при гармоническом деформировании упругих водонасыщенных пористых сред, заданных комплексными модулями упругости и комплексными модулями, зависящими от пористости и сжимаемости жидкости. Получены формулы для определения скоростей распространения и коэффициентов затухания продольных звуковых волн. Построена зависимость отношения мнимой части модуля упругости к действительной.

Abstract: We study the dissipative processes of the harmonic deformation elastic water saturated porous media, complex modulus of elasticity and depend on porosity and compressibility of liquids complex modulus specified. Formulas for stacking velocity of propagation and attenuation coefficient of longitudinal sound waves received. Graph the dependence relations imaginary part modulus of elasticity to real are constructed.

Ключевые слова: звуковая волна; пористость; комплексное число; коэффициент затухания; скорость распространения.

Keywords: sound waves; porosity; complex number; attenuation coefficient; velocity of propagation.

Изучением волновых процессов занимаются очень давно. В этом направлении опубликовано много работ, накоплен огромный опыт и имеются значительные наработки. Исследования влияния волновых процессов на различные среды продолжают и в наше время. Одной из целей исследований является изучение и прогнозирование поведения материалов при обработке их волнами различной природы. Любые материалы, которые встречаются в природе и применяются в различных процессах народного хозяйства, представляют собой насыщенные жидкостью или газом пористые среды. К водонасыщенным пористым средам можно отнести и бетон, и цементобетон, и материал взлетно-посадочных полос аэродромных покрытий, да и сами аэродромные покрытия.

Современные требования, предъявляемые к бетону, как наиболее широко применяемому строительному материалу, определяют необходимость разработки физически и математически обоснованной теории процессов его разрушения в различных условиях эксплуатации. Большое значение приобретают явления образования, распространения трещин при действии нагрузок и окружающей среды. Исследование причин возникновения разрушения бетона создает физическую основу для установления максимально допустимых механических нагрузок на конструкции.

На цементобетонные аэродромные покрытия существенное влияние оказывают динамические нагрузки, которые обусловлены непосредственным воздействием шасси

воздушных судов на покрытие. Аэродромное покрытие, от состояния которого зависит безопасность и регулярность полетов, постоянно подвергается воздействию и разрушается, как показывает многолетний опыт, раньше установленного срока службы.

При инженерных расчетах прочностных характеристик покрытия учитываются коэффициенты разгрузки, сопровождающие волновые процессы, возникающие при движении воздушных судов по аэродромному покрытию. Для прогнозирования влияния волновых процессов на характеристики и свойства аэродромных покрытий одних инженерных расчетов недостаточно, необходимо еще и создание математических моделей. Математически достаточно сложно описать физические процессы, происходящие в тех или иных материалах под воздействием нагружения, поэтому строятся модели, способные более или менее адекватно отражать особенности поведения материала в определенной обстановке. При этом моделируется процесс деформирования и реологические свойства пористых сред. Создание математических моделей, наиболее точно описывающих процесс воздействия опор колес воздушных судов на аэродромное покрытие, всегда актуально и злободневно.

Рассмотрим распространение звуковых волн в насыщенной жидкостью пористой среде. Найдем характеристики распространения продольных звуковых волн (волн сжатия).

Пористость понимается как «эффективная» пористость, учитывающая лишь сообщающиеся между собой поры. Изолированные поры рассматриваются как элементы твердой части пористого скелета [1]. Будем считать, что компоненты пористой среды являются сплошными (размеры пор малы) и в каждой точке среды существует два вектора смещения: вектор смещения скелета пористой среды и вектор смещения жидкости.

Соотношения между вектором перемещения [1] и уравнениями движения [2] деформируемой водонасыщенной пористой среды можно записать в виде [3, 4]

$$\lambda^{\epsilon} \frac{\partial^2 u_j^{(1)}}{\partial x_i \partial x_j} + \mu^{\epsilon} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j^{(1)}}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_j} \right) + Q^{\epsilon} \frac{\partial^2 u_j^{(2)}}{\partial x_i \partial x_j} = \rho_{11} \frac{\partial^2 u_i^{(1)}}{\partial t^2} + \rho_{12} \frac{\partial^2 u_i^{(2)}}{\partial t^2}$$

$$Q^{\epsilon} \frac{\partial^2 u_j^{(1)}}{\partial x_i \partial x_j} + R^{\epsilon} \frac{\partial^2 u_j^{(2)}}{\partial x_i \partial x_j} = \rho_{12} \frac{\partial^2 u_i^{(1)}}{\partial t^2} + \rho_{22} \frac{\partial^2 u_i^{(2)}}{\partial t^2} \quad (1)$$

Здесь $u_i^{(1)}$ – компоненты вектора перемещения упругой среды (скелета твердой фазы); $u_i^{(2)}$ – компоненты вектора перемещения жидкости; $\lambda^{\epsilon}, \mu^{\epsilon}$ – комплексные модули коэффициентов упругости Ламе ($\lambda^{\epsilon} = \lambda_1 + i\lambda_2$, $\mu^{\epsilon} = \mu_1 + i\mu_2$); $Q^{\epsilon}, R^{\epsilon}$ – комплексные модули, зависящие от пористости и сжимаемости жидкости ($Q^{\epsilon} = Q_1 + iQ_2$, $R^{\epsilon} = R_1 + iR_2$); ρ_{12} – интенсивность перехода массы из жидкой фазы в твердую; ρ_1, ρ_2 – массы твердой фазы и жидкости в единице объема среды ($\rho_{11} = \rho_1 - \rho_{12}$, $\rho_{22} = \rho_2 - \rho_{12}$); ρ_{11}, ρ_{22} – эффективные массы твердой фазы и жидкости в порах ($\rho_{11} = \rho_1 / V_1$, $\rho_{22} = \rho_2 / V_2$); V_1, V_2 – доли каждой фазы в объеме среды, при чем $V_1 + V_2 = 1$ и $V_1, V_2 > 0$.

Решение системы (1) будем искать в виде затухающей волны [5]

$$u_j^{(\gamma)} = A_j^{(\gamma)} \exp[i\omega t - (\alpha + i\beta)x_k v_k], \quad \beta = \frac{\omega}{c}, \quad \gamma = 1, 2, \quad (2)$$

где v_i – координаты единичного вектора в направлении скорости распространения волны, $c > 0$ – скорость волны, $\alpha > 0$ – коэффициент затухания волны, $\omega > 0$ – круговая частота, β – фазовая постоянная, $A_j^{(\gamma)}$ – амплитуды колебания фаз.

После преобразований получим

$$[(\lambda^{\epsilon} + \mu^{\epsilon}) A_j^{(1)} v_i v_j + \mu^{\epsilon} A_i^{(1)}] (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{11} \omega^2 A_i^{(1)} + Q^{\epsilon} A_j^{(2)} v_i v_j (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{12} \omega^2 A_i^{(2)} = 0$$

$$Q^{\epsilon} A_j^{(1)} v_i v_j (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{12} \omega^2 A_i^{(1)} + R^{\epsilon} A_j^{(2)} v_i v_j (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{22} \omega^2 A_i^{(2)} = 0 \quad (3)$$

Для определения характеристик продольных волн (скорости распространения и коэффициент затухания) обе части (3) умножим на v_i , просуммируем по индексу i и предположим, что $A_i^{(1)} v_i = A_j^{(1)} v_j = N_1 \neq 0$ и $A_i^{(2)} v_i = A_j^{(2)} v_j = N_2 \neq 0$.

В результате получим однородную систему уравнений с комплексными коэффициентами

$$[(\lambda^{\epsilon} + 2\mu^{\epsilon})(\alpha + i\beta)^2 + \rho_{11} \omega^2] N_1 + [Q^{\epsilon}(\alpha + i\beta)^2 + \rho_{12} \omega^2] N_2 = 0,$$

$$[Q^{\epsilon}(\alpha + i\beta)^2 + \rho_{12} \omega^2] N_1 + [R^{\epsilon}(\alpha + i\beta)^2 + \rho_{22} \omega^2] N_2 = 0 \quad (4)$$

Решая систему уравнений, получим биквадратное алгебраическое уравнение относительно $\alpha + i\beta$

$$[(\lambda^{\epsilon} + 2\mu^{\epsilon}) R^{\epsilon} - Q^{\epsilon 2}] (\alpha + i\beta)^4 + [\rho_{11} R^{\epsilon} + \rho_{22} (\lambda^{\epsilon} + 2\mu^{\epsilon}) - 2\rho_{12} Q^{\epsilon}] \omega^2 (\alpha + i\beta)^2 + (\rho_{11} \rho_{22} - \rho_{12}^2) \omega^4 = 0$$

Разделим это уравнение на $(\alpha + i\beta)^4$ и выразим $\frac{1}{(\alpha + i\beta)^2}$ через z^{ϵ} , $\rho_{11} \rho_{22} - \rho_{12}^2$ через K , $\lambda^{\epsilon} + 2\mu^{\epsilon}$ через L^{ϵ} , где $L^{\epsilon} = L_1 + iL_2$

Так как, $Q^{\epsilon}, R^{\epsilon}, L^{\epsilon}$ – комплексные числа, введем следующие обозначения

$$\Gamma_1 = \rho_{11} R_1 + \rho_{22} L_1 - 2\rho_{12} Q_1, \quad \Gamma_2 = \rho_{11} R_2 + \rho_{22} L_2 - 2\rho_{12} Q_2$$

$$E_1 = L_1 R_1 - L_2 R_2 - Q_1^2 + Q_2^2, \quad \gamma_2 = L_2 R_1 + L_1 R_2 - 2Q_1 Q_2$$

Тогда алгебраическое уравнение можно записать в виде

$$K \omega^4 z^{\epsilon 2} + (\Gamma_1 + i\Gamma_2) \omega^2 z^{\epsilon} + E_1 + iE_2 = 0 \quad (5)$$

Уравнение (5) можно разрешить относительно действительной ($\alpha^2 - \beta^2$) и мнимой частей $\alpha\beta$

$$\alpha^2 - \beta^2 = - \frac{2K\omega^2 (\Gamma_1 \pm \sqrt{\Gamma_1^2 - \gamma_2} \cos \frac{\phi_1}{2})}{(\Gamma_1 \pm \sqrt{\Gamma_1^2 - \gamma_2} \cos \frac{\phi_1}{2})^2 + (\Gamma_2 \pm \sqrt{\Gamma_2^2 - \gamma_2} \sin \frac{\phi_1}{2})^2},$$

$$\alpha\beta = \frac{K\omega^2 (\Gamma_2 \pm \sqrt{\Gamma_2^2 - \gamma_2} \sin \frac{\phi_1}{2})}{(\Gamma_1 \pm \sqrt{\Gamma_1^2 - \gamma_2} \cos \frac{\phi_1}{2})^2 + (\Gamma_2 \pm \sqrt{\Gamma_2^2 - \gamma_2} \sin \frac{\phi_1}{2})^2}, \quad (6)$$

где $r = \sqrt{\Gamma_1^2 + \gamma_2^2}$, $q_1 = \Gamma_1^2 - \Gamma_2^2 - 4KE_1$, $q_2 = 2\Gamma_1 \Gamma_2 - 4KE_2$, $\text{tg } \phi_1 = \frac{q_2}{q_1}$, $0 \leq \phi_1 \leq \frac{\pi}{2}$ при

$$\Gamma_1 \pm \sqrt{\Gamma_1^2 - \gamma_2} \cos \frac{\phi_1}{2} = d_1 \quad \text{и} \quad \Gamma_2 \pm \sqrt{\Gamma_2^2 - \gamma_2} \sin \frac{\phi_1}{2} = d_2$$

Обозначим

Из соотношений (6) и введенных обозначений получим коэффициент затухания α .

$$\alpha = \sqrt{\frac{K\omega^2 (d_1 + \sqrt{d_1^2 + d_2^2})}{d_1^2 + d_2^2}}$$

и фазовую постоянную β

$$\beta = \sqrt{\frac{K\omega^2 d_2^2}{(d_1^2 + d_2^2)(d_1 + \sqrt{d_1^2 + d_2^2})}} = \omega \sqrt{\frac{Kd_2^2}{(d_1^2 + d_2^2)(d_1 + \sqrt{d_1^2 + d_2^2})}}$$

Скорость продольной волны c_l , учитывая, что $\beta = \frac{\omega}{c_l}$, равна

$$c_{l_{1,2}} = \sqrt{\frac{(d_1^2 + d_2^2)(d_1 + \sqrt{d_1^2 + d_2^2})}{Kd_2^2}} \quad (7)$$

Так как величины d_1 и d_2 имеют знаки “ \pm ”, то в водонасыщенных пористых средах существует два типа продольных волн $c_{l_{1,2}}$ и два типа коэффициентов затухания $\alpha_{1,2}$, которые находятся по формуле (7).

Из первых скобок числителя формулы (7) вынесем d_1^2 , из вторых d_1 .

$$c_{l_{1,2}} = \sqrt{\frac{d_1^2 \left(1 + \frac{d_2^2}{d_1^2}\right) d_1 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{d_2^2}{d_1^2}}\right)}{Kd_2^2}} = \sqrt{\frac{\left(1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2\right) d_1 \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2}\right)}{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 K}} \quad (8)$$

С учетом обозначения $\eta = \sqrt{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2}$, скорости распространения продольных звуковых волн будут иметь следующий вид

$$c_{l_{1,2}} = \sqrt{\frac{d_1 \eta^2 (1 + \eta)}{K(\eta^2 - 1)}} = \sqrt{\frac{d_1 \eta^2}{K(\eta - 1)}}$$

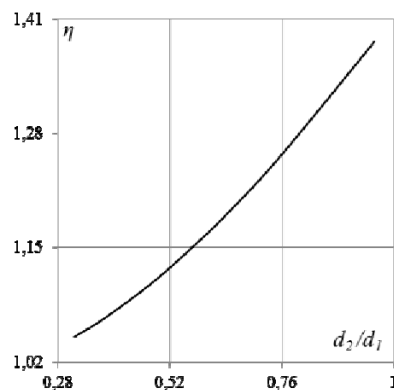


Рисунок 1 – Зависимость η от отношения мнимой части модуля упругости к действительной

Коэффициенты затухания распространения продольных звуковых волн при этом можно будет записать в форме

$$\alpha = \sqrt{\frac{K\omega^2 (1 + \eta)}{d_1 \eta^2}}$$

Итак, зная комплексные модули упругости можно определить коэффициенты затухания и скорости распространения продольных волн в упругих водонасыщенных пористых средах.

График зависимости параметра η от отношения d_2/d_1 приведен на рисунке 1, где d_1 характеризует действительную часть модулей упругости пористой среды, d_2 – мнимую часть.

Зная коэффициенты затухания и скорости распространения продольных волн в водонасыщенных пористых средах, можно определить их влияние на физико-механические характеристики этих сред. Процесс прохождения разного рода волнами любой среды оказывает влияние на её разрушение и деформирование.

Математическое моделирование последствий динамических нагрузок на материал среды, в частности цементобетонное покрытие, позволяет прогнозировать и улучшать его эксплуатационные характеристики.

Аналитическое исследование распространения упругих волн в материале аэродромного покрытия при силовом воздействии воздушных судов будет в значительной степени способствовать решению проблемы диагностики текущего эксплуатационного их состояния и в последующем вычислению остаточного ресурса безотказной работы.

Список литературы

1. Biot M.A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid /M.A. Biot //J. of Applied Phisic, 1955. v. 26. № 2. 182-185 p.
2. Biot M.A. Theory propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid I. Low-Frequency Range /M.A. Biot //J. Acoust. Soc. America, 1956. v. 28. № 2. 168-178 p.
3. Косачевский Л.Я. О распространении упругих волн в двухкомпонентных средах //Л.Я. Косачевский // ПММ, 1959. Т. 23. Вып. 6. 1115-1123 с.
4. Поленов В.С. Распространение волн в насыщенной жидкостью неоднородной пористой среде/В.С. Поленов, А.В. Чигарев // Изд РАН. ПММ, 2010. Т 74, вып. 2. 276-284 с.
5. Мешков С.И. О распространении звуковых волн в наследственно упругой среде /С.И. Мешков, Ю.А. Россихин // ПМТФ, 1968. № 5. 89-93 с.

УДК 620.197.4

МАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССАХ КОРРОЗИИ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ **MASS TRANSFER OF CEMENT CONCRETE CORROSION**

С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, С.А. Логинова
S.V. Fedosov, V.E. Rumyantseva, S.A. Loginova

*ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education
«Ivanovo State Polytechnic University»*

Аннотация: Рассмотрены виды коррозионных процессов при воздействии на цементные бетоны различных агрессивных сред в рамках классификации по В.М. Москвину и описаны их отличительные признаки. В статье отмечается, что разрушения цементных бетонов определяются процессами массопереноса и химических реакций. На основании этого дается обоснование общности методологического подхода к моделированию процессов массопереноса при жидкостной коррозии строительных материалов.

Annotation: The types of corrosion processes under the action of cement concrete various aggressive environments in the classification of V.M. Moskvina and describe their features. The article notes that the processes of mass transfer and chemical reactions determine the failure of cement concrete. Based on this rationale given community methodological approach to modeling the processes of mass transfer in liquid corrosion of building materials.

Ключевые слова: цемент; бетон; коррозия; массоперенос.

Keywords and phrases: cement; concrete; corrosion; mass transfer.

В современных условиях эксплуатации строительные материалы под воздействием различных агрессивных сред всё больше подвергаются коррозионным разрушениям, что приводит к постепенному снижению эксплуатационной надежности конструкций.

Москвиным В.М. [1] была предложена классификация основных видов коррозии. На основе полученных экспериментальных данных и накопленного опыта эксплуатации конструкций процессы, протекающие при коррозии бетона, были разделены на три основных вида.

Стоит отметить, что в естественных условиях обычно имеет место одновременное проявление нескольких видов коррозии бетона, но один из них является ведущим [2].

Гидратированные материалы, составляющие цементный камень, в различной степени растворимы в воде. Разрушение бетона вследствие растворения и выноса из его структуры компонентов цементного камня названо коррозией I-го вида. Наиболее растворимым компонентом портландцементного камня является гидроксид кальция. Гидросиликаты и гидроалюминаты кальция также поддаются растворению в воде. Выщелачивание гидроксида кальция из бетона приводит к потере прочности бетона.

Коррозия II вида отличается от коррозии I вида тем, что повреждение бетона определяется растворением компонентов цементного камня, и их химическим взаимодействием с агрессивными компонентами, содержащимися в воде с образованием растворимых продуктов коррозии или с выделением труднорастворимых соединений в виде рыхлых новообразований, не обладающих прочностными свойствами. Важным в этом случае является тип кислоты и ее содержание в водном растворе. Четко по степени агрессивности разделяются органические кислоты, агрессивность которых для цемент-

ных бетонов определяется растворимостью их кальциевых солей. Так, например, углекислая, лимонная, молочная кислоты сильноагрессивны, а щавелевая слабоагрессивна.

К III виду коррозии относятся процессы, при которых разрушение – снижение прочности – обусловлено возникновением внутренних напряжений в результате образования в цементном камне новых соединений с увеличением объема твердой фазы или кристаллизации соединений из окружающего водного раствора.

За почти столетний период экстремальных исследований коррозии бетона накоплен большой фактический материал, что создало предпосылки для обобщений, попытки представить результаты в форме математических моделей.

Массоперенос веществ в теле бетона осуществляется путем фильтрации жидкости или газа при наличии градиента давления и/или диффузии веществ при наличии разности концентраций.

В статье [2] приводится математическая модель коррозионного массопереноса характерная при коррозии I-го вида:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta. \quad (1)$$

Начальные условия:

$$C(x, \tau)|_{\tau=0} = C(x, 0). \quad (2)$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$k \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta [C_p(\tau) - C(\delta, \tau)]. \quad (4)$$

где $C(x, \tau)$ – концентрация «свободного гидроксида кальция» в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , в пересчете на CaO, кг CaO/кг бетона; $C_p(\tau)$ – равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг CaO/кг бетона; k – коэффициент массопроводности в твердой фазе, м²/с; δ – толщина стенки конструкции, м; x – координата, м; τ – время, с; β – коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с.

В свою очередь, установленные закономерности массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов, протекающих по механизму 2 вида [3], сводятся к разработке математической модели диффузии «свободного гидроксида кальция» в гетерогенной системе «бетон – жидкость», которую в твердой фазе можно представить уравнениями вида:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v(x)}{\rho_\delta}, \quad \tau \geq 0, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (5)$$

Начальные условия:

$$C(x, \tau)|_{\tau=0} = C_0(x) \quad (6)$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (7)$$

$$-k\rho_\delta \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = q_i \quad (8)$$

Процессы массообмена являются одним из важнейших разделов современной науки и имеют большое практическое значение в строительном материаловедении. Знание законов массопереноса дает возможность рационального проектирования строительных конструкций в соответствии с режимом их эксплуатации, оптимального подбора для нее материалов, оценки состояния конструкций.

Список литературы

1. Москвин, В. М. Коррозия бетона / В. М. Москвин. – М: Госстройиздат, 1952. – 342 с.
2. Моделирование массопереноса в процессах коррозии бетонов первого вида (малые значения числа Фурье) / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, В. А. Хрунов, Л. Н. Аксаковская // Строит. материалы. – 2007. – № 5. – С. 70 – 71.
3. Федосов, С. В. Математическое моделирование массопереноса в процессах коррозии бетона второго вида / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, Н. С. Касьяненко // Строит. материалы. – 2008. – № 7. – С. 35– 39.

УДК 691.328:666.015.45

**СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОЙ
ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ТОКАМИ
ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ**
**THE STATE AND PROSPECTS OF APPLICATION OF ELECTROTHERMAL
TREATMENT OF BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS BY HIGH FRE-
QUENCY CURRENTS**

С.В.Федосов*, А.М.Соколов, Н.В. Красносельских*, А.Н.Кузнецов***
S.V.Fedosov, A.M.Sokolov, N.V.Krasnosel'skih, A.N. A.N. Kuznetsov

** Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново*
Ivanovo State Polytechnical University, Russia, Ivanovo

*** Ивановский государственный энергетический университет, Россия, Иваново*
Ivanovo State Power Engineering University, Russia, Ivanovo

Аннотация: Вновь обращается внимание на одну из главных проблем строительной отрасли: при осуществлении практически обязательной стадии технологического процесса – тепловой обработки строительных материалов и изделий на предприятиях строительной отрасли господствуют тепловлажностная обработка (ТВО) и обработка продуктами сгорания газа, отличающиеся низкой энергетической эффективностью (8-12%) и высокой стоимостью (не менее 1/3 стоимости технологического процесса), а значительно более эффективный, удобный и дешевый способ – электротепловая (электротермическая) обработка (ЭТО), не почти не применяется. К настоящему времени достигнут заметный прогресс в решении этой проблемы: уже разрабатываются, изготавливаются и успешно испытываются образцы оборудования для электротепловой обработки строительных материалов и изделий токами повышенной частоты с использованием малогабаритных источников питания на основе транзисторных преобразователей напряжения.

Abstract: One of the main problems of the building industry is following: the almost obligatory stage in the process – heat treatment of building materials and products in enterprises are steam treatment and processing by the products of gas combustion, which have low energy efficiency (8-12%) and high cost (not less than 1/3 the cost of the technological process), and much more effective, convenient and cheap way – electrothermal processing, don't applied. To date, significant progress has been made in solving this problem are already being developed, manufactured and successfully tested samples of electrothermal equipment for processing of construction materials and products by high frequency currents using a compact power supplies based on the transistor voltage converters.

Ключевые слова: тепловлажностная обработка, электротепловая (электротермическая) обработка, бетон, железобетон, строительный материал, источник питания, транзисторный преобразователь напряжения.

Keywords: steam treatment, electrical heat (electro-thermal) processing, concrete, reinforced concrete, building material, power source, transistor voltage converter

На протяжении нескольких последних лет в Ивановском Государственном Политехническом Университете совместно с Ивановским государственным энергетическим университетом интенсивно ведутся научно-практические разработки по применению в строительной отрасли электротепловой (электротермической) обработки (ЭТО) материалов и изделий токами повышенной частоты с помощью источников питания на основе полупроводниковых (транзисторных) преобразователей напряжения. Как известно, тепловая обработка в виде тепловлажностной обработки (ТВО) или обработки продуктами сгорания природного газа является практически обязательной стадией технологического процесса изготовления подавляющего большинства железобетонных изделий и строительных материалов [1,2]. Вместе с тем, такая обработка составляет наибольшую и значительную долю стоимости технологического процесса, величина которой колеблется в пределах 30-40 % [3]. С другой стороны, несмотря на явные преимущества ЭТО (почти на порядок более высокая энергетическая эффективность, однородный прогрев материала, низкая стоимость и др.) [3,4] такой способ теплового воздействия почти не применяется на предприятиях строительной отрасли. Анализ этой ситуации показал, что причиной такого положения дел является недостаточный уровень разработки вопросов теории процессов ЭТО и отсутствие оборудования, прежде всего источников электропитания, с необходимыми потребительскими качествами.

Благодаря предпринятым усилиям к настоящему времени достигнут значительный прогресс в вопросах теории ЭТО: разработана общая методология создания и применения процессов ЭТО, который базируется на решении феноменологических дифференциальных уравнений теплопереноса при наличии источника тепла в объеме материала, мощность которого определяется решением уравнений электрического поля в материале с комплексной (активно-ёмкостной) электрической проводимостью в сочетании с использованием целого ряда дополнительно разработанных теоретических моделей и расчётных методов [5,6]. Хотя эта методология создана применительно к наиболее энергетически эффективному способу ЭТО – электродному, когда разогрев материала производится пропусканием в его толще электрического тока, она имеет универсальный характер и применима ко всем известным к настоящему времени схемам ЭТО [7].

Предложенная методология устанавливает связь между параметрами, которые влияют на процесс электротепловой обработки или позволяют управлять им (вид и состав бетона, конструкция, объём и модуль поверхности, конструкция и параметры опалубки и теплоизоляции, параметры режима электротепловой обработки, величина электрического напряжения, мощность, передаваемая в обрабатываемое изделие) и показателями, а также характеристиками, которые позволяют оценивать результаты этой обработки (динамика изменения предела прочности бетона при сжатии, затраты и потери энергии, КПД процесса, скорость охлаждения после прекращения электротеплового воздействия, длительность технологического процесса, номинальные параметры источника питания, стоимость электротепловой обработки и себестоимость технологического процесса). Это позволяет исследовать закономерности и характеристики процессов электротепловой обработки токами повышенной частоты с использованием средств компьютерного моделирования, выполнять расчёт устройств для электротепловой обработки различных видов строительных материалов, бетона и железобетонных изделий любого типа, режимов работы таких устройств, а также выполнять теоретическими методами исследования и сравнительные оценки этих установок. Наиболее оригинальны

ми теоретическими разработками являются теория и математическая модель процессов гидратации цемента и набора прочности бетоном при воздействии повышенной температуры в процессе электротепловой обработки; математическая модель динамики предельных температурных градиентов в изделиях в процессе их тепловой обработки; математическая модель электрической проводимости бетона.

При разработке вопросов теории ЭТО значительную роль сыграло творческое наследие А.В. Лыкова. Например, при создании одной из важнейших составных частей предложенной методологии – математической модели динамики предельных температурных градиентов в изделиях в процессе их тепловой обработки, позволяющей выбирать безопасные режимы ЭТО, были использованы теоретические представления о возникновении объемно-напряженного состояния увлажненного материала в процессе его сушки, предложенные А.В. Лыковым [8], в предположении, что причиной такого состояния может быть не только процесс массо(влаги)переноса, но и процесс теплопереноса [9].

В качестве эффективного аппаратного средства реализации ЭТО было предложено использовать источники питания, выполненные на основе полупроводниковых (транзисторных) преобразователей напряжения, выходное переменное напряжение которых имеет повышенную частоту (10-20 кГц). Такие источники питания обладают замечательными эксплуатационными показателями: они имеют малые габариты и вес (как правило, могут перемещаться одним человеком), удобны и просты в обращении, практически не требуют ухода, надёжны в работе, неприхотливы к условиям работы (прекрасно работают при отрицательных температурах), подготовка к работе не превышает 5 мин., обеспечивают плавную регулировку мощности от нуля до номинального значения и др.. Существуют благоприятные условия для полной автоматизации процесса изготовления строительных материалов и железобетонных изделий. В настоящее время на мировом рынке электронной продукции появились транзисторы с предельными параметрами по току до 1500 А, по напряжению до 3000 В, что позволяет создавать источники питания на основе полупроводниковых преобразователей единичной мощностью до 200-300 кВт. Анализ литературных сведений позволяет сделать вывод, что таких параметров вполне достаточно для решения всех задач в области электротепловой обработки бетона и других строительных материалов.

Выполненные эксперименты в лабораторных условиях позволили проверить адекватность общего методологического подхода и предложенных математических моделей, а также подтвердили возможность и целесообразность использования электротепловой обработки бетона токами повышенной частоты при изготовлении бетонных и железобетонных изделий. Одновременно выявлен ряд преимуществ применения для электротепловой обработки бетона напряжения повышенной частоты по сравнению с напряжением промышленной частоты. Например, обнаружена активация твердения бетона под воздействием токов и электромагнитных полей повышенной частоты, в результате чего время достижения нормированной прочности уменьшается почти в два раза. Замена традиционной ТВО на ЭТО приводит к снижению стоимости технологического процесса в среднем на 25 % и добиться такого же результата другими средствами практически невозможно.

Разработанные математические модели и расчётные методики, входящие в состав предложенной методологии, базируются на анализе и обобщении обширных сведений литературных источников, в максимальной степени отражают протекающие в материале электрофизические, теплофизические и физико-химические процессы и учитывают влияние всех технических и технологических факторов. Это даёт основание сделать вывод о том, что эта методология по своим признакам и возможностям может быть отнесена к числу математических моделей, находящейся, по крайней мере, на переходе от «серого ящика» к «белому ящику» [10]. Последнее является одной из приоритетных целей, к которым стремятся исследователи в современных условиях, так как в этом

случае достигается высокая универсальность математического моделирования и открываются наиболее широкие возможности для проведения научных исследований и разработок средствами вычислительной техники, существенно сокращая объёмы длительных и дорогостоящих экспериментальных исследований. В настоящее время выполняется дальнейшее развитие и совершенствование теоретических основ ЭТО.

Экспериментальное подтверждение предложенных в работе методологии, математических моделей и расчётных методик позволило выполнить теоретическое исследование параметров и характеристик оборудования и процесса электротепловой обработки. Для этого на основании анализа производственных условий предприятий сборного железобетона и строительных материалов предложено и рассмотрено несколько (пять) вариантов опытно-промышленного применения электротепловой обработки железобетонных изделий с использованием источников питания, выполненных на основе полупроводниковых преобразователей напряжения. К ним относятся а) применение такой обработки взамен ТВО на полигонных установках; б) использование электрообработки при изготовлении изделий из лёгкого бетона: газобетона, пенополистирольного бетона; в) применение таких источников питания для электротепловой обработки объектов монолитного строительства; г) установка для предварительного разогрева бетонных смесей; д) при изготовлении железобетонных изделий на предприятиях малого и среднего бизнеса.

Выбор первого варианта (замена электротепловой обработкой ТВО на полигонных установках) обусловлен тем, что на полигонных установках имеет место наименьшая эффективность использования энергии пара. Поэтому применение электротепловой обработки в этом случае должно дать максимальный технический и экономический эффект. Использование электротепловой обработки взамен полигонных установок позволит выполнить технологическое оборудование более удобным для работы и обслуживания, что приведёт к улучшению условий и повышению производительности труда. На полигонной установке изготавливаются простые по конструкции и форме железобетонные изделия (как правило, элементы фундаментов зданий) удобные для реализации электроразогрева электродным методом.



а)



б)

Рис. 1 ЭТО доборного фундаментного блока (потребляемая мощность около 1 кВт). а) вид установки в процессе ЭТО б) объект обработки после охлаждения и распалубки.

Для проверки возможности использования ЭТО токами повышенной частоты для указанной выше цели был выполнен эксперимент в производственных условиях (рис. 1). В качестве объекта эксперимента использован фрагмент фундаментного блока марки ФБС 9÷24.4.6 – Т ГОСТ 13579-78 (600х580х400). Такое изделие является «доборным» элементом к широкой номенклатуре фундаментных блоков (ГОСТ 13579-78) имеет сравнительно небольшие размеры и объём $V_0 \approx 0,13 \text{ м}^3$, удобные для проведения

эксперимента, с модулем поверхности $M_{II} = 11,8 \text{ м}^{-1}$ и является типичным представителем продукции такого типа и назначения.

Результаты этого эксперимента [11] полностью подтвердили результаты предшествовавших ему теоретических исследований с использованием предложенной методологии: высокую однородность температурного поля в объеме материала и отсутствие опасности повреждения изделия под действием внутренних напряжений, высокие энергетические и технико-экономические показатели ЭТО и др. На основе полученных результатов была разработана и изготовлена универсальная термосная опалубка, предназначенная для изготовления фундаментных блоков различного размера, которая в настоящее время используется в дальнейших исследованиях (рис. 2).



Рис. 2 ЭТО фундаментного блока с использованием универсальной термосной опалубки (потребляемая мощность 1,5-1,8 кВт). а) вид установки в процессе ЭТО (на переднем плане – источник питания на основе транзисторного преобразователя напряжения мощностью 4,5 кВт с частотой выходного напряжения 13 кГц), б) изделие после охлаждения и распалубки.

Как уже показали результаты этих исследований, при ЭТО блока ФБС 9.4.6 (880x400x580, рис. 2) расход электроэнергии составляет 5,5-6,5 кВтч (в зависимости от условий обработки), что при существующих тарифах на электроэнергию составляет 2-2,8 % от розничной цены таких изделий (по состоянию цен на начало 2015 г. – в среднем 810 руб.). Даже без специального исследования очевидно, что такие затраты на электроэнергию не представляют принципиального значения для любого производителя. Кроме этого, существуют перспективы дальнейшего снижения потребления электроэнергии, которые сейчас исследуются. Изучение динамики роста предела прочности бетона при сжатии посредством измерения этого показателя неразрушающим методом с помощью прибора типа ИПС-МГ 4.03 показывает достижение бетоном марочной 28-суточной прочности на 4-7 сутки после изготовления изделия с применением ЭТО токами повышенной частоты.

Как показало изучение условий работы и производственных показателей малых предприятий, только в условиях этих предприятий, намного лучше приспособленных к малосерийному производству небольших по размерам и объёму изделий, чем крупные предприятия, удастся осуществить рентабельное производство достаточно большой номенклатуры таких железобетонных изделий: колодезные кольца и детали к ним, тротуарная плитка, детали для малоэтажного строительства, изделия для обустройства тротуаров, дорог, дворовых территорий и т.д. Практически для всех малых и значительного числа средних предприятий традиционные методы тепловой обработки недоступны по техническим причинам и оказываются невыгодными из-за высокой стоимости. Поэтому электротепловая обработка с применением источников питания на основе

полупроводниковых преобразователей напряжения является практически единственным доступным способом тепловой обработки производимых ими железобетонных изделий. Для таких предприятий наиболее целесообразным вариантом применения электротепловой обработки следует считать использование электродного метода в сочетании с безопалубочной технологией изготовления железобетонных изделий и термосной выдержкой после электроразогрева, до минимума снизить стоимость тепловой обработки.

С целью оценки характеристик и показателей ЭТО был выполнен эксперимент в цехе малого предприятия с использованием в качестве объекта обработки железобетонного кольца, имеющего размеры: наружный диаметр – 1000 мм, внутренний диаметр – 800 мм, высота – 350 мм. Изделие с указанными размерами является «доборным» элементом к стандартному изделию – кольцо колодезное железобетонное КС-10-9 – ГОСТ 8020-90. Схема ЭТО представлена на рис. 3, а на рис. 4 показана полученная в эксперименте диаграмма распределения температуры в различные моменты времени ЭТО по периметру изделия, которая свидетельствует о достаточно однородном прогреве изделия [12].

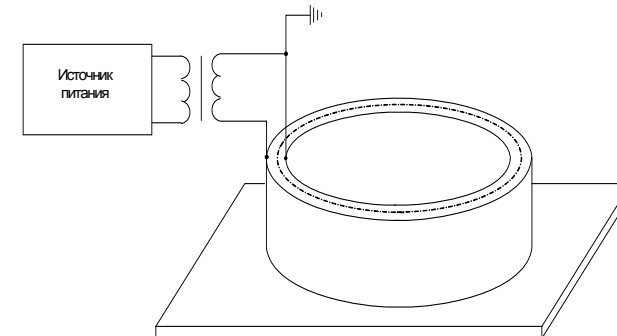


Рис. 3 Схема электротепловой обработки железобетонного кольца электродным методом.

Полученные положительные результаты позволили перейти к осуществлению ЭТО железобетонных колец большей высоты – 600 мм, как представлено на рис. 5, при различных вариантах подключения объекта обработки к выходу источника питания.

Выполненные на сегодняшний день эксперименты подтвердили высокую однородность разогрева изделия по периметру и отсутствие опасности повреждения материала вследствие возникновения внутренних механических напряжений, стоимость использованной для ЭТО электроэнергии не превышает 3-3,5 % розничной цены таких изделий. В настоящее время на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разрабатывается оборудование и оснастка пригодные для осуществления ЭТО таких изделий в условиях серийного промышленного производства.

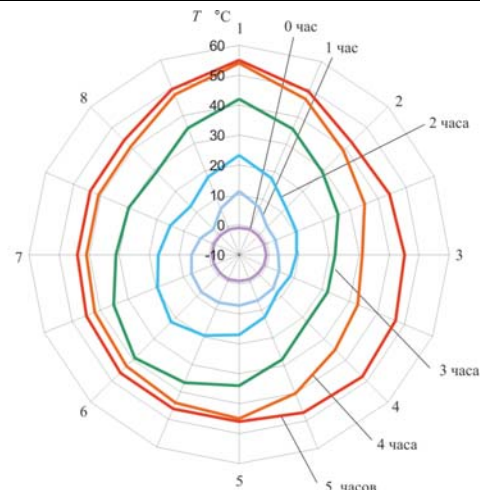


Рис. 4 Диаграмма распределения температуры по периметру железобетонного кольца в различные моменты времени ЭТО



а)



б)

Рис. 5. ЭТО железобетонного кольца (потребляемая мощность около 2 кВт); а) внешний вид установки а процессе ЭТО; б) изделие после ЭТО

Аналогичные исследования и разработки выполняются и по другим вариантам опытно-промышленного применения ЭТО, указанным выше. Полученные на сегодняшний день результаты также свидетельствуют о возможности и целесообразности применения ЭТО с использованием источников питания на основе полупроводниковых преобразователей напряжения.

Весьма впечатляющим выглядит сравнение различных вариантов ЭТО по величине полной энергии обработки $W_{обр}$, которое было получено посредством обобщения полученных результатов и представлено на рис. 5 в относительных значениях, как отношение $W_{обр} / W_6$, т.е. за единицу принята величина W_6 – энергия, необходимая для разогрева материала до требуемой температуры. Действительно, $W_{обр}$ – это энергия, которая расходуется и оплачивается предприятием при изготовлении изделия, W_6 – это полезная энергия, которая должна быть обязательно сообщена изделию для достижения конечного результата, и её величина не зависит от способа тепловой обработки [3,4].

Результаты, представленные на рис. 5, наглядно свидетельствуют о том, что электротепловая обработка железобетонных изделий по энергетической эффективности многократно превосходит ТВО, что и приводит к отмеченным выше невысокой стоимости ЭТО и снижению стоимости технологического процесса изготовления изделий и материалов при замене ТВО на ЭТО.

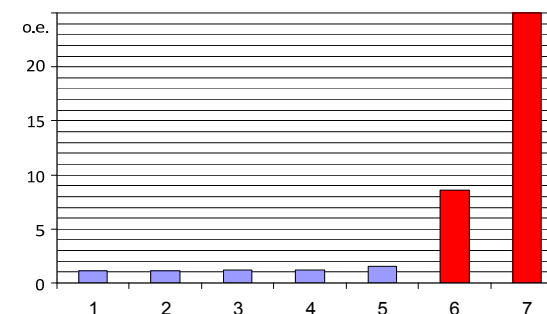


Рис. 5 Относительная величина полной энергии тепловой обработки $W_{обр} / W_6$. 1 – установка для предварительного разогрева бетонной смеси; 2 – электротепловая обработка изделий малых предприятий; 3 – устройство электротепловой обработки взамен ТВО на полигонной установке; 4 – электротепловая обработка в монолитном строительстве; 5 – электротепловая обработка при изготовлении изделий из газобетона и пенополистиролбетона; 6 – ТВО на предприятии сборного железобетона; 7 – ТВО при изготовлении пенополистиролбетонных блоков.

Список литературы

1. Железобетонные и каменные конструкции/ Бондаренко В.М., Бакиров Р.О. и др. Под ред. В.М. Бондаренко – М.: Высшая школа, 2007. –887 с.
9. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М. Изд-во АСВ, 2003 г. – 500 с.
3. Федосов С.В., Бобылёв В.И., Петрухин А.Б., Соколов А.М. Оценка показателей экономической эффективности электротепловой обработки на предприятиях сборного железобетона//Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 3. С. 54-57.
4. Федосов С.В., Бобылёв В.И., Митькин Ю.А., Закинчак Г.Н., Соколов А.М. Электротепловая обработка бетона токами различной частоты. Строительные материалы. №6, 2010 г. С. 2-7

5. Федосов С.В., Соколов А.М. Методология исследования процессов теплопереноса и показателей электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты. Academia. РААСН. № 2. 2012. С. 117-123.

6. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Монография – Иваново: ИПК «ПрессСто», 2010. – 364 с.

7. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях/ Под ред. Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звездова – М.: НИИЖБ, 2005 г. 276 с.

8. Лыков А.В. Теория сушки. – М., «Энергия», 1968. – 472 с.

9. Федосов С.В., Бобылёв В.И., Ибрагимов А.М., Соколов А.М. Методика расчёта предельных температурных градиентов в железобетонных изделиях в процессе электротепловой обработки. Строительные материалы. №3, 2011 г. С. 44-46

10. Алоян Р.М., Федосов С.В., Мизонов В.Е. Теоретические основы математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов. Монография. ИГАСУ; ИГЭУ. Иваново, 2011. – 256 с.

11. Федосов С.В., Крылов Б.А., Бобылёв В.И., Пыжиков А.Г., Красносельских Н.В., Соколов А.М. Применение электротепловой обработки железобетонных изделий на полигонных установках// Строительные материалы. 2013. №11. С. 35-39

12. Федосов С.В., Красносельских Н.В., Коровин Е.В., Соколов А.М. Электротепловая обработка железобетонных изделий токами повышенной частоты в условиях малых предприятий// Строительные материалы. 2014. №5. С. 8-14.

Секция 6. СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 674.04

СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ DRYING AND HYDROTHERMAL TREATMENT OF WOOD MATERIALS

Руслан Р. Сафин*, Рушан Г. Сафин**, Юрий П. Семенов***
Ruslan R. Safin*, Rushan G. Safin**, Yuri P. Semenov***

* Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань,
(e-mail: cfaby@mail.ru).

** Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань,
(e-mail: safin@kstu.ru).

Kazan national research technological university, Russia, Kazan
*** Московский государственный университет леса, Россия, Москва,
(e-mail: semenov@mgul.ac.ru)

Moscow State Forest University, Russia, Moscow

Аннотация: В статье представлен анализ существующих методов снижения энергетических затрат на процесс сушки и термовлажностной обработки древесных материалов, представлены отечественные разработки последнего десятилетия в этой области, описаны технологии повышения энергоэффективности в процессах термомодифицирования древесины.

Abstract: The article analyzes the existing methods of reducing the energy cost for drying and the hydrothermal treatment of wood materials, represented domestic developments of the last decade in this field, describe the technologies to improve energy efficiency in the process of heat treatment of wood.

Ключевые слова: древесина, сушка, термомодифицирование, энергосбережение, композиты.

Keywords: wood, drying, thermotreatment, energy saving, composites.

Процессы сушки материалов подразумевают удаление влаги в результате фазового перехода из жидкого или твердого состояния в газообразное, что изначально определяет высокие энергетические затраты на проведение данного процесса. В связи с этим, наиболее актуальным направлением научных исследований в данной области является повышение энергоэффективности сушильных аппаратов. Основные методы энергосбережения в процессах сушки представлены в таблице 1.

Идеализированную на сегодняшний день с позиции энергосбережения схему процесса сушки материалов можно представить в виде рисунка 1, где тепловая энергия, полученная от альтернативных источников, без потерь в окружающую среду равномерно подводится ко всем точкам материала, вызывая испарение влаги, тепловая энергия которой также без потерь улавливается и вторично используется.

Применительно к деревообрабатывающей промышленности реализация некоторых принципов данной идеализированной схемы в настоящее время выглядит следующим образом:

1. в качестве наиболее распространенного "альтернативного источника энергии" служит теплота от сжигания отходов деревообработки;

2. равномерность подвода тепловой энергии к материалу обеспечивается созданием наиболее оптимальной гидродинамической схемы движения агента сушки через шта-

бель пиломатериалов;

3. снижение тепловых потерь в окружающую среду обеспечивается современными строительными материалами для сушильных аппаратов, сокращением продолжительности сушки путем выбора оптимальной технологии, а также, в отдельных случаях, использованием вакуумных методов удаления влаги, одновременно обеспечивающих как сокращением продолжительности, так и снижение потерь тепла в окружающую среду;

4. вторичное использование тепловой энергии испаренной влаги достигается применением тепловых насосов, что позволяет в 3-5 раз сократить затраты на снижение относительной влажности агента сушки.

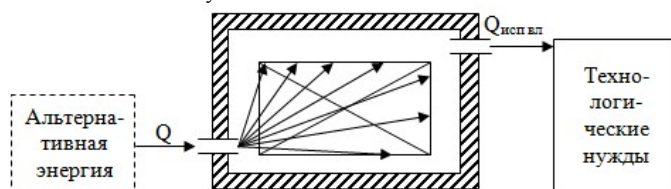


Рис. 1. Идеализированная схема процесса сушки материалов.

Таблица 1. Методы энергосбережения в процессах сушки

Теплотехнические		Кинетические	
Теплотехнические	Конструктивно-технологические	Методы интенсификации внешнего массообмена	Методы интенсификации внутреннего массообмена
<ul style="list-style-type: none"> – выбор тепловой схемы; – режимные параметры сушки; – режим работы установки; – коэффициент рециркуляции; – управление конечным влагосодержанием сушильного агента. 	<ul style="list-style-type: none"> – оптимизация зон промежуточного подогрева; – выбор направления взаимного движения сушильного агента и материала; – совершенствование систем подвода теплоты; – улучшение аэродинамической обстановки в сушилке; – применение инновационных технологий подвода тепла; – использование альтернативных видов топлив. 	<ul style="list-style-type: none"> – увеличение температурного напора; – увеличение движущей силы массообмена; – увеличение к-та теплоотдачи к высушиваемому материалу; – увеличение поверхности теплообмена; – применение вакуума. 	<ul style="list-style-type: none"> – повышение температуры материала; – использование внешних полей; – использование ПАВ; – осциллирующие режимы подвода теплоты.
Комбинированные методы энергосбережения			
<ul style="list-style-type: none"> – сокращение длительности процесса (снижение потерь энергии); – снижение нерационального расхода энергии; – снижение расхода сушильного агента. 			

Некоторые реальные схемы сушильных аппаратов представлены на рисунках 2, 3 и 4, наиболее простой из них и поэтому часто используемой является схема конвективной сушильной установки, потребляющей тепловую энергию от горения отходов деревообработки (рисунок 2). Одним из основных недостатков данной схемы с позиций энергосбережения являются потери в окружающую среду, которые порой достигают 50% и более. Кроме того, конвективные сушильные камеры в основном используют принудительную циркуляцию, что подразумевает потребление дорогостоящей электроэнергии на работу вентилятора.

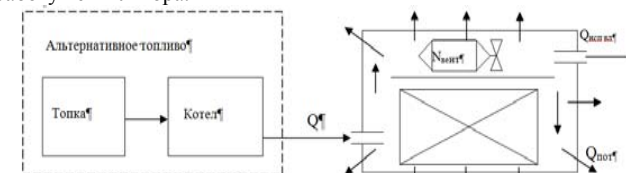


Рис. 2. Схема тепловых потоков конвективной сушильной камеры.

Подобные недостатки конвективных камер присущи и современным сушильным установкам, использующим тепловой насос (рисунок 3). Более того, зачастую работа теплового насоса также основана на потреблении дорогой электроэнергии. Поэтому некоторые производители сушильных камер предлагают использовать для таких целей конденсационные установки, работающие на холодной воде. Однако установки такого типа практически не снижают затраты тепловой энергии.

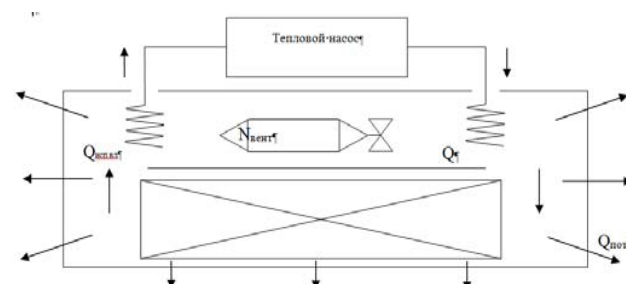


Рис. 3. Конвективная сушильная камера с использованием теплового насоса.

Поэтому наиболее эффективными с точки зрения снижения потерь тепла в окружающую среду являются сушильные установки с контактным методом подвода тепловой энергии. Данный метод нагрева наибольшее распространение получил применительно к вакуумным аппаратам (рисунок 4), что объясняется эффективным использованием вакуумного пространства. Технология вакуумной сушки привлекательна, прежде всего, тем, что предоставляет реальную возможность значительно сократить продолжительность сушки при сохранении качества высушенных пиломатериалов. Кроме того, проведение процесса в условиях вакуума позволяет эффективно улавливать тепловую энергию испаряющейся влаги, чем, к сожалению, далеко не всегда пользуются производители, применяя водокольцевые вакуумные насосы, что приводит не только к потерям тепловой энергии испаряющейся влаги, но и к дополнительным затратам по охлаждению воды для системы вакуумирования.

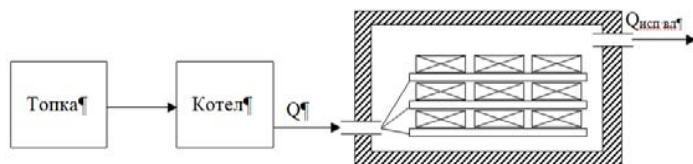


Рис. 4. Вакуумная сушильная камера.

Проанализировав недостатки существующих установок в КНИТУ была создана плотная сушильная установка, состоящая из двух вакуумных камер, с кондуктивным подводом тепловой энергии и осциллирующим режимом сушки (рисунок 5). Использование тепловой энергии испаряющейся влаги из материала первой камеры (на стадии вакуумирования) для нагрева материала во второй камере (на стадии нагрева) с помощью теплового насоса с приводом от двигателя внутреннего сгорания, работающим на генераторном газе, полученном от газификации отходов деревообработки, позволяет сочетать преимущества выше указанных схем.

При этом пиломатериалы контактируют не с одной нагревательной поверхностью как при классической технологии, а в процессе формирования штабеля укладываются между двумя нагревательными элементами, таким образом, что подвод тепловой энергии осуществляется одновременно к обоим пластам пиломатериала, обеспечивая симметричное распределение температуры и, соответственно, влажности древесины.

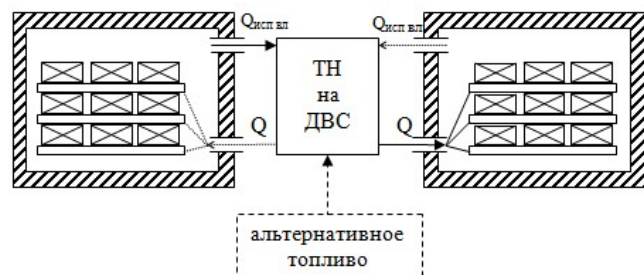


Рис. 5. Схема вакуумной сушильной установки с тепловым насосом, работающем на ДВС от альтернативного топлива.

В качестве нагревательных элементов используются плиты специальной конструкции, представляющие собой две перфорированные металлические пластины с установленными между ними змеевиковыми нагревателями.

В области термовлажностной обработки древесины разработаны и реализованы следующие энергоэффективные технологии термомодифицирования:

➤ **Разработана энергосберегающая технология термомодифицирования древесины в среде топочных газов**, включающая постепенный прогрев пиломатериала до 180 – 240 °С топочными газами, образующимися в результате газификации отходов деревообработки и последующего сжигания синтез-газа с коэффициентом избытка воздуха близким к 1 и охлажденными в теплообменнике до температуры 180 – 240 °С, причем излишняя тепловая энергия, отведенная при охлаждении топочных газов, направляется для предварительной сушки древесины; причем стадия постепенного нагрева древесины до температуры 160 – 170 °С осуществляется путем подачи в камеру дымовых газов, высокой концентрации, поддерживаемой на уровне 95 – 100 об. %, и их непрерывной многократной циркуляцией в камере, а по достижении 160 – 170 °С происходит подача дымовых газов из топки в теплообменник и дальнейший нагрев до 180 –

240°С осуществляется за счет теплопередачи между парогазовой смесью, циркулирующей в камере, и дымовыми газами, подаваемыми в теплообменник; после достижения средой заданной температуры происходит выдержка древесины при этой температуре обработки, далее осуществляется охлаждение древесины путем пропаривания.

➤ **Разработана энергосберегающая технология термомодифицирования древесины в условиях вакуумно-кондуктивных аппаратов**, включающая стадии загрузки древесины в вакуумную камеру, нагрева древесины контактным способом от перфорированных металлических пластин до 200 – 240 °С по логарифмическому закону, выдержки древесины при высокой температуре и понижения температуры термодревесины до 100 °С с последующей выгрузкой.

➤ **Технология термомодифицирования древесины твердых пород в жидкостях** включает нагрев до температуры 200 – 240°С и выдержку древесины при данных температурах в герметичной камере, заполненной маслом с температурой вспышки выше 260°С, охлаждение путем слива масла, вакуумирования древесины, пропаривания ее водяным паром и повторного вакуумирования в течение 2-3 часов. Снижение энергозатрат на проведение процесса охлаждения обеспечивается отсутствием необходимости дополнительного подвода энергии на получение водяного пара: водяной пар получают вследствие охлаждения агента обработки (масла).

➤ **Технология термомодифицирования пиломатериалов в среде перегретого пара** включает нагрев до температуры 180 – 220 °С, выдержку древесины при данных температурах в герметичной камере и охлаждение путем многократного вакуумирования и пропаривания. Подобное ведение стадии охлаждения позволяет существенно снизить «жженный» запах готовой продукции.

➤ **Технология термомодифицирования высоковлажной крупномерной древесины в среде насыщенного водяного пара** включает нагрев до температуры 180 °С, выдержку древесины при данной температуре и высоком давлении в герметичной камере и охлаждение путем вакуумирования древесины. Подобное ведение процесса позволяет избежать предварительной стадии сушки материала.

Более подробно информация о созданных аппаратах и технология описана в соответствующих докладах данной веб-конференции.

Список литературы

1. Сафин Р.Г. Установка для сушки древесины / Сафин Р.Г., Сафин Р.Р., Лашков В.А., Фиров Г.М., Федорова Т.А. // Патент на изобретение RU 2156934 04.06.1999.
2. Сафин Р.Г., Сафин Р.Р., Галяветдинов Н.Р., Иманаев Р.М. Исследование совмещенной сушки-пропитки массивных капиллярно-пористых коллоидных материалов // Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2006. – № 6. – С. 78.
3. Сафин Р.Р. Вакуумная сушка пиломатериалов при конвективном теплоподводе: монография. – Казань: Федеральное агентство по образованию, гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Казанский гос. технологический ун-т», 2006.
4. Сафин Р.Р. Вакуумная сушка капиллярнопористых коллоидных материалов при конвективных способах подвода тепловой энергии. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Сафин Р.Р. // Ивановский государственный химико-технологический университет. Казань, 2007.
5. Сафин Р.Р. Совершенствование режимов сушки пиломатериалов в вакуумно-кондуктивных камерах / Сафин Р.Р., Мустафин З.Р., Чернышёв А.Н. // Деревообрабатывающая промышленность. 2007. №2. С. 6.
6. Сафин, Р.Р. Вакуумно-конвективная сушка пиломатериалов: Монография / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Е.Ю. Разумов. – Казань: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2009 г. – 260 с. – ISBN 978-5-7882-0770-4.

7. Сафин, Р.Р. Математическая модель процесса конвективной сушки пиломатериалов в разряженной среде / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин // Известия Высших учебных заведений. Лесной журнал. - 2006. - № 4. - С. 64-71.

8. Сафин Р.Р. Вакуумно-конвективная сушка пиломатериалов: Монография / Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Разумов Е.Ю. // Федеральное агентство по образованию, Гос. Образовательное учреждение высш. проф. образования «Казанский гос. технологический ун-т». Казань. 2009.

9. Хасаншин, Р.Р. Математическая модель конвективной сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов при давлении ниже атмосферного / Р.Р. Хасаншин, Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин // Вестник Казанского государственного технологического университета. Казань. - 2005. - № 1. - С. 266-268.

10. Патент № 2425305 Российская Федерация, МПК B27N3/28. Способ сушки и термической обработки древесины / Р.Р. Сафин, Е.Ю. Разумов, Р.Г. Сафин, Р.Р. Хасаншин [и др.]; патентообладатель НТЦ РПО. - № 2010108198/06; заявл. 04.03.2010; опубл. 27.07.2011. - 10 с.: ил.

11. Патент № 2425306 Российская Федерация, МПК F26B9/06, F26B5/04. Установка для сушки древесины / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин [и др.]; патентообладатель НТЦ РПО. - № 2009143195/06; заявл. 23.11.2009; опубл. 27.07.2011. - 6 с.: ил.

12. Сафин, Р.Р. Новые подходы к совершенствованию вакуумно-конвективных технологий сушки древесины / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин, П.А. Кайнов // Деревообрабатывающая промышленность. - 2005. - № 5. - С. 16-18.

13. Сафин, Р.Р. Термомодифицирование древесины в среде топочных газов / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Е.Ю. Разумов, Н.А. Оладышкина // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. Москва. - 2010. - № 4. - С. 95-98.

14. Хасаншин, Р.Р. Исследование изменения химического состава древесины, подвергнутой термомодифицированию, с помощью ИК-спектрометра / Р.Р. Хасаншин, Р.Р. Сафин // Вестник Казанского государственного технологического университета. Казань. - 2010. - № 9. - С. 116-117.

15. Сафин, Р.Р. Обзор современных решений сотрудников ФГБОУ ВПО «КНИТУ» в области техники и технологии сушки пиломатериалов / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, П.А. Кайнов // Вестник Казанского государственного технологического университета. Казань. - 2013. - № 23. - С. 76-78.

УДК 674.047

**РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ
ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД В КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛЬНЫХ
КАМЕРАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ УВЛАЖНЕНИИ АГЕНТА
СУШКИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫМ РАСПЫЛИЕНИЕМ
RATIONAL MODES OF DECIDUOUS WOODS DRYING
IN THE CONVECTIVE DRYING CHAMBERS OF PERIODIC ACTION
WHEN MOISTENING THE DRYING AGENT BY FINE DISPERSION**

Александр Н.Чернышёв*, Ольга Р. Дорняк
Alexander N.Chernyshev*, Olga R. Dornyak****

**Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
Россия, Воронеж
(e-mail: alnik19@yandex.ru)*

***Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
Россия, Воронеж
(e-mail: ordornyak@mail.ru)*

*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Russia, Voronezh*

Аннотация: Обсуждается подход к получению рациональных режимов сушки лиственных пород в современных конвективных сушильных камерах периодического действия, в которых увлажнение агента сушки проводится диспергированием воды. Предложен режим сушки пиломатериалов кольцесосудистых пород.

Abstract: Approach to receiving the rational modes of drying of deciduous breeds in modern convective drying chambers of periodic action to whom moistening of the drying agent is carried out by water dispersing is discussed. The drying mode of the deciduous breeds timber is offered.

Keywords: wood; timber; drying; drying modes.

Ключевые слова: древесина; пиломатериалы; сушка; режимы сушки.

Кафедра механической и тепловой обработки древесины Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова осуществляет научно-техническое сотрудничество с рядом деревоперерабатывающих и мебельных предприятий региона. Проблема поиска рациональных режимов гидротермической обработки древесины остается по-прежнему ключевой, ее решение далеко от завершения, несмотря на применения предприятиями отрасли современных сушильных камер.

В данной работе вышеуказанная проблема рассмотрена на основе опыта технической эксплуатации сушильного оборудования SECAL на передовом предприятии отрасли ОАО ХК «Мебель Черноземья».

В сушильные камеры SECAL на поддонах загружаются штабели материала размерами 3,0x1,2x1,2 м до 18 штук (рис. 1а). Теплоноситель — горячая вода в пластинчатых биметаллических горизонтальных калориферах - поступает из котельной, работающей на твердых сыпучих отходах. Циркуляцию сушильного агента обеспечивают четыре осевых реверсивных вентилятора мощностью 3 кВт каждый, которые расположены над штабелями вдоль продольной оси камеры. Приток свежего воздуха и удаление отработанного осуществляется через четыре воздуховода с заслонками, расположенными на крыше. Увлажнение сушильного агента происходит за счет диспергирования через форсунки подогретой воды под контролем специального узла (рисунок 1б). Контроль влажности древесины осуществляется с помощью восьми парных контактных датчиков. Управление сушилкой возможно как автоматическое (по фирменным режимам),

так и ручное. Все результаты температурно-влажностных измерений выводятся on-line на монитор управляющего компьютера.



а)

б)

Рисунок 1. Общий вид комплекса сушильных камер SECAL - а) и влажно-температурный узел камеры с фирменной сменяемой целлюлозной пластиной – б)

Начальный период работы сушильных камер, приобретенных предприятием, можно охарактеризовать, как убыточный, поскольку объемы некачественно высушенного сырья были весьма велики. На наш взгляд, это обусловлено следующими причинами:

а) натуральная массивная древесина – весьма сложный объект сушки и использование исключительно автоматического управления ее гидротермической обработки не всегда оправдано. В то же время для ручной корректировки у персонала нет, как правило, достаточных знаний и опыта;

б) если предприятие, как в рассматриваемом случае, работает с древесиной широкой номенклатуры (ольха, дуб, липа и сосна, в виде необрезных пиломатериалов толщиной 25, 32 и 50 мм; дуб, ясень и бук в виде черновой заготовки толщиной 25, 32, 40, 50, 60 мм, шириной от 40 до 125 мм и длиной от 400 до 2100 мм), то говорить о единообразии загружаемых заготовок не представляется возможным. Рисунок 2 иллюстрирует типичный вариант заполнения сушильной камеры пиломатериалами дуба и ясеня длиной 3 м и одновременно заготовками из той же древесины толщиной 25 и 32 мм длиной 400 мм. Начальная средняя влажность древесины составляет более 100 %. Практика показала, что для такой неоднородной загрузки автоматические режимы (рисунок 3а) не приспособлены и что получить на их основе качественно и равномерно высушенный материал невозможно;

в) при формировании автоматических режимов заготовки делятся всего на два вида по толщине: тонкие – 30 мм и толстые 30 — 60 мм (рисунок 3б), что снижает точность оценок, поскольку скорость обезвоживания существенно зависит от толщины образца.

г) в холодное время года наблюдаются существенные теплопотери через ограждение, что также требует корректировки фирменных режимов, которые создавались в условиях южного климата;

д) приборы, контролирующие процесс сушки, размещены на одной из торцевых стен камеры в стороне от водно-воздушного потока, что снижает точность значений температуры и влажности сушильного агента, используемых в расчетах.

Решение проблемы качества сушки массивной древесины в промышленных объемах осложняется тем, что для выбора рациональных режимов невозможен натурный эксперимент – слишком велика его стоимость. Экстраполяция лабораторного эксперимента на габаритную промышленную установку, как известно, также не подходит. Поэтому только специальные научные исследования позволили разработать технологические режимы, обеспечивающие качественное высушивание древесного материала.

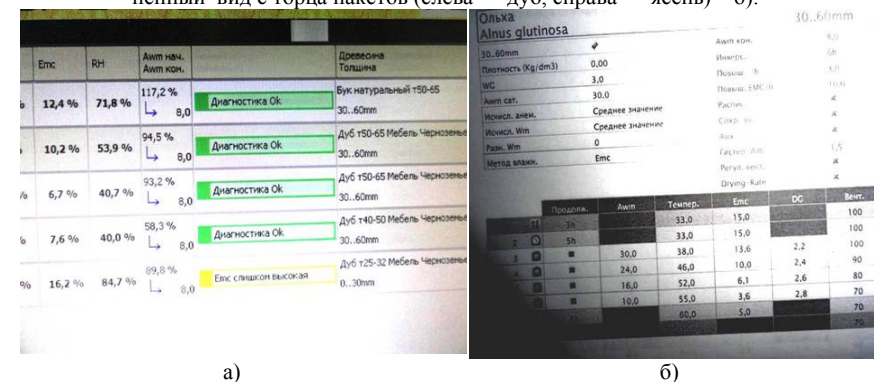
Перечислим основные реализованные элементы подхода к созданию рациональных режимов сушки древесины лиственных пород для камер рассматриваемого типа.



а)

б)

Рисунок 2. Пример неоднородной загрузки сушильной камеры древесиной дуба и ясеня. Толщина заготовок 25 и 32 мм соответственно. Вид со стороны дверей – а); укрупненный вид с торца пакетов (слева — дуб, справа — ясень) – б).



а)

б)

Рисунок 3. Интерфейс программы, управляющей процессом сушки. EMC - текущая влажность агента сушки, Awm и RH - начальная и текущая влажности древесины по пяти камерам.

Как отправная точка использованы стандартные режимы по РТМ [1], обоснованные отечественными специалистами. А.Н. Чернышев поставил серию экспериментов, которые выявили корреляционные связи между отечественными и фирменными значениями режимных параметров сушильного процесса для всех пород древесины, которые проходят операцию обезвоживания на предприятии. Для ручного мониторинга и корректировки параметров были изготовлены и размещены дублирующие приборы в середине потока агента сушки.

Наконец, были проведены теоретические исследования, вычислительные эксперименты, которые позволили получить те режимы гидротермической обработки [2], которые были внесены в фирменное расписание промышленной сушки древесины и дали положительный эффект. Отметим, что в сложных случаях, в частности, связанных с тем, что заготовок одного типоразмера на мебельном предприятии *никогда* не набирается на полную загрузку камер, данные режимы используются с дополнительной ручной доводкой на основе постоянного мониторинга и анализа состояния объектов сушки.

Макроскопическое описание теплофизических процессов в древесине, как анизотропном коллоидном капиллярно-пористом материале, выполнено в рамках механики многофазных систем [3]. Континуальные уравнения для макроскопических параметров жидкой, твердой и газообразной фаз древесной системы получены в [4] методом объ-

емного усреднения соответствующих микроуравнений для каждой из фаз в отдельности.

Кратко перечислим основные элементы математической модели.

Газовая фаза древесины состоит из двух компонент – неконденсирующийся газ и водяной пар. Давление в парогазовой смеси определяется законом Дальтона для смеси идеальных газов. Значения скорости паровой и газовой компонент могут быть различны. Для их описания введены среднemasсовая 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.

Для описания поведения жидкой фазы использованы уравнение сохранения массы, уравнение движения вязкой жидкости без учета конвективного переноса, массовых сил и динамических эффектов фазовых переходов, а также уравнение теплопроводности. Характеристики переноса воды зависят от типа ее связи с твердой фазой. В рассматриваемых условиях термического воздействия на древесный образец применены усредненные уравнения баланса массы и количества движения связанной воды в смачивающих пленках.

Для твердой фазы использовано уравнение теплопроводности.

Функция распределения давления в жидкой фазе определена, следуя работе [5]. Неравновесный процесс сушки рассматривается как квазиравновесный, когда каждый локальный макрообъем пористого тела проходит через непрерывный ряд мгновенных состояний термодинамического равновесия между фазами. Из равенства химических потенциалов жидкости и пара в состоянии равновесия давление жидкости определяется по формуле Кельвина [5]. Используя формулу Кельвина и уравнение изотермы сорбции древесины, можно получить зависимость давления воды от влажности и температуры в рамках равновесной термодинамики двухфазных многокомпонентных систем.

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-Клаузиуса. В процессе сушки происходит изменение поверхностей контактного взаимодействия трех фаз изучаемой гетерогенной системы. Расчетная схема определения удельной площади поверхности раздела фаз жидкость - парогазовая смесь, жидкость - твердая фаза, парогазовая смесь - твердая фаза, построена на базе устоявшихся в древесиноведении представлений о капиллярно-пористой структуре древесины и формах связи влаги с древесиной, а также опытных данных.

Краевые условия на внешних границах бруса для температуры отдельных фаз, концентрации и давления пара записаны в форме условий 3 рода. Объемная концентрация жидкой фазы в поверхностной зоне соответствует равновесной в режиме сушке, а в режиме кондиционирования определяется дополнительно в зависимости от объемной концентрации диспергированной воды. Начальные условия отражают произвольные распределения по объему подготовленного образца усредненных переменных.

В таблице в качестве примера приведены режимы сушки, рекомендуемые для заготовок дуба и ясеня с размерами 1040x85x32 мм (средний размер для всех партий ЧМЗ древесины кольцесосудистых пород, перерабатываемых компаниями).

Выбранный подход к поставленной проблеме привел к положительным результатам сушки. На конечном этапе гидротермической обработки удалось добиться равномерной по объему влажности материала, получить древесину первой категории качества.

Таблица - Режимы низкотемпературной сушки заготовок дуба и ясеня 1040x85x32 мм в конвективных камерах с увлажнением сушильного агента диспергированием

№ ступени	Технологические параметры				
	Операция	Продолжительность, час	Влажность древесины, %	Температура, °С	Степень насыщенности сушильного агента, %
1	Нагрев	16	-	36	-
2	Кондиционирование	18	-	36	100
3	Сушка	-	60	38	83
4	Сушка	-	55	39	83
5	Сушка	-	50	40	79
6	Сушка	-	45	42	79
7	Сушка	-	40	44	79
8	Сушка	-	35	46	74
9	Промежуточная ВТО (влаготеплообработка)	22	-	48	79
10	Сушка	-	30	46,5	75
11	Сушка	-	27	48,5	70
12	Сушка	-	25	49,5	65
13	Промежуточная ВТО	24	-	50,5	75
14	Сушка	-	20	51	44
15	Сушка	-	15	52	27
16	Сушка	-	10	52,6	25
17	Сушка	-	8	52,8	20
18	Конечная ВТО	30	-	54	75
19	Кондиционирование	32	-	55	16
20	Охлаждение	-	-	30	-

На наш взгляд, говорить о каких-то серьезных достижениях пока рано, т.к. предложенные режимы используются менее года, произведено лишь по несколько сушек конкретных пород, а некоторых – вообще по одной (пиломатериал дуба необрезного, толщиной 50 мм). Однако достигнутое существенное повышение качества высушенной древесины, в том числе, трудно высушиваемых пород, позволяет сделать выводы:

- процессы сушки, проходящие в промышленных устройствах без использования перегретого пара, нуждаются в дополнительных исследованиях для оптимизации режимов, способных удерживать однородное напряженно-деформированное состояние сортифта посредством подбора режимных параметров и длительности ступеней сушки;
- предлагаемые многоступенчатые режимы могут стать альтернативой режимам РТМ, предназначенных для сушки древесины лиственных пород в паровоздушной среде.

Список литературы

1. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. – ОАО "Науцдревпром-ЦНИИМОД", 2000. – 143 с.
2. Пат. 2522732 РФ, МПК F26B5/04. Способ сушки пиломатериалов при пониженном давлении среды / А. Н. Чернышев, Р. Р. Сафин, О. Р. Дорняк, Т. В. Ефимова, П. А. Кайнов, А. В. Балахнов; опубл. 20.07.2014.

3. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
4. Дорняк О.Р. Тепломассоперенос в ненасыщенных коллоидных капиллярно-пористых анизотропных материалах. – автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2007. – 32 с.
5. Гринчик Н. Н. Процессы переноса в пористых средах, электролитах и мембранах. – Минск: АНК «Институт тепло-и массообмена» АН Беларуси, 1991. – 251 с.

УДК 674.047, 662.638

ОПИСАНИЕ СТАДИИ СУШКИ В ПРОЦЕССЕ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

DESCRIPTION OF THE DRYING STEP IN THE PROCESS OF GASIFICATION OF WOODY BIOMASS

Тимур Х. Галеев*, Алмаз Р. Садртдинов**, Дина А. Ахметова***
 Timur H. Galeev*, Almaz R. Sadrtidinov**, Dina A. Akhmetova***

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
 Россия, Казань,
 (e-mail: aksissound@gmail.com)

** Казанский национальный исследовательский технологический университет,
 Россия, Казань,
 (e-mail: dog_home@list.ru).

*** Казанский национальный исследовательский технологический университет,
 Россия, Казань,
 (e-mail: safin@kstu.ru)

Kazan national research technological university, Russia, Kazan

Аннотация: в статье рассмотрена математическая модель стадии сушки в процессе газификации древесной биомассы.

Abstract: The article describes a mathematical model of the drying step in the process of gasification of woody biomass.

Ключевые слова: древесная биомасса, сушка, газификация, термическое разложение, математическая модель.

Keywords: woody biomass, drying, gasification, thermal decomposition, mathematical model.

Сушка древесины является наиболее энергоемкой операцией в процессах термохимической переработки древесины. Основным и определяющим критерием сушки является внутренний влагоперенос. Интенсификация удаления влаги из древесины может происходить за счет использования методов, обеспечивающих её объемный нагрев [1, 2].

Из литературных источников известно, что процесс газификации, начинается со стадии прогрева и сушки, где древесная биомасса доводится до абсолютного сухого состояния (содержание влаги 0%) и далее подвергается термическому разложению [1, 3]. Высвобожденная при сушке вода продолжает участвовать в процессе сушки сырья, препятствуя древесине, в зоне высокотемпературной сушки, подвергаться химическим видоизменениям. Однако возникают микротрещины и другие похожие физические изменения, зависящие от скорости нагрева [4].

В общем виде, при описании процесса тепломассопереноса при сушке древесной биомассы, состоящих преимущественно из технологической щепы и стружки, внутреннюю задачу можно свести к решению уравнения тепломассопереноса для одномерной симметричной пластины:

$$\rho_{cl} \cdot c_{cl} \cdot \frac{\partial T_{cl}}{\partial \tau} = \frac{\partial T_{cl}}{\partial x} \cdot \left(\lambda_{эф} \cdot \frac{\partial T_{cl}}{\partial x} \right) + q_{cl} \quad (1)$$

где ρ_{cl} , c_{cl} и T_{cl} – плотность, теплоемкость и температура слоя материала соответственно; q_{cl} – сток тепла определяемый прогревом материала, испарение влаги при сушке и химическими реакциями при пиролизе

Для решения дифференциального уравнения (1) сформулированы начальные условия (2) и граничные условия, схематично изображенные на рисунке 1.

$$T_{cl}(0, x) = T_{нач} \quad (2)$$

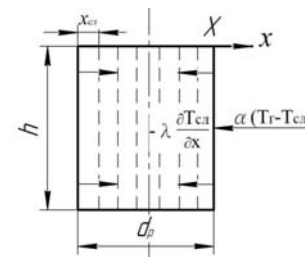


Рис.1. Схема граничных условий

Эффективный коэффициент теплопроводности слоя $\lambda_{эф}$, для уравнения (1), зависит от влажности, порозности и температуры слоя $\lambda_{эф} = f(U, \varepsilon, T)$, что затрудняет его вычисление. Поэтому он определяется экспериментальным путем.

С учетом принятых допущений и некоторых преобразований стадия сушки описывается системой уравнений

$$\frac{\partial U_{cl}}{\partial \tau} = \frac{k_p}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 P_{cl}}{\partial x^2} \quad (3)$$

$$\rho_m \cdot c_m \cdot \frac{\partial T_{cl}}{\partial \tau} = \frac{\partial T_{cl}}{\partial x} \cdot \left(\lambda_{эф,суш} \cdot \frac{\partial T_{cl}}{\partial x} \right) + \rho_{cl} \cdot r \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial U_{cl}}{\partial \tau} \quad (4)$$

где k_p – коэффициент молярного переноса, определяемые по эмпирическим выражениям; U_{cl} – влагосодержание слоя [5]. Т.к. в процессе сушки происходит только испарение влаги, теплопроводность ($\lambda_{эф,суш}$) можно вычислить по эмпирической формуле

$$\lambda_{эф} = \sqrt{0.0108 + 0.000773 \cdot T^{0.349} + 1.083 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left[\frac{T}{111.61}\right]} \cdot U_m \cdot \ln(U_m)$$

а теплоемкость из выражения

$$c_{cl} = 1.173 \left[U_{cl} \left(1 + \frac{T_{cl}}{100} \right) \right]^{-0.222 - U_{cl} \cdot 10^{-4}}$$

Давление в слое материала определяется в зависимости от температуры, по уравнению

$$P_{cl} = \exp\left(A - \frac{B}{T_{cl}}\right) \cdot \log_{10,6} \frac{U_{cl}}{3,27 - 0,015 \cdot (T_{cl} - 273)}$$

Для решения системы уравнений (3-4) начальные условия по температуре, влажности и давлению запишутся следующим образом

$$U_{cl}(0, x) = U_{cl,нач} \quad T_{cl}(0, x) = T_{cl,нач} \quad P_{cl}(0, x) = P_{атм}$$

а граничные условия примут вид

$$-\lambda_{эфсуш} \left. \frac{\partial T_{сл}}{\partial x} \right|_{x=X} = \alpha \cdot (T_c - T_{сл}) \quad \left. \frac{\partial U_{сл}}{\partial x} \right|_{x=X} = 0$$

Математическая модель представлена в виде системы алгебраических и дифференциальных уравнений, для решений которых использован численный метод – метод конечных разностей. Данный метод позволяет получить конкретное решение при исходных параметрах системы.

Представленные материалы статьи получены при реализации гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых на тему МК-3434.2015.8 «Разработка теоретических основ, технологии и оборудования комплексной термохимической переработки древесных отходов и растительной биомассы в сырье для химического синтеза и компоненты моторных топлив».

Список литературы

1. Тимербаев, Н.Ф. Техника и технологии термической переработки отходов деревообрабатывающей промышленности : монография/ Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова. - М-во образ. И науки РФ, Казан. Гос. Технол. Ун-т. – Казань: КГТУ, 2010.- 172с.
2. Просвириков, Д.Б. Особенности переработки древесных материалов методом паровзрывного автогидролиза и технологические пути использования получаемого лигноцеллюлозного продукта/ Д.Б. Просвириков, В.А. Салдаев// Деревообрабатывающая промышленность, изд. № 4. - 2012. - С. 8 – 13.
3. Сафин, Р.Г. Энергонезависимая установка непрерывной переработки древесных отходов/ Р.Г. Сафин, А.Р. Садурдинов, И.И. Хуснуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т.16. – №14. – С. 181-182.
4. Тунцев, Д.В. Схема контактного пиролиза отходов лесозаготовки/ Д.В. Тунцев, Р.Г. Хисматов, А.М. Касимов, И.С. Романчева, А.С. Савельев// Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. - Воронеж, 2014. №2–3(7–3). С.146–149.
5. Исмаилова, Л.М. Математическое описание стадии пиролиза с кондуктивным подводом тепла при газификации древесного сырья/ Л.М. Исмаилова, А.Р. Садурдинов// Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж, 2014. – № 5-4. – С. 115-119.

УДК 674.812.02

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ НА АЭРОЗОЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ TECHNOLOGY FOR TREATMENT OF WOOD FOR AEROSOL INSTALLATION

Дмитрий А. Паринов*, Владимир А. Шамаев**
Dmitry A. Parinov*, Vladimir A. Shamaev**

*Воронежский государственный лесотехнический университет имени
Г.Ф. Морозова, Россия, Воронеж
(e-mail: DmitryParinov@mail.ru)

**Воронежский государственный лесотехнический университет имени
Г.Ф. Морозова, Россия, Воронеж
(e-mail: drevstal@mail.ru)

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russia,
Voronezh

Аннотация: Разработана технология и экспериментальная установка для пропитки древесины аэрозолем антифрикционных жидкостей, например, смазкой Biol. Пропитка происходит с торца под давлением, при этом второй торец бруска вакуумируется. Способ позволяет равномерно пропитывать заготовку древесины смазкой по всему сечению, причем содержание смазки 7-10% от массы древесины задается параметрами установки.

Abstract: The technology and experimental installation Wood treatment anti-friction spray liquids such as grease Biol. Impregnation occurs under pressure from the end, the second end of the bar is evacuated. The method allows to impregnate uniformly logging grease over the entire section, and grease content of 7-10% by weight of the timber is defined by setting parameters.

Ключевые слова: древесина; пропитка; аэрозоль; установка.

Keywords: wood; impregnation; spray; installation

Прессованная древесина используется для изготовления подшипников скольжения, работающих на самосмазке [1-3]. При этом содержание смазки должно составлять 8-9% от массы сухой древесины. Получить прессованную древесину с таким содержанием смазки с равномерным ее расположением по всему сечению заготовки очень сложно, т.к. прессованная древесина из-за высокой плотности плохо пропитывается, а в натуральную древесину ввести небольшое количество смазки невозможно без использования растворителя, который необходимо потом удалять [4,5]. Для преодоления этого противоречия разработан способ и экспериментальная установка пропитки древесины с торца под давлением, причем смазка подается с торца под давлением.

Экспериментальная установка для пропитки древесины березы сечением 80х80х700 мм должна обеспечивать сквозную пропитку данным смазывающим материалом не менее 9% по всему сечению и показана на рис. 1.

Заготовки 7, в виде брусков размером 80х80х700 мм, из натуральной древесины березы влажностью 2-4% в количестве 16 штук закладываются в ячейки между подвижной 5 и неподвижной плитой 9 в аэрозольную установку. Затем подается давление в гидроцилиндр 8 $\sigma=8-10$ МПа, под воздействием которого происходит сжатие брусков, за счет чего идет герметизация торцов их в ячейках. К ячейкам, расположенным на нижней неподвижной плите, из распределителя через пневмоклапаны 3 подводится аэрозольная смесь, которая получена в дизельном агрегате 12. К ячейкам на верхней подвижной плите через датчики-анализаторы 4 смеси от ресивера 2 проведен вакуум $\sigma=0,08$ МПа. После герметизации заготовок включается вакуум 1 на 5 минут, затем открываются пневмоклапаны и аэрозольная смесь подается к нижним ячейкам. Процесс пропитки каждого бруска контролируется датчиками-анализаторами, расположенными

на каждой ячейке, настроенными на концентрацию смеси 8-10 %. При достижении нужной концентрации, отключается пневмоклапан и смесь далее не поступает в пропитанный брусок. Весь цикл пропитки длится не более 30 минут. После окончания пропитки, включается гидросистема и за счет гидроцилиндра производится подъем верхней подвижной плиты, затем заготовки вынимаются из аэрозольной установки и подаются к прессу, где производится дальнейшая их обработка.

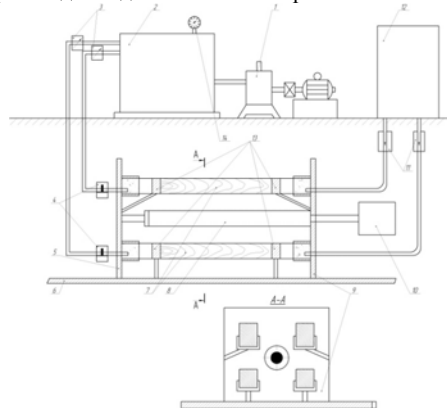


Рисунок 2 - Экспериментальная установка аэрозольной пропитки

1 - вакуумная станция; 2 - ресивер; 3 - пневмоклапаны; 4 - датчики; 5 - подвижная плита с камерами подвода вакуума; 6 - основание; 7 - брусок для пропитки; 8 - гидроцилиндр; 9 - неподвижная плита с камерами подвода вакуума; 10 - гидростанция; 11 - пневмоклапаны; 12 - дизельный 4^х цилиндровый двигатель; 13 - направляющая; 14 - манометр

Пропитываемый материал, например смазка Biol, переводим в аэрозольное состояние за счет дизельного двигателя, где аэрозольное образование смеси происходит внутри цилиндров сгорания, откуда она поступает под давлением ($\sigma = 1-1,5$ МПа) и температуре 100-120 °С к торцам древесины через герметичные камеры 9, установленные на неподвижной плите, с другой стороны к торцам древесины подается вакуум $\sigma = 0,9$ МПа через герметичные камеры, установленные на подвижной плите. Герметичность древесины и камер обеспечивается за счет движения подвижной плиты на смыкание при давлении $\sigma = 8-10$ МПа, установленного между плитами [6]. Количество подаваемой смеси и концентрация регулируются топливным насосом, установленным на дизельном двигателе и количеством впрысков 30-40 шт. Контроль за пропиткой осуществляют датчики-анализаторы, установленные на вакуум-приводе, которые дают команду пневмоклапанам на отключение подачи аэрозоли в пропитываемый брусок. Брусок перед пропиткой должен быть нагрет не менее 70-80 °С.

Список литературы

1. Шамаев В.А. Модификация древесины: учебное пособие – Воронеж: ВГЛТА, 2008 – 396с.
2. Шамаев В.А. Прессованная древесина в машиностроении: справочник / В.А.Шамаев, А.И. Смоляков, П.А.Смирнов-Воронеж. ВГЛТА, 2005 – 92с.
3. Чаадаев А.Е. [Текст]: «Теоретические аспекты пропитки древесины под давлением», «Научно теоретический прогресс в деревообрабатывающей отрасли» ЦЧЭР: Тез.докл.науч.конф. – Воронеж 1900 – 80с.
4. Невзорова А.Б. Теоретические основы и технология механотрансформации древесины.-Гомель: БелГУТ, 2003.-110-115с.

5. Невзорова А.Б. Подшипники скольжения самосмазывающиеся на основе модифицированной древесины (теория, технология и практика): [монография]/А.Б. Невзорова; М-во образования Республики Беларусь гос.ун-т трансп.- Гомель: БелГУТ, 2011. 61-95с.

6. Паринов Д. А., Юдин Р. В., Шамаев В. А. Исследование процесса и разработка установки аэрозольной пропитки древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции / гл. ред. В. М. Бугаков ; Фед. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования "Воронеж. гос. лесотехн. акад.". - Воронеж, 2014. - № 4, ч. 3 (9-3). - С. 231-237.

УДК 674.812.02

ГИДРОИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ПРОПИТКИ СЫРОЙ ДРЕВЕСИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА HYDROPULSE RAW WOOD IMPREGNATION METHOD USING ULTRASOUND

Дмитрий А. Паринов
Dmitry A. Parinov

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
Россия, Воронеж
(e-mail: DmitryParinov@mail.ru)
Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russia,
Voronezh

Аннотация: Разработана экспериментальная установка для пропитки древесины с торца под давлением. Преимущество данного способа заключается в том, что применена комбинация гидроимпульса и ультразвуковых колебаний, причем ультразвук воздействует не только на саму заготовку, но и на пропиточную жидкость.

Abstract: An experimental plant for impregnation of wood from the end under pressure. The advantage of this method is that the applied combination hidroimpulsa and ultrasonic vibrations, and the ultrasound affects not only the blank itself, but also on the impregnating liquid.

Ключевые слова: древесина; пропитка; гидроимпульс; установка; ультразвук.

Keywords: wood; impregnation; installation; ultrasound; gidroimpuls.

Известно, что по мере роста дерева центральная часть ствола прекращает сокодвижение, и микрокапилляры и поры древесины забиваются отложениями смолы, камедей, восков и т.д. У лиственных пород поры зарастают тилами, затрудняющими движение жидкости [1]. Маловязкие и низкомолекулярные жидкости могут двигаться, по самим волокнам древесины или огибая отложения в порах и торусы, если вся капиллярно-пористая структура древесины приведена в подвижное состояние. В настоящее время наиболее эффективным способом упрочнения древесины является введение в нее гидрогеля нанокристаллической целлюлозы, однако реализация этого способа возможна лишь для самой легкопропитываемой древесины березы, где в порах отсутствуют отложения и торусы. Глубина пропитки с торца под давлением при этом не превышает 0,5 м [2].

Для разрушения торусов и выбивания из пор отложений необходимый перепад давлений в процессе колебаний жидкости 2-2,5 МПа, а амплитуда колебаний 0,1-2 мм.

Ранее известные способы пропитки, в том числе с торца под давлением [3,4] не позволяют осуществить пропитку трудно пропитываемой древесины, например, лиственных и ели. Пропитку таких пород можно осуществить применением ультразвуковых

головки, часть которых воздействует на жидкость, а часть на древесные волокна. Воздействие ультразвука должно осуществляться по всей длине заготовки, причем излучатели должны располагаться на расстоянии, кратном длине волны, т.е. когда их колебания в древесине складываются, и, следовательно, амплитуда колебаний возрастает, и они взаимно усиливают друг друга.

Такая установка для заготовок длиной 3 м изготовлена в Воронежском государственном лесотехническом университете и представлена на рис. 1.

Установка содержит сварную раму 1, с закрепленной на ней металлической трубой 2, левую конусную насадку 3, правую конусную насадку 4, ультразвуковой излучатель 5, действующий в радиальном направлении, емкость с пропиточной жидкостью 6, гидравлический насос 7, манометр 8, пневмогидравлический аккумулятор давления 9, гидропульсатор 10 с обратным клапаном, вспомогательный трубопровод 11, емкость для сбора воды 12, горизонтальный гидроцилиндр 13, ультразвуковые излучатели 14, действующие в поперечном направлении. На металлической трубе закреплены дополнительные ультразвуковые излучатели, контактирующие с обрабатываемой древесиной, на расстоянии между собой, кратном длине полу волны ультразвуковых колебаний в древесине [3]. Гидропульсатор 10 обеспечивает расширение функциональных возможностей установки, позволяя задавать частоту колебаний 0,3-10 Гц и амплитуду 0,1-0,2 мм.

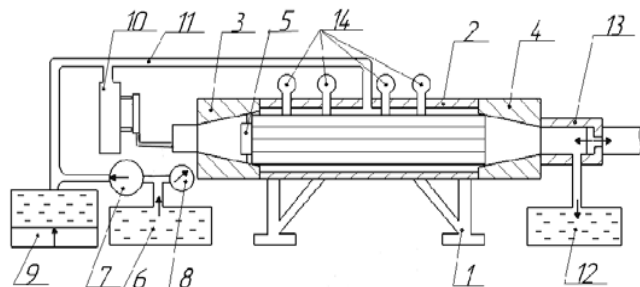


Рисунок 1 - Установка для пропитывания древесины

1 - сварная рама; 2 - металлическая труба; 3 - левая конусная насадка; 4 - правая конусная насадка; 5 - ультразвуковой излучатель; 6 - емкость с пропиточной жидкостью; 7 - гидравлический насос; 8 - манометр; 9 - пневмогидравлический аккумулятор давления; 10 - гидропульсатор; 11 - вспомогательный трубопровод; 12 - емкость для сбора воды; 13 - горизонтальный гидроцилиндр; 14 - ультразвуковые излучатели

Применение одновременно гидроимпульса и ультразвука решает задачу расширения функциональных возможностей установки и дает возможность пропитывать древесину вязкими и высокомолекулярными жидкостями, а также суспензиями и гелями наночастиц.

Устройство работает следующим образом. Сырое оцилиндрованное бревно закладывается в металлическую трубу 2. Закрывается левая 3 и правая 4 конусные насадки. Гидроцилиндром 13 осуществляется закрепление заготовки в неподвижное положение. Затем к пропитываемой заготовке подкручиваются все ультразвуковые излучатели 5 и 14. Включается насос 7, подающий из бака 6 пропиточную жидкость в полость между металлической трубой 2 и пропитываемой заготовкой. Включаются ультразвуковые излучатели 5 и 14. Затем включается гидравлический пульсатор 10, подающий пропитываемую жидкость в торец заготовки. После завершения процесса пропитки жидкость сливается в емкость для сбора воды 12.

Например, для пропитки оцилиндрованного бревна из сосны диаметром 21,5 см и длиной 3 м его укладывают в трубу. Затем бревно зажимают между рабочей и вспомогательной головками. Происходит полная герметизация устройства. В трубу закачивают каменноугольное масло с температурой 60°C, и создают гидравлическое давление 30 атм. Одновременно с этим включают ультразвуковые головки с интенсивностью колебаний 13 Вт/см². Включают гидропульсатор, задающий амплитуду 0,15 мм с частотой 5 Гц. Время пропитки при этом составляет 108 мин. Содержание каменноугольного масла в древесине по всему сечению бревна составило 22% по отношению к абсолютно сухой древесине.

Преимуществом данного устройства является то, что оно позволяет не только полностью реализовать сквозную пропитку, древесины трудно пропитываемых пород, но и селективно прокрашивать трудно пропитываемую древесину различными высокомолекулярными красителями, изменяя их текстуру. Например, путем реверсной пропитки можно из древесины осины по всему сечению заготовки получить текстуру древесины махагоны или палисандра.

Список литературы

1. Б.Н. Уголев Древесиноведение с основами лесного товароведения [Текст]. Учебник. М.: МГУЛ, 2006 - 340 с.
2. Шамаев В.А., Модифицирование древесины, [Текст], В.А. Шамаев, Н.С. Никулина, И.Н. Медведев / монография, М.: Москва, «СЛИМТА», «Наука» - 445 с.
3. Пат. РФ №2476311, МПК B27 K3/02, Способ получения модифицированной древесины, [Текст], В.А. Шамаев, Н.С. Никулина, И.Н. Медведев, И.В. Воскобойников, С.А. Константинова – 2001г. Бюл. №6 – 4с.
4. Патент № 2378106 РФ, МПК B27K 3/02, B27K 3/08, Способ пропитки древесины, [Текст], В.А. Шамаев, Н.А. Трубников, А.И. Анучин, Н.С. Никулина, С.С. Ткачев 2009 г. Бюл. №6 – 4с.

УДК 674.047:662.76

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА ПОСЛЕДУЮЩИЙ ПРОЦЕСС ЕЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ THE EFFECT OF HIGH-TEMPERATURE DRYING OF WOOD BIOMASS FOR THE SUBSEQUENT PROCESS OF THERMAL PROCESSING

Владимир А. Салдаев*, Алмаз Р. Садртдинов**, Евгений К. Воронин***
Vladimir A. Saldaev*, Almaz R. Sadrtidinov**, Evgeniy K. Voronin***

* Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия,
Казань
(e-mail: c-vova@mail.ru)

** Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия,
Казань
(e-mail: almaz.sadrtidinov@gmail.com)

*** Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань
(e-mail: voronin.e@mail.ru)

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Аннотация: Исследовано влияние предварительной высокотемпературной сушки древесной биомассы перед ее термической переработкой на качество получаемых продуктов.

Abstract: The Influence of preliminary high-temperature drying of a wood biomass before its thermal processing on quality of received products is investigated.

Ключевые слова: древесные отходы; тепловая обработка; термическая переработка; синтез газа.

Keywords: wood waste; heat treatment; thermal processing; syngas.

Экологические и социальные проблемы, энергетическая безопасность и цены на ископаемое топливо подталкивают к активному развитию технологий газификации биомассы, которые за последние годы стали основой для получения синтез газа, который может использоваться непосредственно или в качестве начального сырья в промышленности для синтеза различных веществ [1, 2, 3].

В развитие данного направления были проведены исследования по изучению влияния предварительной высокотемпературной тепловой обработки древесного сырья на качество вырабатываемого синтез газа, т.к. в процессе обработки сырье меняет свои свойства, что оказывает влияние на качество получаемого продукта [4].

Для проведения комплексного исследования по предварительной тепловой обработки древесных отходов и определения качества вырабатываемого синтез газа был разработан экспериментальный стенд, основным узлом, которого является цилиндрический реактор в который при каждом эксперименте помещалось 300 грамм исследуемого материала. Для предотвращения сгорания материала в реакторе в него подавался инертный газ - аргон. Нагрев реактора и подогрев аргона осуществлялся посредством электронагревательной ленты. Температура в реакторе контролировалась в трех точках термопарами. Пробы образующихся газов отбирались на выходе из реактора.

В исследовании использовались наиболее часто встречаемые древесные отходы, а именно ветви (сучья и т.п.) и древесная щепа, которые были проанализированы как во влажном виде так и после тепловой обработки в течении 30 минут при температурах 180 °C и 230 °C соответственно [2].

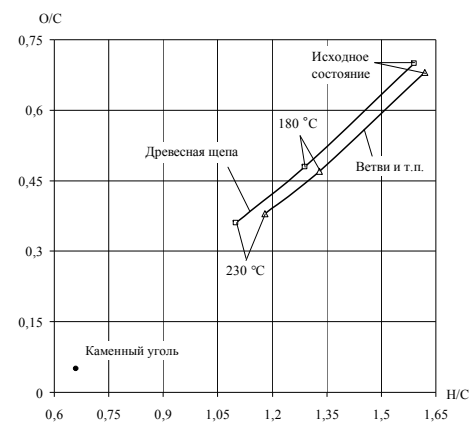


Рис. 1 - Сравнительный анализ изменения углерода, водорода и кислорода в обрабатываемых материалах

приводит к увеличению относительного содержания углерода в обрабатываемом материале. По характеру данных процесс тепловой обработки схож с процессом пиролиза, но протекает при относительно низких температурах и преследует цель оптимально подготовить древесные отходы к дальнейшей переработке.

На рис. 1 представлены результаты исследования по определению изменения соотношений углерода (C), водорода (H) и кислорода (O) в обработанном древесном сырье по сравнению с каменным углем, как эталоном. Все данные приведены в мольных процентах и рассчитаны на сухую и беззольную часть. Для удобства построения координатной сетки предложено представить результаты в виде соотношений H/C и O/C.

Из полученных результатов видно уменьшение значений приведенных соотношений, это объясняется большей интенсивностью удаления воды и легколетучих веществ с ростом температуры тепловой обработки, что в свою очередь

В итоге снижение содержания кислорода, определяет более низкую степень окисления и приводит к увеличению величины нагрева. При этом значения отношений H/C и O/C стремятся к значениям каменного угля, что дает сделать предположение о схожести свойств обработанных материалов и угля при газификации. Обобщенные данные также подтверждают, что с возрастанием температуры обработки помимо удаления летучих происходит относительное обогащение материала.

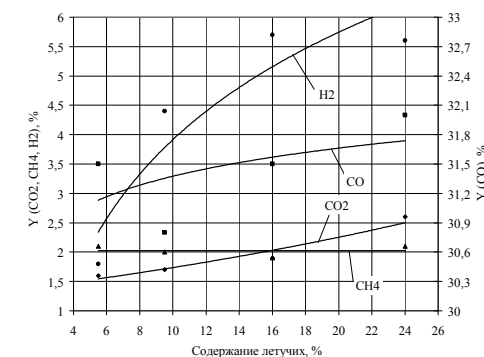


Рис. 2 - Изменение компонентного состава синтез газа при газификации обработанных отходов

Известно, что при газификации углей состав получаемого синтез-газа наиболее чист и лучшего качества [5]. С учетом полученных данных наилучшим вариантом для газификации является древесное сырье, обработанное при 230 °C.

Также были проведены эксперименты по влиянию летучих в обработанном сырье на состав получаемого синтез газа, результаты которых представлены на рис. 2.

Полученные зависимости подтверждают правомерность выдвинутых ранее предположений.

На данный момент планируются исследования по использованию синтез газа, полученного из подготовленного сырья в качестве сырья для химической промышленности.

Представленные результаты получены в рамках реализации гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых по теме МК-3434.2015.8 (договор № 14.Z56.15.3434-МК от 16.02.2015 г.).

Список литературы

1. Тимербаев, Н.Ф. Совершенствование процесса газификации древесных отходов с целью получения моторного топлива / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Хисамеева, Д.А. Ахметова, А.Г. Мухаметзянова // Вестник Казанского технологического университета. - 2011. - №19. - С. 211-213.
2. Сафин, Р.Г. Разработка технологии получения моторного топлива из отходов деревообработки / Р.Г. Сафин, Н.Ф. Тимербаев, З.Г. Саттарова, Т.Х. Галеев // Вестник Казанского технологического университета. - 2012. - №11. - С. 205-207.
3. Тимербаев, Н.Ф. Разработка технологии получения метанола из древесных отходов / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, Т.Х. Галеев // Вестник Казанского технологического университета. - 2013. - №3. - С. 168-170.
4. Исмагилова, Л.М. Исследование процесса получения синтез-газа и его конверсия в диметилвый эфир / Л.М. Исмагилова, А.Р. Садрутдинов, Р.Г. Сафин // Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, Воронеж. - 2014, - Т.2., - № 3, ч.2 (8-2), - С. 173-176.
5. Сафин, Р.Г. Газификация влажных отходов Р.Г. Сафин, Н.Ф. Тимербаев, А.Р. Хисамеева, Д.А. Ахметова // Вестник Казанского технологического университета. - 2012. - №17. - С. 195-199.

УДК 674.047

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ДРЕВЕСИНЫ В ГЕЛИИ KINETIC PARAMETERS OF THERMAL DESTRUCTION OF WOOD IN HELIUM

Михаил Г. Ермоченков
Michael G. Ermochenkov

Московский государственный университет леса, Россия, Москва
(e-mail: ermochenkova@mgul.ac.ru)
Moscow State Forest University, Russia, Moscow

Аннотация: В статье приведены результаты экспериментально-расчетных исследований кинетики термической деструкции различных пород древесины в гелиевой среде. Для проведения термогравиметрических исследований была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Проведено сравнение кинетики термической деструкции древесины при нагреве в гелии и в вакууме.

Abstract: The results of experimental and computational studies of the kinetics of thermal degradation of different types of wood in a helium environment. To perform thermogravimetric studies were designed and manufactured experimental setup. A comparison of the kinetics of thermal degradation of the wood by heating in helium and vacuum.

Термическая обработка и в частности термическое модифицирование широко применяется для улучшения свойств древесины. Термическое модифицирование - это нагрев без доступа окислителя. Нагрев может происходить в вакууме, паровой среде, в инертных газах, дымовых газах и гидрофобных жидкостях. При высокой температуре без доступа окислителя происходит термическая деструкция древесины. Степень модифицирования и, как следствие, свойства получаемого материала определяются степенью термической деструкции.

Древесина представляет собой композиционный материал, включающий гемицеллюлозу, целлюлозу, лигнин и другие компоненты. Разложение различных компонентов древесины происходит в разных диапазонах температур, что обуславливает многостадийность процесса термической деструкции. Стадии процесса термической деструкции можно рассматривать как параллельные, независимые реакции. Скорость протекания многостадийного процесса описывается уравнением [1, 2]:

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

где j – номер стадии; m – число стадий; A_j – частотный фактор j -й стадии, $[c^{-1}]$; E_j – энергия активации j -й стадии, $[Дж/моль]$; n_j – порядок реакции j -й стадии; R – газовая постоянная, $[Дж/(кг \cdot K)]$; T – температура, $[K]$; ω_j – безразмерная масса стадии.

Кинетические параметры A , E и ω определяют экспериментально. Для исключения горения термогравиметрические эксперименты проводят в вакууме. Это обусловлено необходимостью уменьшения влияния тепло- и массообмена на результаты исследования. В [3, 4] приведены результаты исследования кинетики термической деструкции древесины березы и сосны в вакууме.

Технологические процессы термического модифицирования древесины могут протекать как в вакууме, так и в инертных газах, паровой среде, дымовых газах. При этом давление среды близко к нормальному. В этих условиях кинетика протекающих процессов термической деструкции может отличаться от кинетики процессов в вакууме. Встает вопрос о возможности использования кинетических параметров, полученных в вакууме, для расчета процессов деструкции, протекающих при нормальном давлении.

Для исследования кинетики термической деструкции материалов в гелии была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Схема установки приведена на рис. 1. Установка состоит из корпуса 7, внутри которого расположены электронные весы Сартотом CE153-С 10. Весы связаны с компьютером 14. На рабочей поверхности весов 9 установлен штатив 8. Вертикальная штанга штатива проходит через отверстие в верхней крышке корпуса. На верхний конец штанги надевают сетчатый тигель 3, в который загружают исследуемый материал. В дно тигля в центре впаивают трубку, заваренную сверху. С помощью этой трубки тигель надевают на верхний конец штанги штатива. Измерение температуры производится одновременно с измерением массы образца.

Температура измеряется в центре тигля в трубке с помощью хромель-копелиевой термопары 4. Показания термопары записываются с помощью регистрирующего прибора АРРА-109 (13).

Рабочим элементом весов являются пьезо-датчики, поэтому рабочая поверхность электронных весов Сартотом CE153-С при измерениях массы не перемещается. Это делает возможным одновременное измерение температуры образца и его массы.

Верхняя крышка корпуса теплоизолирована керамическим материалом 5. Для выравнивания тепловых потоков от печи 1 к тиглю с образцом и создания среды с инертным газом тигель сверху накрыт медным защитным кожухом 2. Гелий подается под кожух с помощью патрубка 6. Напряжение на нагреватель печи подается от источника питания 12, управляемого регулятором 11. Нагрев осуществляется по линейному закону с темпом 5 градусов в минуту.

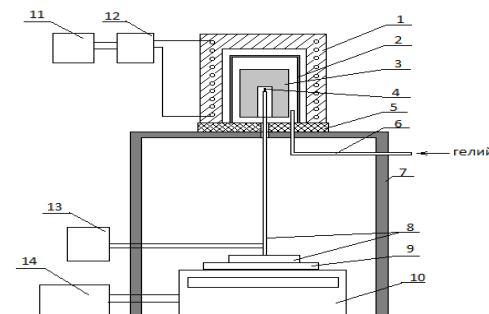


Рис. 1. Экспериментальная установка для термогравиметрических исследований в гелии

Таблица 1. Кинетические параметры термической деструкции древесины в гелии

Номер стадии	Начальная масса стадии, ω_0	Энергия активации, $\frac{E}{R}, K$	Частотный фактор, A, c^{-1}	Начальная масса стадии, ω_0	Энергия активации, $\frac{E}{R}, K$	Частотный фактор, A, c^{-1}
	береза			сосна		
1	0,164	21274	$3,666 \cdot 10^{14}$	0,023	13941	$2,987 \cdot 10^9$
2	0,246	26006	$7,347 \cdot 10^{16}$	0,077	19460	$7,567 \cdot 10^{12}$
3	0,216	17997	$4,988 \cdot 10^{10}$	0,606	17991	$3,319 \cdot 10^{10}$
4	0,179	5823	10,448	0,134	8535	571
5	0,195	10049	500,765	0,160	11793	$3,005 \cdot 10^3$

В качестве исследуемых образцов используют навески стружки исследуемой древесины. После математической обработки результатов термогравиметрических экспери-

ментов были получены кинетические параметры термической деструкции в гелии древесины березы и сосны. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Было проведено сравнение кинетики термической деструкции березы и сосны в гелии и в вакууме. На рис. 2 и 3 приведены графики изменения относительной массы образцов из древесины березы и сосны соответственно от температуры при нагреве в

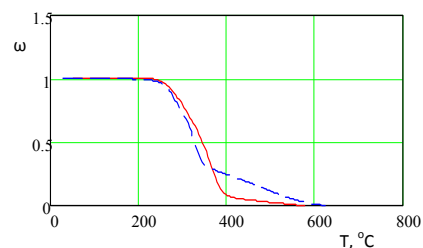


Рис. 2. Графики изменения относительной массы образца древесины березы по температуре при нагреве: — в вакууме; — в гелии

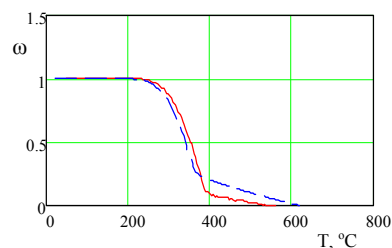


Рис. 3. Графики изменения относительной массы образца древесины сосны по температуре при нагреве: — в вакууме; — в гелии

вакууме и в гелии. Из приведенных графиков следует, что при температурах до $\approx (300 \pm 320)^\circ\text{C}$ скорость изменения массы материала существенно не зависит от свойств среды, в которой происходит нагрев. Заметная разница скоростей изменения массы образцов наблюдается при температурах выше 350°C . Термическое модифицирование древесины происходит при температурах до 280°C . Таким образом, можно сделать вывод о том, что при расчетах процессов термического модифицирования древесины допустимо использовать кинетические параметры, полученные как в вакууме, так и в гелии.

Список литературы

1. Шведов, Б. А. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МЛТИ, 1990. – 542 с.
2. Ермоченков, М. Г. Термогравиметрические исследования кинетики термической сушки древесины / М.Г. Ермоченков, А.Г. Евстигнеев, Т.Е. Кувик // Научные труды. – М.: МГУЛ, 2007. – Вып. 335 – С. 36–46.
3. Кувик, Т. Е. Кинетика термической деструкции древесины в приложении к прогнозированию свойств термомодифицированной древесины/ Кувик Т.Е.//Четвертая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011» – Том 2 – М.: ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина (МГАУ)», 2011. – С. 144 – 148.
4. Ермоченков, М. Г. Прогнозирование свойств термически модифицированной древесины. Лесной вестник. Научно-информационный журнал. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2010, № 4 (73). – С. 111–115.

УДК 674.816.2

ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕЩО-КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ HEATMOIST PROCESSING OF WOOD AND COMPOSITION MATERIALS

Т.О. Степанова*, Х.Г. Мусин**, И.Г. Хабибуллин***

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань, (e-mail: stepanova-211190@yandex.ru)

**Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань, (e-mail: safin@kstu.ru)

***Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань, (e-mail: almira-h@rambler.ru)
Kazan national research technological university, Russia, Kazan

Аннотация: Исследована возможность повышения эксплуатационных характеристик композиционного материала путем обработки древесного наполнителя методом термомодификации.

Abstract: The possibility of improving the performance of the composite material by treatment with wood filler method thermomodifikatsii.

Ключевые слова: древесные отходы, древесно-композиционные материалы, строительные материалы, теплоизоляционные материалы, древесно-полимерные композиты.

Keywords: wood waste, wood and composition materials, construction materials, heat-insulating materials, wood and polymeric aggregates.

Древесно-композиционные материалы – это композиционные изделия, которые состоят из основного древесного сырья (измельченная древесина, древесные отходы) и вспомогательных веществ: минеральные связующие, цемент, гипс, термопластичные полимеры. В России древесно-композиционные материалы стали активно применяться лишь с 2010-х годов, но на сегодняшний день они уже составляют серьезную конкуренцию традиционным строительным материалам. Древесно-композиционные материалы используются в качестве конструктивных, теплоизоляционных, а также отделочных изделий. Кафедрой переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета усовершенствована технология изготовления древесно-наполненных композиционных материалов путем обработки древесного наполнителя методом термомодификации. Выявлены рациональные температурные режимы термической обработки древесного наполнителя [1].

Физико-механические характеристики древесно-наполненных композиционных материалов в качестве конструкционного материала не всегда удовлетворяют необходимым требованиям по прочности. Вследствие чего, предложена технология производства арболита, в котором предварительно высушенные древесные частицы перед обработкой в разрядной камере проходят термическое модифицирование контактно-конвективным способом в среде топочных газов без доступа кислорода воздуха при температуре $190\text{--}200^\circ\text{C}$ в течение 50–60 мин, что позволяет снизить гигроскопичность древесных частиц, соответственно препятствует развитию давления набухания в процессе эксплуатации и, как следствие, улучшает эксплуатационные свойства арболита. Использование данной технологии позволяет расширить область применения композиционного материала без существенного снижения его физико-механических характеристик в процессе его эксплуатации [2].

Установка состоит из расходной емкости с измельченным древесным наполнителем, устройства термического модифицирования древесных частиц, емкости для замачивания частиц наполнителя, смесителя, дозаторов воды, цемента, песка, химических добавок, формовочной станции, пресса и устройства термической обработки. Устройство

термического модифицирования включает камеру сгорания (топку) и барабанную камеру термомодифицирования.

Способ изготовления арболита, осуществляется следующим образом. Частицы предварительно высушенного древесного заполнителя из расходной емкости через трубу со шлюзовым затвором подают в камеру термомодифицирования, в которой в качестве агента обработки используют топочные газы. Топочные газы с температурой 900 – 1000 °С из топки поступают в теплообменник, в котором охлаждаются до температуры 180 – 220 °С, после чего подаются в камеру термомодифицирования. Температура отработанного газа на выходе из барабана составляет 150-180 °С. Далее дымосос направляет смесь газа с термически обработанной стружкой в циклон-отделитель, после которого частицы древесного наполнителя подают в бункер для термомодифицированной стружки [3].

Арболитовую смесь приготавливают в смесителе, в который предварительно загружают древесный наполнитель, растворы химических добавок, воду и портландцемент. Далее изделие формуют, уплотняют на прессе и подвергают выдержке в тепловой камере. Подготовленные таким образом образцы арболита были выдержаны во влажных условиях в течение 30 суток и далее исследованы на предел прочности на сжатие. Результаты исследований представлены в виде кривой, представленной на рис. 1, из которой видно, что максимальные значения предела прочности на сжатие приходится на температуру обработки древесных частиц в интервале 190 – 210 °С [4].

Таким образом, можно сделать вывод, что более низкая температура обработки в процессе выдержки во влажной среде приводит к развитию давления набухания древесных частиц и, как следствие, снижению предела прочности композиционного материала на сжатие. Оптимальной температурой для термической обработки является температура в интервале 190-210 °С, которая способствует к существенному снижению давления набухания, а также приводит к увеличению прочности арболита на сжатие. Более высокие температуры обработки вызывают значительный химический распад древесинного вещества, что приводит к снижению прочности самого древесного наполнителя и впоследствии к снижению предела прочности арболита [5].

Список литературы:

1. Сафин, Р.Г. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов [Текст]/ Р.Г. Сафин, В.В. Степанов, Э.Р. Хайруллина, А.А. Гайнуллина, Т.О. Степанова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – №20. – С. 123-128.
2. Степанова Т.О., Гайнуллина А.А. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов. // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 5-4. С. 299-303.
3. Сафин Р.Г., Исхаков Т.Д., Гайнуллина А.А., Степанова Т.О., Хабибуллина А.Р. Разработка композиционных материалов на основе древесных отходов. // Деревообрабатывающая промышленность. - 2014. – №4. - С. 32-37.
4. Хисматов, Р.Г. Установка переработки низкокачественной древесины в уголь [Текст]/ Р.Г. Хисматов, Е.В. Хисматова, Д.В. Тунцев, М.Р. Хайруллина, А.С. Савельев,

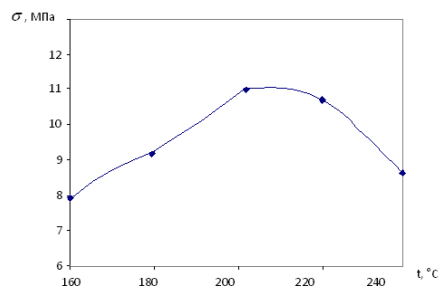


Рис. 1. Кривая изменения предела прочности на сжатие в зависимости от температуры обработки древесного заполнителя

И.С. Романчева // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – №22. – С.297-300.

5. Сафин Р.Р. Термомодифицирование древесины в среде топочных газов [Текст] / Р.Р. Сафин [и др.] // Лесной вестник. – 2010. – № 4. – С. 95 – 99.

УДК 674.816.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСНО-ГИПСОВЫХ ПЛИТ STUDY OF THE INFLUENCE OF HYGROTHERMAL TREATMENT ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD-GYPSUM BOARDS

Эндже Р. Хайруллина*, Тимур Д. Исхаков**, Мария Т. Шарапова***
Endzhe R. Khairullina*, Timur D. Iskhakov**, Maria T. Sharapova***

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань (endzhe_31@mail.ru).

**Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань (timgdi@mail.ru).

***Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань (mariysh@yandex.ru).

Kazan national research technological university, Russia, Kazan

Аннотация: В работе рассмотрено исследование древесно-гипсовых плит на основе обработанных древесных частиц и гипса.

Summary: The paper considers the study of wood-gypsum boards based on the processed wood particles and gypsum.

Ключевые слова: древесно-гипсовая плита, древесные отходы, гипс, камера гидратации, обработка древесных отходов

Keywords: wood gypsum board, wood waste, gypsum, hydration chamber, processing wood waste

Древесные частицы как наполнители для конструкционных материалов известны с очень давних времён. Основным ограничением при использовании отходов лесопромышленного комплекса в конструкционных материалах, особенно когда роль связующего выполняет минерально-вяжущие вещества, является наличие специфических свойств органического сырья, а именно анизотропность, наличие объемно-влажностных деформаций, высокая проницаемость и высокая химическая активность.

Одним из направлений по совершенствованию комплексного использования древесины на деревоперерабатывающих предприятиях является производство плит на основе древесных частиц и минерального вяжущего – гипса [1].

На сегодняшний день производство таких плит осуществляется полусухим методом, при котором влажная смешанная масса гипсового вяжущего и древесных стружек располагается на стальных листах, после чего прессуется и высушивается. Но эта технология, как и любая другая, имеет ряд недостатков: стружка, изготавливается специально из круглых лесоматериалов, а именно из деловой древесины; за счет использования твердых древесных отходов для получения древесной стружки, возникает необходимость в дорогостоящем оборудовании [2].

В связи с этим на кафедре «Переработки древесных материалов» Казанского Национального Исследовательского Технологического Института была разработана технология переработки древесных отходов с получением конструкционного материала (рис. 1) с повышенными теплофизическими и физико-механическими свойствами на основе

гипсового вяжущего, в которой древесные частицы подвергаются гидротермической обработке.



Рисунок 1 – Внешний вид полученного материала

Отличием разработанной технологии является его предназначение для утилизации древесных отходов лесозаготовки, лесопиления, деревообработки и озеленения городов России. Использование древесных отходов в производстве древесно-гипсовых плит позволяет сокращать время на производство, так как используется меньшее количество оборудования, за счет чего покупка дорогостоящего оборудования для получения стружки отпадает, линия производства существенно уменьшается в размерах[3]. Обработка древесных частиц в данном случае, когда в качестве связующего вещества используется гипс, существенно влияет на теплофизические свойства получаемого материала, снижает плотность и повышает адгезию между наполнителем и связующим, что приводит к увеличению прочностных показателей. При этом использование камеры гидратации, вместо сушильного проточного канала, которую обычно применяют, обеспечивает проведение процесса гидратации при определенно заданной температуре и влажности, что исключает пересушивание плит и приводит к улучшению физико-механических свойств. За счет камеры гидратации использование стружки из древесных отходов вместо стружки, которая изготавливается специально из круглых лесоматериалов, а именно из деловой древесины, не приводит к понижению качества получаемых плит, что доказано путем исследований полученных образцов, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные технические характеристики древесно-гипсовых плит различных технологий

Наименование показателя	Технология Пшеланского гипсового завода	Технология компании BINOS	Разработанная технология
Плотность, кг/м ³ , не более	1250	1200	1050
Отпускная влажность, % (к массе сухого вещества)	2±0,5	2±0,5	1,5±0,5
Прочность, МПа, не менее	8,0	8,0	8,7
Прочность при растяжении перпендикулярно к плоскости плиты, МПа, не менее	0,3	0,25	0,35
Разбухание по толщине за 2 ч, %, не более	2,0	3,0	1,8
Водопоглощение за 2 ч, %, не более	30	30	27,8
Коэффициент теплопроводности, Вт/м	0,2-0,3	0,2-0,3	0,1-0,2

Применение данной усовершенствованной технологии производства древесно-гипсовых плит позволяет использовать древесные отходы в качестве наполнителя, при

этом, не понижая физико-механических свойств получаемого материала, а также частично решить проблему использования древесных отходов.

Список литературы

1. Хайруллина, Э.Р. Технология получения конструкционных плит с повышенными теплофизическими свойствами на основе обработанного древесного наполнителя [Текст]/ Э.Р. Хайруллина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. - 2014. – №5 ч. 4 (10-4). - С. 363-367.
2. Тунцев, Д.В. Современные направления переработки древесной биомассы [Текст]/ Д.В. Тунцев, Р.Г. Хисматов, М.Р. Хайруллина, А.С. Савельев, И.С. Романчева // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. - 2015. - Т. 3. - № 2-1 (13-1). - С. 464-468.
3. Хайруллина, Э.Р. Технологическая линия переработки древесных отходов с получением конструкционного материала [Текст]/ Э.Р. Хайруллина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. - 2014. – №3 ч. 4 (8-4). - С. 256-259.

УДК 66.092 - 977

КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ ПЕРЕД СТАДИЕЙ ПИРОЛИЗА CONVECTIVE DRYING OF WOOD WASTES BEFORE PYROLYSIS STEP

А.Р.Хабибуллина, З.Г.Саттарова, М.Н.Суходова

ФГБОУ ВПО Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань,
(e-mail: almira-h@rambler.ru)

ФГБОУ ВПО Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань,
(e-mail: sattarova@list.ru)

ФГБОУ ВПО Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань,
(e-mail: masha1593@inbox.ru)

Kazan national research technological university, Russia, Kazan

Аннотация: Рассмотрена установка для производства древесного угля, в которой с целью повышения эффективности процесса пиролиза, рассмотрена возможность предварительной сушки древесных отходов топочными газами.

Abstract: Installation for production of charcoal in which for the purpose of increase of efficiency of process of pyrolysis, possibility of preliminary drying of wood waste is considered by furnace gases is considered.

Ключевые слова: пиролиз; сушка; древесные отходы; установка; древесный уголь; пиролизный газ; конденсация; тепло; древесин; энергия

Keywords: pyrolysis; wood waste; installation; charcoal; pyrolysis gas; condensation; drying; warmly; wood; energy.

Сушка древесины является одним из важнейших процессов переработки древесных материалов, в связи с большой энергоемкостью и длительностью процессов. В связи с этим большинство разрабатываемых современных установок с целью повышения эффективности производства сушки предусматривает использование своих внутренних

ресурсов в качестве сушильного агента: отработанного пара, топочных газов, тепловой энергии [3].

На кафедре ПДМ была разработана установка, в которой с целью повышения эффективности процесса пиролиза, рассмотрена возможность предварительной сушки древесных отходов отходящими топочными газами. Разработана экспериментальная установка пиролиза отходов в древесный уголь и математическая модель тепломассообменных процессов, протекающих при переработке древесных отходов в лесной промышленности [1,2]. Основной частью данной установки является вертикальная реторта 1, которая имеет зоны накопления 2,7, сушки 3, пиролиза 4, активирования 5, охлаждения 6. Зоны изолированы между собой шиберными заслонками [6]. Для накопительной зоны установки термохимической переработки древесины, разработан алгоритм получения математической модели, позволяющий описать процессы, протекающие в остальных пяти зон вертикальной реторты. Совместное моделирование последовательно связанных процессов прогрева, сушки, пиролиза, активации, охлаждения, протекающих в установке, позволяет определить ее оптимальные режимные и конструктивные параметры [4,5]. В вертикальной реторте в зону накопления перерабатываемого сырья подают технологическое сырье (измельченные древесные отходы). После загрузки открывается шиберная заслонка и содержимое подается в зону сушки, где оно сушится и прогревается до 250°C, за счет подачи топочных газов через патрубок 8, полученных в зоне пиролиза и активации. При взаимодействии с древесным сырьем у данного сушильного агента понижается температура и увеличивается влажность. Далее, теплоноситель через патрубок 12 выводится из зоны сушки и подается в зону накопления через патрубок 13, где участвует в предварительном прогреве загружаемого сырья. Содержимое зоны сушки переходит в зону пиролиза, с дальнейшей активацией и охлаждением полученного древесного угля.

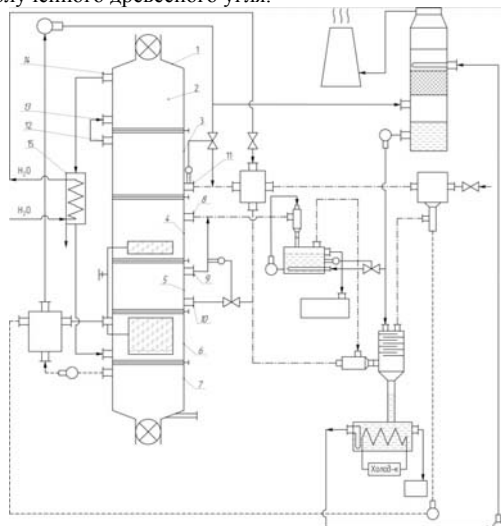


Рис.1 Установка для производства древесного угля.

1 - вертикальная реторта; 2,7 - зоны накопления; 3 - зона сушки; 4 - зона пиролиза; 5 - активирования; 6 - зона охлаждения

Данная установка для производства древесного угля позволяет повысить эффективность процесса предварительной сушки древесных отходов отходящими топочными газами, и повысить качество древесного угля за счет повышения сорбционной актив-

ности, а также надежность организации процесса переработки измельченных древесных отходов и эффективность работы установки за счет использования энергии топочных газов для активирования древесного угля. Также термическая переработка древесных отходов в описанной установке позволяет решить не только экологическую проблему многих предприятий лесопромышленного комплекса, но и получить высококачественные продукты лесохимии.

Список литературы

1. Заявка на патент РФ №2014153912, МПК C10B1/04(2014.01) Установка для производства древесного угля /Р.Г. Сафин, Н.Ф., Тимербаев, Р.Р.Сафин., и др., Бюл.№19, от 19.01.2015.
2. Сафин, Р.Г. Пиролизная переработка отходов лесопромышленного комплекса в древесный уголь /Р.Р.Зиятдинов, А.В.Сафина, А.Р.Хабибуллина / Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2014. - №20-Т.17. –С.131-134.
3. Сафин, Р.Г. Современное состояние процессов сушки древесины в разреженной среде /Р.Р. Зиятдинов, А.В. Сафина, А.Р. Хабибуллина/ Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2014. - №20-Т.17. –С.137-141.
4. Зиятдинов, Д.Ф. Термомодификация древесных материалов (статья) /Д.А.Ахметова, А.Л. Тимербаева, А.Р.Хабибуллина/ Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2014. - №8-Т.17. –С.94-96.
5. Сафин, Р.Г. Математическая модель тепломассообменных процессов, протекающих при переработке древесных отходов /Р.Р.Зиятдинов, Д.А.Ахметова, А.В.Сафина, А.Р.Хабибуллина/ Вестник Казанского государственного технологического университета. - 2015. Т18, №3. – С.161-163.
6. Сафин, Р.Г. Переработка отходов лесопромышленного комплекса в древесный уголь / А.В.Сафина, З.Г.Саттарова, Т.Д.Исхаков, А.Р.Хабибуллина / Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2015. - №4 -Т.18. –С.151-153.

УДК 674.8

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА ULTRASOUND INTENSIFICATION HYDROTHERMAL TREATING WOOD FILLER IN COMPOSITE MATERIALS

Фарида В. Назипова*, Айсылу И. Хуснуллина**
Farida V. Nazipova, Aisylu I. Khusnullina

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань
(e-mail: faridaN13@mail.ru)

**Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань
(e-mail: faridaN13@mail.ru)
Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Аннотация: В статье описывается экспериментальное исследование процесса извлечения водорастворимых веществ из древесной щепы с помощью ультразвука с дальнейшим использованием древесины при производстве цементно-стружечных плит, приведен анализ полученных данных и по результатам полученных испытаний сделан

вывод. Главной задачей предложенного метода является оптимизация и интенсификация процесса экстракции водорастворимых веществ.

Abstract: The paper describes the experimental study of the process of extraction of water soluble substances from wood chips by means of ultrasound with the continued use of wood in the production cement-bonded boards, the analysis of the data and the results obtained by the test concluded. The main objective of the proposed method is to optimize the extraction process and the intensification of water-soluble substances.

Ключевые слова: цементно-стружечные плиты; древесный наполнитель; ультразвуковая обработка; экстракция.

Keywords: cement particle boards; wood filler; ultrasonic treatment; extraction.

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 (ДСП, ДВП, фанера), ЦСП имеет ряд преимуществ: они негорючи, нетоксичны, био- и атмосферостойки [1, 2]. В этом материале сочетаются положительные свойства минеральной составляющей и наполнителя в виде древесной стружки, плиты могут выдерживать большие нагрузки на сжатие перпендикулярно пласти. Древесный наполнитель обладает рядом уникальных свойств: малая плотность, хорошая смачиваемость, легкость обработки. Однако некоторые свойства древесины отрицательно сказываются на процессе структурообразования, прочности и стойкости ЦСП 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 разрушаются 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. 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. На выход действующих веществ влияют интенсивность и продолжительность ультразвукового облучения, температура экстрагента, соотношение сырья и экстрагента. В этой связи исследования ультразвуковой интенсификации процесса водной экстракции «цементных ядов» в производстве ЦСП носит актуальный для промышленности характер [2, 3]. На основании этого, были проведены экспериментальные исследования, при которых древесные частицы подвергаются процессу экстракции. Это позволяет повысить разрушение легкогидролизуемых гемицеллюлоз, что в свою очередь снижает возникновение «цементных ядов» в процессе смешения древесных частиц с минеральным вяжущим. В работе рассматриваются два способа выведения водорастворимых веществ: способ варки древесной щепы в экстрагенте и способ варки в экстрагенте с применением ультразвука.

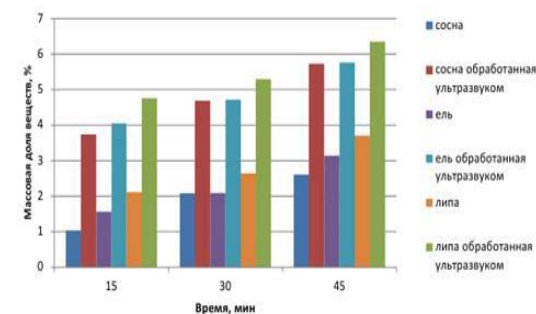


Рис. 1. Массовая доля экстрагированных веществ в зависимости от времени выдержки в дистиллированной воде при 20°C.

После исследования процесса экстракции водорастворимых веществ из древесины, были изготовлены образцы цементно-стружечных плит с целью дальнейшего их исследования на прочностные характеристики. Марка цемента в экспериментах составляет М400. В качестве древесного наполнителя использовалась щепа сосны. Исследование прочностных характеристик полученных образцов осуществлялось на универсальной разрывной машине ИР 5082-50. Массовая доля экстрагированных веществ увеличивается с увеличением температуры и продолжительности обработки (рис. 1). Аналогичный характер носит скорость экстрагирования веществ, растворимых в дистиллированной воде. Образцы ЦСП были исследованы на предел прочности на сжатие в зависимости от вида и температуры обработки измельченной древесины. Для проведения исследований использовалась испытательная машина типа SZ-5-1.

По результатам исследований можно сделать вывод, что процесс экстракции ультразвуком, по сравнению со способом обычной варки, позволяет значительно ускорить и увеличить выход экстрагируемого вещества и как следствие, увеличить прочность изготавливаемого из данного сырья ЦСП.

Список литературы:

1. Razumov E.Y., Safin R.R., Barcik S.Š., Kvietková M., Romelevich K.R. Studies on mechanical properties of composite materials based on thermo modified timber // Drvna Industrija. 2013. 64-1. pp. 3-8.
2. Сафин Р.Р., Лашков В.А., Сафин Р.Г., Аминов Л.И., Игнатъева Г.И., Мухаметзянова Д.А., Тимирбаев Н.Ф., Кондрашева С.Г., Воронин А.Е. Способ изготовления изделий из композиционных материалов, преимущественно арболита. Патент на изобретение RU 2345886 30.03.2007.
3. Сафин Р.Р., Беякова Е.А. Экспериментальные исследования термомодифицирования древесины в гидрофобных жидкостях // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 12. С. 241-245.

УДК 674.04

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАНИЯ
ДРЕВЕСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В СРЕДЕ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ
STUDY OF THE PROCESS OF HEAT TREATMENT OF WOOD FILLER
IN THE ENVIRONMENT OF THE FLUE GASES**

**Регина В. Салимгараева, Татьяна А. Бодылевская
Regina V. Salimgaraeva, Tatyana A. Bodylevskaya**

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань*

(e-mail: archiwood@mail.ru)

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Аннотация: в статье приведены результаты исследований процесса термомодифицирования древесного наполнителя в среде топочных газов с целью улучшения эксплуатационных характеристик древесно-полимерных композитов. Результатом работы являются оптимальные режимные параметры изучаемого процесса, обеспечивающие улучшение био и водостойкости ДПК.

Abstract: in article results of researches of process of heat treatment of wood filler in the environment of the flue gases for the purpose of improving the performance of wood-plastic composites. The result is optimum regime parameters of the process under study, and improved bio and water resistance WPC.

Ключевые слова: древесный наполнитель; термомодифицирование; топочные газы.

Keywords: wood filler; heat treatment; flue gases.

Высокий спрос на современные древесные материалы с заданными свойствами обуславливает необходимость развития новых технологий изготовления древесно-полимерных композитов. В настоящий момент улучшение свойств ДПК рассматривается с позиции изменения характеристик полимера и его адгезии с древесиной, однако низкая био- и водостойкость органического наполнителя снижают эксплуатационные свойства древесно-полимерных композитов.

Поэтому актуальным является исследование процессов термического модифицирования древесного наполнителя в производстве композиционных материалов и разработка соответствующей технологии, которая позволит повысить размерную стабильность частиц, добиться отсутствия в них микропор, и как следствие увеличить прочностные характеристики ДПК. В связи с этим предложена технология предварительной термообработки древесного наполнителя в среде топочных газов, включающая в себя стадии высокотемпературной обработки без доступа кислорода воздуха в камере барабанного типа и последующего охлаждения в шнеке с водяной рубашкой.

Проблемам исследования технологии термомодифицирования древесных материалов в среде инертных газов посвящены многие работы зарубежных и отечественных ученых. Вопросам теплопереноса в технологиях термообработки древесины, теплотехнических свойств древесины, математического моделирования процессов тепло- и влагопереноса древесины посвящены работы Ladislav Dzurenda (Slovakia), Anna Koski (Finland), Р.Р. Сафина (Россия) [1-10].

На основании анализа физической картины и формализации рассматриваемого процесса, разработано математическое описание термомодифицирования древесного сыпучего сырья с выделением стадий нагрева, термического модифицирования и охлаждения готового продукта. Математическое моделирование процессов позволило провести теоретические исследования с целью выявления целесообразных областей практического применения разработанного метода термообработки, оценки влияния режимных параметров на кинетику процессов и свойства получаемого продукта.

Процесс термомодифицирования в среде топочных газов является непрерывным. Древесный наполнитель загружают в камеру, где циркулирует теплоноситель, повышение его температуры происходит путем смешения в камере с топочными газами. Измельченная древесина в аппарате находится как в полете, так и в завале. Основным способом теплопередачи к измельченной древесине в полете является конвекция, подвод тепла к материалу в завале характеризуется контактным методом. Температура, до которой осуществляется нагрев древесного наполнителя, зависит от требуемой степени термомодифицирования. При достижении необходимого результата производят выгрузку древесного наполнителя в шнек, где происходит стадия охлаждения обработанного сырья путем теплопередачи хладагенту, циркулирующему в рубашке шнека.

Установленные закономерности изменения физико-механических свойств измельченной древесины различных фракций при различных температурах и времени термообработки показали, что с увеличением температуры обработки насыпная плотность и угол естественного откоса уменьшаются. Это объясняется тем, что после термообработки поверхность древесных частиц становится менее шероховатой. Аналогично наблюдалось снижение относительной плотности сырья.

Результаты исследований показали, что с повышением температуры обработки древесного наполнителя снижается степень набухания ДПК-образцов при выдержке в воде; с уменьшением размера частиц и повышением температуры обработки древесного наполнителя морозостойкость образца увеличивается. В ходе исследования была определена зависимость продолжительности процесса термомодифицирования и относительная плотность древесных частиц в зависимости от температуры обработки и параметров оборудования: угла поворота осыпания, диаметра и длины барабана. Установлена рациональная скорость движения теплоносителя 0,75 - 1,5 м/с, обеспечивающая длину барабана не более 8 - 10 м.

Список литературы

1. Пат 2453426 RU, МПК В27К5/04 Способ морения древесины и устройство для его реализации / Р.Р. Сафин и др.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО "КГТУ". - № 2010154564/13; заявл. 30.12.2010; опубл. 20.06.2012 Бюл. № 17.
2. Пат 2425305 RU, МПК F26B5/04, F26B3/34 Способ сушки и термической обработки древесины / Р.Р. Сафин и др.; заявитель и патентообладатель ООО «НТЦ РПО». - № 2010108198/06; заявл. 04.03.2010; опубл. 27.07.2011 Бюл. № 21.
3. Разумов Е.Ю. Экспериментальное исследование физического эффекта обработки древесных отходов ВЧ-плазмой / Разумов Е.Ю., Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Аминов Л.И. // Деревообрабатывающая промышленность - 2009. - №1. - С.24-25.
4. Сафин Р.Р. Имитация древесины мореного дуба термомодифицированием / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Е.Ю. Разумов, Е.А. Белякова // Дизайн. Материалы. Технология. - 2010. - №3. - С.95-98.
5. Сафин Р.Р. Исследование термомодифицирования древесины сосны в условиях вакуумнокондуктивных аппаратов / Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Ахметова Д.А. // Дизайн и производство мебели - 2008. - №2. - С.36-39.
6. Сафин Р.Р. Разработка новой технологии получения термодревеси / Р.Р. Сафин, Е.А. Белякова, Е.Ю. Разумов // Вест. казан. техн. ун-та. - 2011. - №1. - С.157-162.
7. Сафин Р.Р. Усовершенствование технологии термомодифицирования древесины ВIKOS-TMT / Р.Р. Сафин, Е.А. Белякова, Т.А. Бодылевская // «Вестник КГТУ». - 2012. - Т.15. №13. - С.134-136.
8. Сафин Р.Р. Разработка энергосберегающей технологии термомодифицирования древесины / Сафин Р.Р., Кашапов Н.Ф., Канарский А.В., Разумов Е.Ю., Ахметова Д.А. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 209. - №3-4. - С.104-110.

9. Deliiski N., Dzurenda L. Modeling of thermal processes in the technologies for wood processing // Technical University, Zvolen, 2010. – 224.

10. Koski, Anna, Applicability of crude tall oil for wood protection // University of Oulu, Finland Acta Univ. Oul. C 293, 2008.

УДК 674.04

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАНИЯ
ДРЕВЕСИНЫ В ЖИДКОСТЯХ
STUDY OF THE PROCESS OF HEAT TREATMENT OF WOOD IN LIQUIDS**

**Татьяна А. Бодылевская, Елена А. Белякова
Tatyana A. Bodylevskaya, Helena A. Belyakova**

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань
(e-mail: elena.aleksandr@mail.ru)*

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Аннотация: целью проведенных исследований процесса термомодифицирования древесины было улучшение ее цветовых характеристик без применения химических веществ. Для этого образцы древесины подвергали термообработке при различных температурах (160–260°C) и времени (0,5–4,5 час). После испытаний были проанализированы изменения значений цвета древесины в зависимости от режимных параметров процесса. В результате чего были получены зависимости, позволяющие определить оптимальные режимные параметры процесса и обеспечить необходимую степень термообработки.

Abstract: the purpose of the research the process of heat treatment of wood has been improving its color characteristics without the use of chemicals. The wood samples were subjected to heat treatment at different temperatures (160–260°C) and time (0.5 to 4.5 hours). After tests were used to analyze changes color values of wood depending on the operating parameters of the process. Resulting in the obtained dependences allow to determine the optimal operating parameters of the process and to ensure the necessary degree of heat treatment.

Ключевые слова: древесина; термомодифицирование; цвет.

Keywords: wood; heat treatment; colour.

Растущий спрос на натуральные материалы и ограниченность запасов древесины ценных пород определили необходимость разработки технологии термомодифицирования быстрорастущих и недорогих пород, которая позволит не только изменять цвет материала, но и улучшать его характеристики. Самый распространенный метод глубокого окрашивания древесины – окунание. Такой подход имеет ряд существенных недостатков: химические красители снижают экологичность получаемого материала; большинство пигментов подвержены выцветанию под действие УФ-лучей.

Предлагаемый способ термомодифицирования позволяет использовать ресурсы самой древесины в процессе окрашивания; исключить применение химических красителей; получить материал стойкий к выцветанию и заданного цвета, характерного для ценных и экзотических пород. Технология термомодифицирования древесины подробно представлена в работах Сафина Р.Р., Беляковой Е.А., Бодылевской Т.А. и др. [1–8]. Целью данной работы было определение зависимости скорости реакции от температуры процесса термомодифицирования, позволяющей определить рациональные режимные параметры предлагаемой технологии. Для этого образцы древесины подвергли термообработке при различных температурах (160–260°C) и продолжительности (0,5–

4,5 час). После испытаний были проанализированы изменения значений цвета материала в зависимости от режимов обработки.

На основании проведенных исследований было получено уравнение зависимости скорости реакции от температуры процесса термомодифицирования, позволяющее рассчитать рациональные режимные параметры предлагаемой технологии:

$$k = (a \cdot T^b) \cdot \exp\left(-\frac{c \cdot T^{-0.69}}{RT}\right),$$

где а, b и с – коэффициенты, учитывающие породу древесины; Т – температура, К; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К).

С увеличением продолжительности и температуры обработки, цвет древесины становится более темным. Хорошо видимые изменения отражаются в системе цветовых координат CIE Lab, из чего следует: $\Delta a^*(0,19...+6,41)$, $\Delta b^*(+3,48...+10,62)$, $\Delta L^*(-2,18...-22,15)$. В целом изменение цвета ΔE находится в пределах от 4,15 до 25,48.

Изменение показателя (Δa^*) присутствовало во всех испытаниях, что означает изменение цвета поверхности на красный оттенок. Значения желтого оттенка изменяются в положительном направлении (Δb^*), таким образом поверхность образцов древесины стала более желтоватого цвета. Испытания привели к снижению светлоты ΔL^* , цвет стал темнее. Незначительные изменения наблюдались при самой низкой температуре (160°C), потемнение стало более заметное после того, как температуру и длительность увеличили, наибольшие изменения наблюдались при 260°C, 150 мин. Более длительная продолжительность термообработки не привела к значительному изменению цвета.

Результаты проведенных исследований показали, что скорость термических преобразований (изменения цветового тона или степени термомодифицирования) зависит от температуры обработки и имеет наибольшие значения в начале процесса, когда соотношение экстрактивных веществ и пентозанов максимальное. Полученные данные позволили определить зависимости продолжительности стадии термообработки от требуемой степени термомодифицирования, по результатам которых можно сделать вывод, что для каждой степени существует несколько вариантов режимов обработки. Например, для высокой степени термомодифицирования температурный диапазон составит от 220°C до 240°C, а при более низких температурах (180–200°C) данная степень термообработки будет достигнута при продолжительности процесса, начиная от 4 часов и выше.

Таким образом, современная промышленная термообработка решает следующие задачи: преобразование доступных дешевых пород древесины в качественно новый материал, расширение области его применения и повышение ценовой конкурентоспособности; инновационный экологически дружелюбный способ окрашивания древесины как альтернатива химическому; инновация в производстве конечного продукта, которая проявляется в новых дизайнерских и инженерных решениях исходя из улучшенных свойств древесного материала.

Список литературы

1. Белякова, Е.А. Разработка методики классификации термомодифицированной древесины с помощью цветовой гаммы / Е.А. Белякова, Р.Р. Сафин, Т.А. Бодылевская // Деревообрабатывающая промышленность. – 2013. - №1. – С.30-34.

2. Пат 2453426 RU, МПК B27K5/04 Способ морения древесины и устройство для его реализации / Р.Р. Сафин и др.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО "КГТУ". - № 2010154564/13; заявл. 30.12.2010; опубл. 20.06.2012 Бюл. № 17.

3. Пат 2425305 RU, МПК F26B5/04, F26B3/34 Способ сушки и термической обработки древесины / Р.Р. Сафин и др.; заявитель и патентообладатель ООО «НТЦ РПО». - № 2010108198/06; заявл. 04.03.2010; опубл. 27.07.2011 Бюл. № 21.

4. Сафин Р.Р. Имитация древесины мореного дуба термомодифицированием / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Е.Ю. Разумов, Е.А. Белякова // Дизайн. Материалы. Технология. – 2010. - №3. – С.95-98.

5. Сафин Р.Р. Разработка новой технологии получения термодревеси / Р.Р. Сафин, Е.А. Белякова, Е.Ю. Разумов // Вест. казан. техн. ун-та. – 2011. - №1. – С.157-162.

6. Сафин Р.Р. Разработка технологии и аппаратного оформления термомодифицирования древесины в жидкостях / Р.Р. Сафин, Е.А. Белякова, Халитов Р.А., Байгильдеева Е.И. // Вест. казан. техн. ун-та. – 2012. Т. 15. - №3. – С.131-133.

7. Сафин Р.Р. Усовершенствование технологии термомодифицирования древесины ВIKOS-TMT / Р.Р. Сафин, Е.А. Белякова, Т.А. Бодылевская // «Вестник КГТУ», Т.15, №13/2012, стр.134-136.

8. Сафин Р.Р. Экспериментальные исследования термомодифицирования древесины в гидрофобных жидкостях / Р.Р. Сафин, Е.А. Белякова // Вест. казан. техн. ун-та. – 2011. - №12. – С.241-245.

УДК 53.082.63

МОНИТОРИНГ МИКРОСТРУКТУРЫ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В ДРЕВЕСИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЭФФЕКТА

Николай Н. Матвеев, Нина С. Камалова,

Наталья Ю. Евсикова, Виктор В. Саушкин

Nikolai N. Matveev, Nina S. Kamalova, Natalia Yu. Evsikova, Victor V. Saushkin

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова», Россия, Воронеж,
(e-mail: rc@icmail.ru)

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Russia, Voronezh

Аннотация: предложен метод мониторинга микроструктуры целлюлозы в древесине на основе анализа изменения степени кристалличности целлюлозы в результате воздействия внешнего неоднородного температурного поля.

Abstract: The microstructure monitoring method of the cellulose in wood by analyzing changes in the degree of the cellulose crystallinity by as a result of applying an external inhomogeneous temperature field is proposed.

Ключевые слова: древесина; целлюлоза; микроструктура; термополяризационный эффект.

Keywords: wood; cellulose; microstructure; thermal polarization effect.

Один из самых используемых материалов на Земле – древесина имеет пористую структуру. Структура стенок древесных пор – слоистая. Основными компонентами стенок являются частично кристаллическая волокнообразующая целлюлоза и аморфный лигнин. Наличие пор в материале определяет реакционную способность целлюлозного волокна, а степень кристалличности целлюлозы во многом определяет механические свойства древесины в целом.

Целлюлозный материал – это не монолит, а сложный ансамбль молекул, плотность упаковки которых на различных этапах агрегации различна. При этом природная целлюлоза – стереорегулярный синдиотактический полимер. Схематически макромолекулы целлюлозы представляют собой слегка свернутую спираль – "ленту" сечением $0,39 \times 0,83$ нм. Агрегация молекул целлюлозы обусловлена большим числом полярных гидроксильных групп и регулярным строением полимерных цепей. Ленты укладываются более или менее параллельно в одной плоскости по 10–15 штук, образуя пачки моле-

кул из 8–10 слоев. Вследствие относительной жесткости макромолекул и прочности межмолекулярных связей время существования таких пачек практически неограничено. Сечение пачки составляет примерно 5×8 нм. Молекулярные цепи оказываются правильно упакованными в среднем на участке длиной 15–17 нм, а затем следует участок "разрыхления" длиной 2,5–3,0 нм. Внутри аморфных областей имеются пустоты – поры размером 0,5–1,0 нм. Архитектоника целлюлозного волокна следующая: 10–12 пачек агрегируются в первичную элементарную фибриллу, 10–12 элементарных фибрилл – во вторичную фибриллу, 10–12 вторичных фибрилл – в микрофибриллу, 10–15 микрофибрилл – в фибриллы. Среднестатистические размеры элементарной фибриллы 20×20 нм [1].

Таким образом, процесс упаковки в микрофибрилах целлюлозы характеризуется чередованием кристаллической и аморфной фаз. Поэтому отклик вещества древесины на изменение внешних физических факторов будет зависеть от концентрации кристаллитов в волокнообразующей целлюлозе, которая в свою очередь зависит от морфологии ее макромолекул и от особенностей их кристаллизации. В данной работе предлагается проводить мониторинг микроструктуры целлюлозы на основе анализа изменения степени ее кристалличности в результате воздействия внешнего неоднородного температурного поля. Применяемый метод исследования будем называть методом температурного сканирования.

В основу метода температурного сканирования положен тот факт (см., например, [2]), что в силу структурного различия основных составляющих клеточной стенки древесины (лигнина и целлюлозы) и пьезоэлектрических и пирозэлектрических свойств кристаллитов целлюлозы в образце в виде тонкого слоя древесины, помещенном в неоднородное температурное поле с градиентом температуры ΔT , возникает электрическое поле термического происхождения, разность потенциалов которого можно измерять с контролируемой точностью с помощью электроизмерительных приборов. Данная характеристика естественно зависит от степени кристалличности целлюлозы в древесине и свойств ее кристаллитов. Однако, если ΔT изменяется со временем по линейному закону, в силу трудности создания стационарного одномерного теплового потока и надежного контакта с электродами измерительной системы, разность потенциалов начинает зависеть от времени испытания и претерпевает, как показывает практика, скачок. На рисунке 1 приведены (в виде кружков) экспериментальные данные по измерению разности потенциалов в образце толщиной $l_0 \sim 100$ мкм, вырезанном из древесины березы влажностью около 40%, при температурном сканировании с ΔT , изменяющимся со временем по линейному закону.

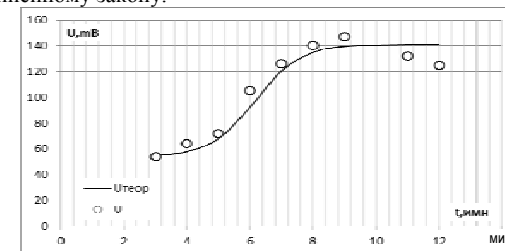


Рис. 1. Изменение разности потенциалов, возникающей в образце толщиной 100 мкм, вырезанном из древесины березы влажностью около 40%, при термическом сканировании при линейно уменьшаемом ΔT .

Концентрация кристаллитов n при изменении внешних условий, определяющая степень кристалличности древесины, зависит от процесса относительного прироста кристалла, характеризующегося скоростью G :

$$\frac{dn}{\Delta n} = Gdt, \quad (1)$$

и направленного против упорядочения процесса диффузии, характеризующегося коэффициентом k_D :

$$\frac{dn}{dt} = -k_D \frac{dn}{dx}. \quad (2)$$

Поскольку в стационарном состоянии эти два процесса уравниваются друг друга, то уравнение для определения концентрации кристаллитов в целлюлозе имеет вид:

$$\frac{dn}{dx} = (k_D/G)\Delta n. \quad (3)$$

При решении данного уравнения получается экспоненциальная функция, что не соответствует действительности. Однако, соотношение (3) можно использовать для формализованной модели так называемых «мягких вычислений» [3]. Особенности образования микрофибрил целлюлозы, перечисленные выше, можно моделировать полагая, что количество кристаллитов является ограниченным, и поэтому скорость относительного прироста зависит от их концентрации следующим образом:

$$G(n) = G(1 - \chi \Delta n), \quad (4)$$

где χ – коэффициент, характеризующий число кристаллитов и степень кристалличности целлюлозы. Решая при температурном сканировании образца уравнение (3) с такими условиями, можно определить приращение концентрации кристаллитов при их суммарном сжатии (в силу теплового расширения лигнина) на $\Delta x = \alpha_0 \Delta T(t)$ (где α – коэффициент теплового расширения лигнина), как

$$\Delta n = \frac{n_0 \exp((G/k_D)\Delta x)}{1 + \chi \exp((G/k_D)\Delta x)}. \quad (5)$$

В рамках предложенного подхода получается, что возникающая при температурном сканировании образца разность потенциалов прямо пропорциональна изменению концентрации кристаллитов, зависит от степени кристалличности целлюлозы, и определяется выражением:

$$U = U_0 + \frac{k_U \exp((G/k_D)\alpha_0 \Delta T(t))}{1 + \chi \exp((G/k_D)\alpha_0 \Delta T(t))}, \quad (6)$$

где k_U – параметр, подбираемый эмпирическим путем.

Параметрическая кривая, рассчитанная по (6), представлена на рисунке 1 сплошной линией. Результаты испытаний согласуются с полученной параметрической кривой при определенных значениях параметра χ , связанного с изменением числа кристаллитов и степенью кристалличности целлюлозы в древесине. Таким образом, метод температурного сканирования позволяет контролировать степень кристалличности целлюлозы в древесине.

Список литературы

1. Манделькern Л. Кристаллизация полимеров. Пер. с англ. / Под ред. С. Я. Френкеля. – М.: Химия, 1966. – 33 с.
2. Роль кристаллитов целлюлозы в поляризации биополимерного композита – древесины в неоднородном температурном поле / Н. Н. Матвеев, Н. Ю. Евсикова, Н. С. Камалова, Н. И. Коротких // Известия РАН. Серия физическая. – 2013. – Т. 77, № 8. – С. 1185.
3. Арнольд В. И. А84 «Жесткие» и «мягкие» математические модели. – М.: МЦНМО, 2004. – 32 с.

УДК 66.092-977

КОНДУКТИВНАЯ СУШКА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ CONDUCTIVE DRYING OF WOOD WASTE GASIFICATION

Н.Ф. Тимербаев, З.Г. Саттарова, Р.Р. Зиятдинов, Л.Р. Смирнова, М.Н. Суходова
N. F. Timerbaev, Z. G. Sattarova, R. R. Ziatdinov, R. L. Smirnova, M. N. Sukhodova

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия,
Казань (e-mail: kstu.ru)*

Kazan national research technological university, Russia, Kazan

Аннотация: В тезисе описан газогенератор для газификации влажного топлива с дополнительной зоной кондуктивной сушки.

Abstract: the thesis describes the gasifier for the gasification of wet fuel with additional conductive zone of drying.

Ключевые слова: кондуктивная сушка; утилизация древесных отходов; газификация.

Keywords: conductive drying; utilization of wood waste; gasification.

Утилизация древесных отходов – одна из важнейших проблем современного общества. Из-за низкого уровня технологических процессов деревообработки процент древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса может достигать 60%. Образующиеся древесные отходы в виде щепы, опилок, горбыля, срезов и стружек являются малоэффективными для использования в качестве топлива, из-за высокого уровня влажности. На сегодняшний день одним из самых распространенных методов утилизации отходов древесины является – метод газификации, который включает в себя зоны сушки, пиролиза, горения и восстановления.

Увеличение влажности древесных отходов свыше 30% приводит к снижению содержания горючих компонентов и теплотворной способности генераторного газа. В связи с этим целесообразна предварительная сушка отходов перед газификацией. Для газификации высоковлажных древесных отходов, образующихся на лесозаготовительных производствах, разработаны газогенераторы с предварительной сушкой отходов. Конструкция узла сушки данных газификаторов зависит от фракционного состава древесных отходов и их геометрических размеров.

В случаях, когда контакт теплоносителя с древесными частицами не допустим, например, при необходимости одновременного извлечения из влажных древесных частиц экстрактивных веществ, целесообразно применять кондуктивный подвод тепла для предварительной сушки древесных частиц. Среди преимуществ кондуктивной сушки можно выделить высокую скорость обработки. Это связано с повышенной теплоотдачей, которая происходит в результате непосредственного контакта продукта с нагреваемой поверхностью. На рис. 1 показан газогенератор для газификации влажного топлива, состоящий из двух частей: верхней для подсушки топлива и нижней для пиролиза.

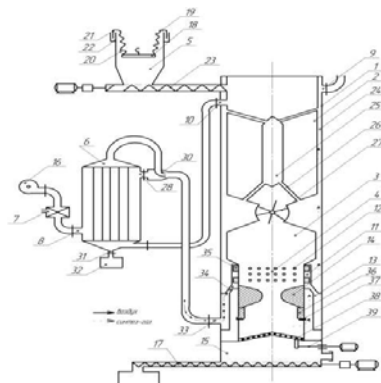
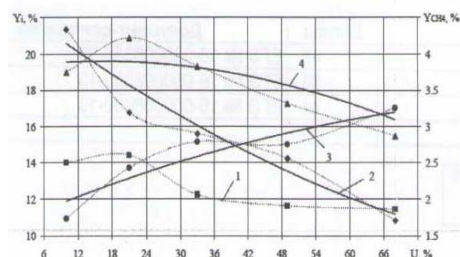


Рис. 1 Схема газогенератора для газификации влажного топлива.

Древесные отходы поступают в верхнюю часть бункера 2 для сушки, в которой установлены дополнительные нагревательные элементы в виде воздушной рубашки 24, осуществляющей прогревание отходов по периферии, и цилиндрического элемента 25, осуществляющего прогревание щепы изнутри бункера. Прогрев данных элементов осуществляется за счет поступления генераторного газа, образующегося в нижней части газификатора. Верхняя часть бункера для подсушки топлива 2 изолирована от нижней части бункера для пиролиза 3 лопастным барабанным питателем 27, который не позволяет проходить пиролизным газам.

Древесные отходы, соприкасаясь со стенками воздушной рубашки и цилиндрическим элементом, нагреваются. В связи с чем повышается их температура и уменьшается влажность. Образующийся в зоне сушки влажный воздух удаляется через патрубок 10. Подсушенные и прогретые древесные отходы поступают в зону пиролиза с последующей их газификацией.

Результаты экспериментальных исследований показывают (рис.2), что с уменьшением влажности древесных отходов увеличивается количество CO и содержание H_2 . Так же можно отметить снижение выхода образуемого генераторного газа при увеличении влажности древесных отходов.

Рис. 2. Зависимость состава генераторного газа от влажности отходов:
1 - CH_4 ; 2 - CO ; 3 - CO_2 ; 4 - H_2

Список литературы

1. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Хисамиева, Т.Д. Исхаков. «Совершенствование техники и технологии процесса газификации высоковлажных древесных отходов», стр.3- 5.
2. Тимербаев, Н.Ф. Техника и технологии термической переработки отходов дерево-

обрабатывающей промышленности (монография)/ Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова. – М-во образ. И науки РФ, Казан. Гос. Технол. Ун-т. – Казань: КГТУ, 2010.- 172с.

3. Просвирников, Д.Б. Получение фильтрующего материала на основе порошковой целлюлозы / Д.Б. Просвирников, И.Р. Ахметшин // Актуальны направления научных исследований XXI века: теория и практика.- 2014. –Т.2. - №3-2 (8-2). – С. 411-414.

4. Тимербаев, Н.Ф. Кондуктивный теплообмен дисперсного материала в установке для производства древесного угля / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Садретдинов, И.И. Хуснуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. - №18. - С.69-75.

5. Тимербаев, Н.Ф. Утилизация твердых отходов деревопереработки, содержащих токсичные вещества / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова. - Вестник Казанского технологического университета, 2011, №4, С.79-84.

СЕКЦИЯ 7. ЭНЕРГО – И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 664.8.047:662.99

**ПРИМЕНЕНИЕ УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛОТЫ И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ ПРИ СУШКЕ МАТЕРИАЛОВ
APPLICATION OF THE HEAT RECOVERY EXCHANGERS AND THE HEAT PUMPS FOR ENERGY SAVINGS IN THE DRYING OF MATERIALS****Андрей Гаряев
Andrey Garyaev***«Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва
(e-mail: gab874@yandex.ru).**National Research University "MPEI", Russia, Moscow*

Аннотация: Обсуждены вопросы применения различных способов утилизации теплоты отходящего сушильного агента при конвективной сушке материалов. Рассмотрены рекомендации по организации оптимальных схем для утилизации теплоты при конвективной сушке, включающих использование рециркуляции сушильного агента, применение конденсационных теплообменников-утилизаторов (КТУ и теплонасосных установок).

Abstract: Discussed the application of various methods of waste heat from exhaust of the drying agent during convective drying of materials. The recommendations on the organization of optimal schemes for utilization of heat during convective drying, which includes the recirculation of the drying agent, the use of condensing heat exchangers and heat pumps.

Ключевые слова: утилизация теплоты; конвективная сушка; сушильный агент; теплообменники-утилизаторы; теплонасосная установка; рециркуляция

Keywords: heat recovery; convective drying; drying agent; heat exchangers-heat recovery; heat pump installation; recycling

Можно с уверенностью сказать, что одним из важнейших направлений экономии энергетических ресурсов при конвективной сушке материалов является использование теплоты отходящего из сушильных установок отработанного сушильного агента. В распределении нерациональных энергетических затрат в сушильных установках данная составляющая достигает 70% (Рисунок 1).

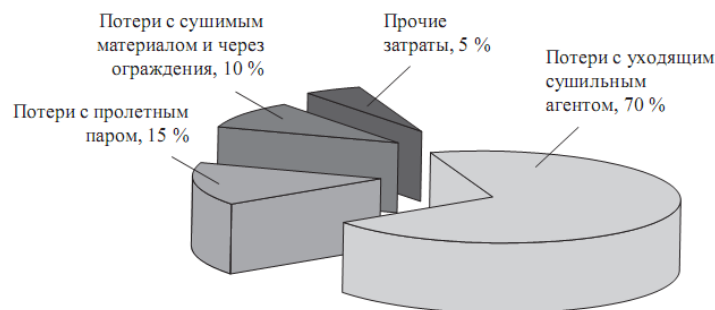


Рисунок 1. Распределение нерациональных энергетических затрат в сушильных установках

Цель данной статьи – обсудить некоторые вопросы, связанные с применением различных способов утилизации теплоты отходящего сушильного агента.

Потери теплоты с отходящими газами можно сократить использованием их частичной рециркуляции, теплообменников-утилизаторов (ТУ) и (или) теплонасосных установок (ТНУ) (Рисунок 2). Рекуперативные теплообменники-утилизаторы используются для подогрева воздуха, поступающего в сушильную камеру отходящим сушильным агентом. Чаще всего это пластинчатые теплообменники, поверхность теплообмена в которых образуют гладкие или гофрированные металлические листы. В зависимости от периода года экономия тепловой энергии при использовании ТУ будет различной. Летом, при высоких температурах наружного воздуха она существенно меньше, чем зимой. В зимний период года в таких аппаратах происходит глубокая утилизация теплоты, то есть охлаждение сушильного агента ниже точки росы, сопровождающаяся выпадением конденсата. Экономия энергии при глубокой утилизации теплоты более существенна, поскольку скрытая теплота конденсации водяных паров часто превышает явную теплоту сушильного агента в несколько раз. Расчет теплообменных аппаратов в таких случаях более сложен и имеет особенности [1]. При глубокой утилизации теплоты теплообменник-утилизатор работает как конденсационный теплоутилизатор (КТУ).

Более глубокого охлаждения сушильного агента можно добиться в теплонасосных установках. Испаритель парокомпрессионного теплового насоса работает при этом как конденсационный теплоутилизатор. Это, как правило, трубчатый оребренный теплообменный аппарат, в котором в трубках движется либо рабочий агент (фреон), либо хладагент (раствор гликоля в воде), а с наружи трубки омываются влажным сушильным агентом.

Применение рециркуляции является самым дешевым способом экономии теплоты, однако оно возможно и эффективно не всегда, поскольку влагосодержание сушильного агента при рециркуляции растет и, таким образом снижается движущая сила процесса сушки. Даже если рециркуляция возможна, то с ее помощью не может быть использована вся теплота отходящих газов. Применение аппаратов для глубокой утилизации теплоты расширяет возможности использования рециркуляции, поскольку приводит к снижению влагосодержания сушильного агента.

Комбинации указанных выше методов, а также подогрева при помощи входящего в состав сушилки штатного калорифера (или электронагревателя) дает несколько десятков возможных схем для реализации. Выбор схемы утилизации теплоты очень важен. Обычно при ее выборе принимаются во внимание два критерия: первый – получаемая экономия, второй – простота, обеспечивающая надежность и удобство эксплуатации. Отметим, что стоимость оборудования для осуществления утилизации теплоты относительно невелика, особенно по сравнению с затратами топлива. С другой стороны выбор наилучшей схемы сложен. Он зависит от того, какой материал подвергается сушке, от климатических условий и ряда других факторов. Пример такого выбора для сушки термоллабильных материалов рассмотрен в [2]. Для выбора схемы требуется проводить многовариантные оптимизационные расчеты.

На настоящий момент имеются определенные соображения и рекомендации по организации и выбору схем, которые мы рассмотрим ниже.

1. Применение теплового насоса в подавляющем большинстве случаев лучше, чем простое электрический подогрев сушильного агента, который еще достаточно распространен.

2. Когда в качестве одного из элементов схемы применяется тепловой насос, следует помнить, что подавляющее большинство тепловых насосов может нагреть сушильный агент до температуры порядка 60°C, что часто явно недостаточно. Поэтому ТНУ чаще применяют для низкотемпературной сушки, в том числе для сушки термоллабильных материалов [3]. Если требуются более высокие температуры, следует применять ТНУ лишь для предварительного подогрева сушильного агента перед калорифером.

3. Схема утилизационной установки с тепловым насосом и теплообменником-утилизатором часто лучше, чем просто схема с тепловым насосом, поскольку мощность теплового насоса (а значит и его стоимость) снижаются. Это обусловлено тем, что часть теплоты отбирается в КТУ. Кроме того, совместное применение КТУ и ТНУ позволяет добиться более глубокого охлаждения сушильного агента в испарителе теплового насоса, повысить коэффициент трансформации теплоты и снизить затраты электрической энергии на единицу массы высушенного материала.

4. При определении экономической эффективности применения утилизации теплоты в сушильных установках для тепловых насосов нужно определить и использовать не обычный, а полный коэффициент трансформации, теплоты, равный отношению передаваемого потребителю в конденсаторе теплового потока к полной электрической мощности, затрачиваемой в компрессоре и в насосах, осуществляющих циркуляцию теплоносителя в контурах испарителя и конденсатора. В противном случае расчет может приводить к большим ошибкам.

5. Кроме выбора схемных решений и распределения мощностей между элементами системы утилизации теплоты требуется также выбор режимных параметров схем. Например, одной из задач выбора режимных параметров является задача выбора температуры в испарителе ТНУ. Чем она ниже, тем больше выпадает влаги из сушильного агента, и тем интенсивнее процесс теплоотдачи. Однако при этом снижается коэффициент трансформации ТНУ.

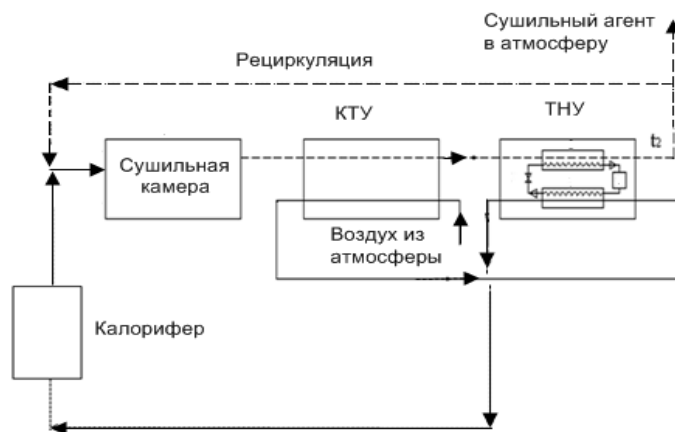


Рисунок 2. Одна из схем установок для сушки материалов, включающая все методы утилизации теплоты: рециркуляцию, применение КТУ и ТНУ

6. Одной из главных проблем, возникающих, если мы применяем тепловой насос или конденсационный теплообменник, является запыленность сушильного агента. Вместе с выпадением влаги на холодных теплообменных поверхностях запыленность приводит к тому, что поверхности покрываются слоем отложений. Особенно это касается оребренных поверхностей. Поэтому запыленный сушильный агент чаще всего нужно предварительно очищать. Сделать это можно в циклонах.

7. При утилизации теплоты запыленных газов лучше применять гладкотрубные теплообменники вместо оребренных. При глубокой утилизации теплоты это оправдано, поскольку из-за выпадения влаги коэффициент теплоотдачи со стороны газа существенно растет. Кроме того, оребренные поверхности при этом имеют более низкую тепловую эффективность. Применение гладких труб делает возможным удаление отложений обычной промывкой.

8. Для предотвращения коррозии теплообменного оборудования можно использовать теплообменники из полимерных материалов. Как показывают расчеты, несмотря на некоторое повышение термического сопротивления стенок труб, падение передаваемого теплового потока в них невелико и обычно лежит в пределах 1-5%.

Перечисленные соображения могут быть полезны для модернизации существующих и для разработки новых сушильных установок.

Список литературы

1. Гаряев А.Б. Особенности расчета установок для утилизации теплоты влажных газов // Энергосбережение и водоподготовка.-2006.-№8.-С. 13-15.
2. Гаряев А.А., Яковлев И.В. Оценка эффективности тепловых насосов в процессах конвективной сушки// Вестник МЭИ.-2010. — №3. - С.63-70.
3. Дабига Н.А. Сушка термолabileльных материалов до низкого остаточного влагосодержания с использованием теплонасосных циклов. // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2011: Тр. IV-й Межд. науч.- практ. конф., в 2-х томах. -М.: МГАУ.-2011.-Т. 2.-С. 28-31.

УДК 664.723.047

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НА ПАРАМЕТРЫ ОТРАБОТАННОГО АГЕНТА СУШКИ ШАХТНОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ EFFECT OF OPTIONS FOR WASTE DRYING AGENT RECIRCULATING GRAIN DRYERS SHAFT

Н.И. Малин
N.I. Malin

РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. Институт механики и энергетики
им. В.П. Горячкина, Россия, Москва
(e-mail: mali_nik@mail.ru).

RGAU-ICCA them Timiryazev. Institute of Mechanics and Energy
them V.P. Goryachkina, Russia, Moscow

Аннотация: Приведены результаты моделирования процесса сушки зерна пшеницы в шахтной рециркуляционной зерносушилке с целью определения параметров отработанного агента сушки и воздуха в условиях меняющихся значений скорости фильтрации в зерновом слое агента сушки и воздуха, температуры и влажности подаваемого на сушку сырого зерна.

Abstract: Simulation results of the drying process in the wheat silo recirculating dryer to determine parameters of the waste of drying agent and the air in the face of changing speeds in grain bed filtration of drying agent and the air temperature and humidity for drying the crude feed grain.

Ключевые слова: Сушка зерна; рециркуляция; моделирование; вторичные энергоресурсы; температура; влагосодержание.

Keywords: Grain drying; recycling; modeling; secondary energy resources; temperature; moisture content.

Шахтная рециркуляционная зерносушилка (ШРС) конструктивно состоит [2] из надсушильного бункера (зона отлежки), двух параллельно работающих (и расположенных) шахт (одна — рециркуляционная, с 1-й и 2-й зонами сушки; вторая — сушильно-охлаждающая, с 3-й зоной сушки и зоной охлаждения) и напорных камер между ними (верхняя — для подвода агента сушки в 1-ю и 3-ю зоны сушки; вторая, диагонально

разделенная перегородкой, соответственно для подвода агента сушки во 2-ю зону сушки и атмосферного воздуха в зону охлаждения).

Ее особенностью (как и других типов рециркуляционных зерносушилок) является наличие зоны отлежки смеси сырого и рециркулируемого зерна, последствия которой сказываются при поступлении смеси зерна в зоны сушки: имеет место интенсивное испарение поверхностной влаги, сопровождаемое некоторым понижением температуры зерна в начальный период сушки [3]. Характерная термограмма двухступенчатой сушки зерна пшеницы в 1-й и 2-й зонах сушки ШРС, созданной на базе шахтной прямоточной зерносушилки типа ДСП-32 приведена на рис. 1.

В ходе исследований нами, в соответствии со сформулированной в названии доклада задачей, были установлены необходимые расчетные соотношения между получаемыми в результате моделирования данными о кинетике процесса сушки зерна пшеницы и конечными выходными данными по температуре и влагосодержанию отработанного агента сушки в 1-й ... 3-й зонах сушки и воздуха в зоне охлаждения ШРС при различных значениях скорости фильтрации агента сушки и воздуха в зерновом слое v_{ϕ} (м/с), различных значениях начальной температуры θ_0 (°C) и начальной влажности w_0 (%) подаваемого на сушку зерна.

Результаты моделирования процесса, приведенные на рис. 2, 3 и 4 показали следующее.

Увеличение скорости фильтрации v_{ϕ} (м/с), а заодно и массового расхода агента сушки и воздуха L (кг/ч), в незначительной мере влияет на температуру t' и влагосодержание d' отработанного агента сушки и воздуха. Прослеживается (рис. 2) явное влияние начальной температуры агента сушки, которая в ходе исследований была принята в соответствии с [1] и не изменялась как для 1-й...3-й зон сушки ($t_{1c} = t_{3c} = 130$ °C), так и для 2-й зоны ($t_{2c} = 150$ °C). В частности установлено, что чем выше начальная температура агента сушки, тем выше температура отработанного и, наоборот, чем ниже начальная температура агента сушки, тем Рис. 1. Термограмма двухступенчатой сушки смеси зерна пшеницы влажностью 15,56 % в 1-й (точки 0...12) и 2-й зонах сушки (точки 12...28) шахтной рециркуляционной зерносушилки при температуре агента сушки $t_{1c} = 130$ °C и $t_{2c} = 150$ °C и скорости фильтрации $v_{\phi} = 0,28$ м/с выше влагосодержание отработанного.

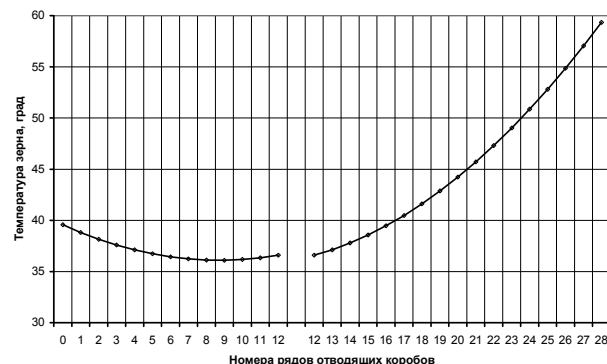


Рис. 1. Влияние скорости фильтрации v_{ϕ} (м/с) агента сушки и воздуха в зерновом слое на параметры отработанного агента сушки и воздуха: расход L (кг/ч), температуру t' и влагосодержание d' в зонах сушки (1с, 2с, 3с) и охлаждения (охл)

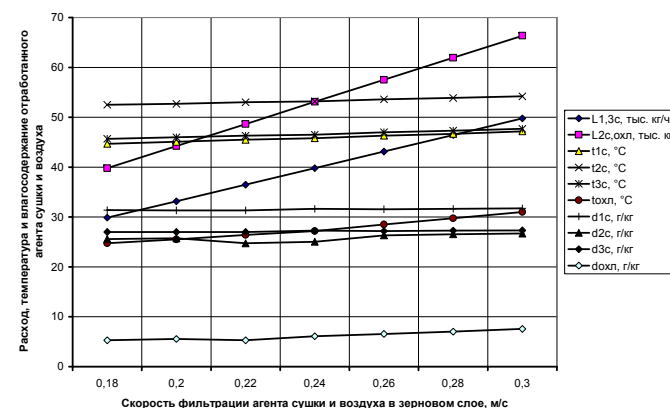


Рис. 2. Влияние скорости фильтрации v_{ϕ} (м/с) агента сушки и воздуха в зерновом слое на параметры отработанного агента сушки и воздуха: расход L (кг/ч), температуру t' и влагосодержание d' в зонах сушки (1с, 2с, 3с) и охлаждения (охл)

К месту следует отметить, что в условиях производства скорость фильтрации (как и соответствующая ей скорость выхода агента сушки и воздуха из отводящих коробов) устанавливается по условию ограничения выноса полноценного зерна из отводящих коробов и в процессе сушки зерна одной и той партии не изменяется.

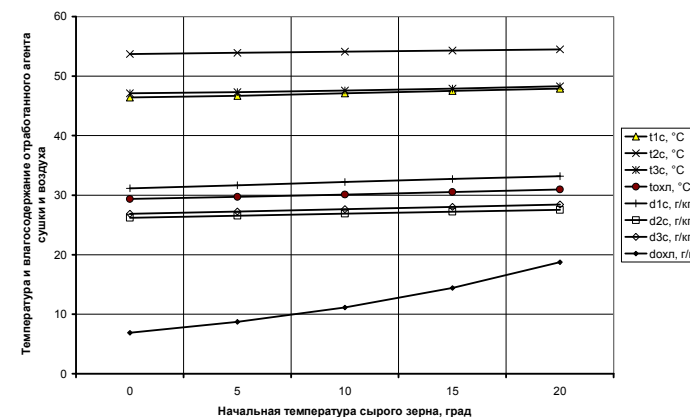


Рис.3. Влияние начальной температуры сырого зерна θ_0 (°C) на параметры отработанного агента сушки и воздуха: температуру t' и влагосодержание d' в зонах сушки (1с, 2с, 3с) и охлаждения (охл)

Изменение начальной температуры подаваемого на сушку зерна (связанное с изменением температуры окружающей среды), также (рис. 3) в незначительной мере влияет на температуру t' и влагосодержание d' отработанного агента сушки и воздуха (размер повышения не превышает нескольких единиц, в соответствии с размерностью этих параметров). Как и на рис. 2 прослеживается явное влияние начальной температуры агента сушки, с теми же последствиями.

Изменение начальной влажности подаваемого на сушку зерна (возможное в условиях производства в основном с сушкой различных партий зерна), в большей мере, в сравнении с рис. 2 и 3, влияет (рис. 4) на температуру t' и влагосодержание d' отработанного агента сушки и воздуха. Причем характер поведения кривых совершенно иной: с ростом влажности сырого зерна наблюдается уменьшение температуры отработанного агента сушки и воздуха. Что касается влагосодержания отработанного агента сушки, то по мере роста влажности зерна, как и в предыдущих опытах наблюдается увеличение их значений.

А вот влагосодержание отработанного воздуха ведет себя по другому: по мере роста влажности зерна наблюдается незначительное уменьшение влагосодержания, что можно объяснить более интенсивным охлаждением просушенного зерна и снижением на этом фоне количества испаряемой из зерна влаги за счет внутренней тепловой энергии самого зерна.

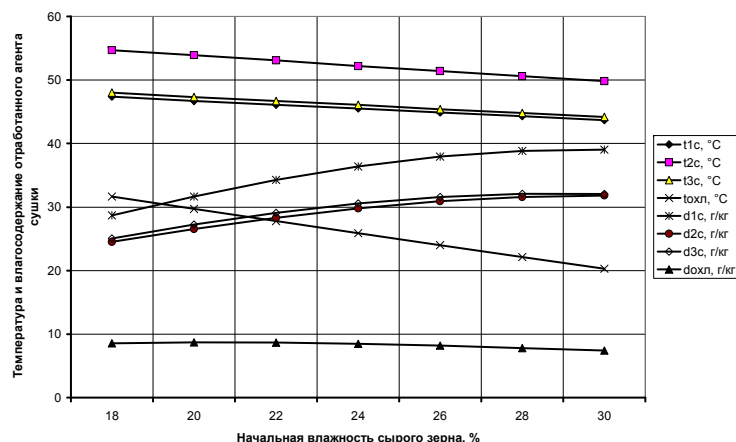


Рис. 4. Влияние начальной влажности сырого зерна w_0 (%) на параметры отработанного агента сушки и воздуха: температуру t' и влагосодержание d' в зонах сушки (1с, 2с, 3с) и охлаждения (охл)

Приведенные результаты моделирования на примере сушки зерна пшеницы в ШРС показали возможные пределы изменения температуры и влагосодержания агента сушки и воздуха по зонам сушилки, как функций различных факторов, обусловленных режимами сушки и влиянием внешней среды. Наличие подобных данных может позволить решать вопросы более рационального использования вторичных энергоресурсов зерносушилок любых типов.

Список литературы

1. Инструкция по сушке продовольственного, кормового зерна, маслосемян и эксплуатации зерносушилок № 9-3-82. — М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1982. — 60 с.
2. Малин Н.И. Справочник по сушке зерна. — М.: Агропромиздат, 1986. — 159 с.
3. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна. — М.: КолосС, 2004. — 240 с.

УДК 664.723.047

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ШАХТНЫХ ПРЯМОТОЧНЫХ И РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ЗЕРНОСУШИЛОК TO THE QUESTION OF SECONDARY ENERGY POTENTIAL MINE RAMJET AND RECIRCULATION DRYERS

Н.И. Малин

N.I. Malin

РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева. Институт механики и энергетики

им. В.П. Горячкина,

(e-mail: mali_nik@mail.ru).

РГАУ–ИЦА им. Тимирязева. Институт механики и энергетики им. В.П. Горячкина, Россия, Москва

Аннотация: Дано описание предложенной и используемой автором методики аналитической оценки потенциала вторичных энергоресурсов шахтных прямоточных и рециркуляционных зерносушилок с учетом их технологических, конструктивных и эксплуатационных характеристик.

Abstract: A description of the proposed methodology and the author used an analytical assessment of waste energy potential of mine once-through and recirculating dryers with regard to their technology, design and performance.

Ключевые слова: Зерносушилка; рециркуляция; вторичные энергоресурсы; температура; влагосодержание.

Keywords: Grain dryer; recycling; secondary energy resources; temperature; moisture content.

Выбор конкретного варианта (либо комбинации вариантов и различных модификаций) использования вторичных энергоресурсов зерносушилок должен базироваться на аналитических расчетах [2], проведение которых невозможно без данных о параметрах отработанного агента сушки и воздуха. Отсюда, задача настоящей работы — изложение используемой автором методики аналитического расчета параметров отработанного агента сушки (и воздуха) для шахтных прямоточных и рециркуляционных зерносушилок [3], основанной на производственных данных и разработанном автором критериальном методе [4].

Базовой в этих расчетах (как для шахтных прямоточных, так и для рециркуляционных зерносушилок) является формула, устанавливающая взаимосвязь между энтальпией, температурой t' и влагосодержанием d' отработанного агента сушки (и воздуха); на примере 1-й зоны сушки:

$$d_1' = [10^3 (1,004 t_1' - H_1) + \Delta d_1] / [\Delta - (2500 + 1,88 t_1')], \quad (1)$$

где Δ — разность сообщений и потерь теплоты, определяемая из теплового баланса, кДж / кг; H_1 , d_1 — энтальпия (кДж / кг) и влагосодержание (г / кг) определяемые по начальным параметрам агента сушки (и воздуха).

Что касается температуры t' отработанного агента сушки и воздуха, то для шахтных прямоточных и рециркуляционных зерносушилок она определяется с учетом температуры зерна (и агента сушки) по следующим выражениям:

после зоны окончательного охлаждения шахтных прямоточных и рециркуляционных зерносушилок $t_0' = 0,5(\theta_2 + \theta_3) - 5$, после зоны промежуточного охлаждения упомянутых выше рециркуляционных зерносушилок $t_0'' = 0,5(\theta_2 + \theta_{\text{pec}}) - 5$;

после 1-й зоны сушки шахтных прямоточных зерносушилок $t_1' = 0,125(\theta_0 + \theta_1 + 2t_1) + 5$; после 2-й зоны сушки этих же зерносушилок $t_2' = 0,125(\theta_1 + \theta_2 + 2t_2) + 5$;

после устройства для предварительного подогрева зерна рециркуляционных зерносушилок (например, смеси сырого и рециркулируемого) $t_1' = \theta_{см} + 0,2 (t_1 - \theta_2)$.

Начальная температура зерна θ_0 (°C) при подаче на сушку в любой тип зерносушилки принимается равной температуре окружающей среды t_0 (°C), т.е. $\theta_0 = t_0$, а предельное значение температуры нагрева зерна $\theta_{п.д}$ (°C) устанавливается в соответствии с рекомендуемыми Инструкцией по сушке режимами [1].

При определении остальных промежуточных (позонных) значений температуры зерна, входящих в используемые применительно к шахтным прямоточным зерносушилкам выражения, необходимо учитывать, что в этих зерносушилках, вследствие неравномерного распределения агента сушки, как по сечению шахт, так и по длине отдельных коробов, и целого ряда других причин, имеет место неравномерность нагрева, для оценки которой используется коэффициент перегрева δ_n , определяемый, с учетом средней по зонам температуры агента сушки t (°C), массы зерна в полезном объеме 1-й и 2-й зон сушки E (кг), суммарного числа подводящих и отводящих коробов в 1-й (n_{1c}) и 2-й (n_{2c}) зонах сушки, начальной температуры зерна θ_0 (°C) производительности G_0 и G_2 (кг / с) по формуле:

$$\delta_n = 0,0225 + 0,12 t E / [3600 (G_0 + G_2) (n_{1c} + n_{2c} - 1)] - 0,003 \theta_0. \quad (2)$$

Значение $E_{пш}$ для зерна пшеницы, средняя насыпная плотность которого $\rho_{пш} = 750$ кг / м³, приведено в справочниках, значение E для зерна других культур определяется с учетом их средней плотности ρ (справочная величина) из соотношения: $E = E_{пш} \rho / 750$.

Средняя по зонам температура агента сушки $t_{а.с.р}$ (°C) определяется, с учетом температуры t_{1c} , t_{2c} (°C) и скоростей v_{1c} , v_{2c} (м / с) агента сушки на выходе из отводящих коробов в 1-й и 2-й зонах сушки, по соотношению:

$$t_{а.с.р} = [t_{1c} v_{1c} (n_{1c} - 1) + t_{2c} v_{2c} (n_{2c} - 1)] / [v_{1c} (n_{1c} - 1) + v_{2c} (n_{2c} - 1)]. \quad (3)$$

Температура зерна θ_2 (°C) на выходе из 2-й зоны сушки (т.е. перед поступлением в зону окончательного охлаждения) определяется, с учетом коэффициента перегрева (2) и предельной температуры нагрева зерна $\theta_{п.д}$ по соотношению:

$$\theta_2 = \theta_{п.д} / (1 + \delta_n).$$

Температура зерна θ_1 (°C) на выходе из 1-й зоны сушки определяется, с учетом критерия эффективности нагрева зерна в 1-й зоне сушки $K_{\theta_{1c}}$, начальной θ_0 и конечной «оптимальной» $\theta_{2опт}$ температуры нагрева зерна (°C), по соотношению:

$$\theta_1 = \theta_0 + K_{\theta_{1c}} (\theta_{2опт} - \theta_0).$$

Конечное «оптимальное» значение температуры нагрева зерна (°C), с учетом (3):

$$\theta_{2опт} = \theta_0 + 0,028 t^{3/2} + 8,2.$$

Критерий эффективности нагрева зерна в 1-й зоне сушки $K_{\theta_{1c}}$, с учетом критерия эффективности нагрева зерна во 2-й зоне сушки $K_{\theta_{2c}}$, определяется по соотношению:

$$K_{\theta_{1c}} = K_{\theta_{2c}} [t_{1c} v_{1c} (n_{1c} - 1)] / [t_{1c} v_{1c} (n_{1c} - 1) + t_{2c} v_{2c} (n_{2c} - 1)].$$

Критерий эффективности нагрева зерна $K_{\theta_{2c}}$ во 2-й зоне сушки, т.е. от θ_0 до θ_2 при рассчитанном значении $\theta_{2опт}$:

$$K_{\theta_{2c}} = (\theta_2 - \theta_0) / (\theta_{2опт} - \theta_0).$$

Фактическая производительность по охлаждению зерна $G_{охл}$ (план. т / ч охлажденного зерна) охладительных камер большинства зерносушилок (шахтных прямоточных, а особенно рециркуляционных) не всегда соответствует их паспортной производительности G (которая определяется из условия сушки зерна мягкой пшеницы продовольственного назначения от 20 до 14 %) и, кроме того, в значительной мере зависит от режимов работы зерносушилок. Поэтому температура зерна на выходе из зоны охлаждения θ_3 (°C) как шахтных прямоточных, так и рециркуляционных зерносушилок, определяется

по соотношению:

$$\theta_3 = \theta_2 - (G_{охл} K_B / G) (1 - 0,003 \theta_2) (\theta_2 - t_0),$$

где K_B — коэффициент перевода просушенного зерна в плановые единицы в зависимости от влажности (%) до и после сушки.

Температуру зерна на выходе из зоны промежуточного охлаждения шахтных рециркуляционных зерносушилок рекомендуется определять из эмпирического выражения

$$\theta_{рец} = \theta_2 - (G_2' / G_2'') (1 - 0,003 \theta_2) (\theta_2 - t_0').$$

Температура смеси сырого и рециркулируемого зерна (°C) определяется из выражения

$$\theta_{см} = (\theta_0 + n \theta_{рец}) / N,$$

где n , N — соответственно кратность смешения ($n = G_{рец} / G_0$) и коэффициент циркуляции ($N = G_{см} / G_0$); $N = 1 + n$ и $n = N - 1$.

Для зерносушилок с камерой для нагрева зерна в падающем слое (типов «Целинная» и «РД») необходимое значение коэффициента циркуляции N определяется, с учетом предельной температуры нагрева зерна $\theta_{п.д}$ (°C), из выражения

$$N = A (w_0^c - w_{рец}^c) / [w_0^c - 0,012 (w_0^c)^2 + 0,153 \theta_{п.д} - 17,7];$$

для остальных типов рециркуляционных зерносушилок — из выражения

$$N = A K_{н(к)} (w_0^c - w_3^c) / [w_0^c - 0,011 (w_0^c)^2 - 9,4],$$

где w_0^c , $w_{рец}^c$, w_3^c — влажность сырого, рециркулируемого и просушенного зерна в расчете на массу сухого вещества, %; $w^c = w / (100 - w)$; A — коэффициент, учитывающий особенности конструкции зерносушилки; например, для шахтной рециркуляционной зерносушилки рекомендуется $A = 3,0$.

В отличие от шахтных прямоточных зерносушилок, где по мере протекания процесса температура зерна возрастает практически монотонно, в шахтных рециркуляционных в зону сушки, как правило, поступает прошедшая зону отлежки смесь сырого и рециркулируемого зерна, на поверхности которой находится поверхностная физико-механически связанная влага, при испарении которой температура смеси зерна может понижаться в той или иной мере, в зависимости от начальной температуры нагретого зерна и параметров агента сушки по температуре и скорости. Это исключает возможность использования формул, аналогичных рекомендуемым для определения температуры отработанного агента сушки в 1-й и 2-й зонах сушки шахтных прямоточных зерносушилок.

Истинное значение средней температуры зерна по зонам сушки шахтных рециркуляционных зерносушилок можно определить лишь имитационным моделированием, базирующемся на натурных испытаниях, используя выражение

$$\theta_{i.c} = (\theta_{i.0} + 2\theta_{i.1} + \dots + 2\theta_{i,n-1} + \theta_{i,n}) / 2 n,$$

где $i.c$ — номер зоны сушки; 0, 1, ..., n — последовательные значения времени пребывания зерна в $i.c$ зоне сушки, мин.

Позонные значения температуры отработанного агента сушки рециркуляционных зерносушилок (на примере $i.c$ зоны сушки), определяются по выражениям типа:

$$t_{i.c}' = 0,25(\theta_{i.c} + t_{i.c}) + 5.$$

Список литературы

1. Инструкция по сушке продовольственного, кормового зерна, маслосемян и эксплуатации зерносушилок № 9-3-82. — М.: ЦНИИТЭИ Минзема СССР, 1982. — 60 с.
2. Малин Н.И. Энергосберегающая технология сушки зерна: учебное пособие. — М.: МПТА, 2000. — 111 с.
3. Малин Н.И. Энергосбережение в теплотехнологиях и теплотехнических системах АПК: учебное пособие. — М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2011. — 112 с.

4. Малин Н.И. Использование критериев подобия для обоснования оптимальных способов (и режимов) сушки зерна и расчета зерносушильных аппаратов // Труды ВНИЭКИПродмаш, вып. 56, 1981. . — с. 108...112.

УДК 631.812.12

ЭНЕРГО-РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ЗА СЧЁТ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНЫХ АЗОТСОДЕРЖАЩИХ УДОБРЕНИЙ ПОВЫШЕННОГО КАЧЕСТВА ДОГРАНУЛИРОВАНИЕМ ПРИЛЛИРОВАННЫХ ГРАНУЛ ПОРОШКООБРАЗНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ С ВЫСУШИВАНИЕМ РАСТВОРА СВЯЗУЮЩЕГО

ENERGY RESOURCE SEVING IN THE ACCOUNT OF PRODUCTION OF NITROGEN MINERAL FERTILIZERS WITH IMPROVED QUALITY BY MANS OF PRILLED GRANULES OVERGRANULATION WITH POWDERED FILLER WITH DRYING OF THE BINDER SOLUTION

Ю.А. Таран*, М.К. Захаров, В.О. Беспалова***, А.В. Таран***
Y.A. Taran*, M.K. Zakharov, V.O. Bepalova***, A.V. Taran ***

* *Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва (e-mail: capsula2@mail.ru)*

***Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва (e-mail: mkzakharov@gmail.com)*

****Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва (e-mail: bespalovavo@yandex.ru)*

Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies, Russia, Moscow

Аннотация: Выпуская на существующих, но реконструированных по предложенной технологии «fattening», башнях удобрения повышенного качества, на основе приллированных гранул, «догранулированных» порошкообразными наполнителями с использованием в качестве связующего 80-90% раствора продукта, модифицированного предлагаемыми добавками, и применяя их, можно получить значительный эффект ресурсо-энергосбережения от снижения потерь при транспортировке, хранении, вымывании и нитрификации, а также за счёт повышения урожайности.

Abstract: Producing on existing, but reconstructed with the proposed technology «fattening», towers fertilizers of improved quality on the basis of prilled granules overgranulated with powdered filler using as a binder 80-90% solution of the product, modified by proposed additions, and applying them, you can get significant effect on the resource-energy-saving by reduction of losses during transportation, storage, leaching and nitrification, as well as by increasing crop capacity.

Ключевые слова: минеральные азотсодержащие удобрения, гранулирование, тарельчатые грануляторы, грануляционные башни, удобрения повышенного качества, потери удобрения, урожайность, реконструкция производства.

Keywords: mineral nitrogen fertilizers, granulation, plate granulator, granulation tower, fertilizers of high quality, the loss of fertilizers, crop capacity, production reconstruction.

Весомыми источниками потерь минеральных азотсодержащих удобрений являются вымывание и нитрификация (до 50-70% масс.), а также потери при транспортировке, хранении и внесении в почву (до 10% масс.). Последствиями таких потерь становятся попадание удобрений в атмосферу, поверхностные и грунтовые воды, накопление нитритов и нитратов в растениях.

Таблица 1. Эффект от применения гранулированных минеральных удобрений повышенного качества в расчёте на 1 т продукта

Основные характеристики продукта	Потери при транспортировке и хранении (2% – для п. 1)	Примерная стоимость потерь при перевозке и хранении	Потери от вымывания и нитрификации (30÷50% – для п. 1)	Примерная стоимость потерь от вымывания и нитрификации	Примерный прирост урожайности от удобрений повышенного качества
ГОСТ 2-2013 Основная фракция 2÷3 мм, прочность 10 Н/гран	0,02 т	173руб	0,3÷0,5 т	2,6÷4,3 тыс. руб.	-
Гранулы по требованиям ЕС Основная фракция 3÷4 мм, прочность 26 Н/гран	0,01 т	91 руб. 3 USD	0,15÷0,25 т	1,4÷2,3 тыс. руб.	12% 2400 руб/Га
Крупные гранулы для внутрипочвенного внесения. Основная фракция 4÷5 мм, прочность 36 Н/гран	0,008 т	73 руб.	0,12÷0,2 т	1,1÷1,8 тыс. руб.	20% 4000 руб/Га
Гранулы по требованиям ЕС капсулированы 2% об. полимерной оболочкой	0,005 т	46 руб.	0,06÷0,1 т	0,6÷1 тыс. руб.	20%

Один из способов предотвращения этого - получение продукта из приллированных гранул при минимальной реконструкции существующих гранбашен пристройкой к ним без остановки производства блоков, реализующих предлагаемую технологию fattening, представляющую собой «догранулирование» окатыванием приллированных гранул порошкообразными наполнителями с использованием в качестве связующего 80-90% водного раствора продукта, модифицированного предлагаемыми добавками, с получением гранул повышенного качества в тарельчатом грануляторе (рис. 1). В результате можно в замену существующего продукта или его части получать гранулы укрупненного размера (4-5 мм), пригодные для внутрипочвенного внесения, эффективно капсулирования тонкими полимерными покрытиями, соответствующие требованиям Еврокомиссии от 2002 г. и близкие к монодисперсному гранулометрическому составу, повышенной статической прочности 25÷40 Н/гранулу, обладающие устойчивостью для NH4NO3 к термическим циклам нагрев ↔ охлаждение - 20°C ↔ 50°C на 90-500 циклов и с пониженной слеживаемостью продукта (не более 30 Па). Эта технология пригодна для выпуска аммиачной селитры и азотсодержащих минеральных удобрений с различными наполнителями CAN, NI, NS, NP, NK, которые, в частности, обеспечивают безопасность производства, транспортировки и хранения за счёт пониженного содержания 28% азота, и других продуктов.

В таблице 1 представлены результаты сравнения потерь аммиачной селитры повышенного качества, с аналогичными потерями продукта, произведённого в соответствии

с ГОСТ 2-2013. В результате потери при транспортировке и хранении снизились в зависимости от вида удобрения в 2-4 раза, от вымывания и нитрификации в 3 раза для не капсулированных, и в 5 раз для капсулированных продуктов. При применении таких удобрений наблюдается рост урожайности сельскохозяйственных культур на 12-25%. Схожие результаты были получены для карбамида и NPK и представлены в табл.1.

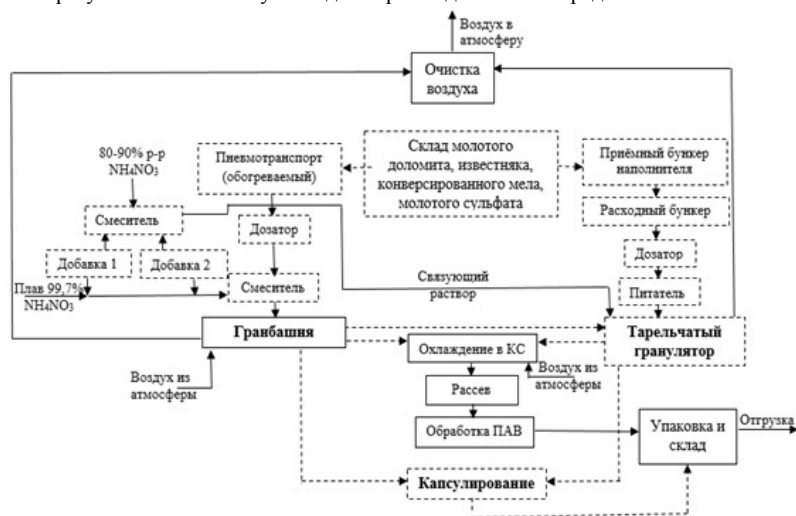


Рисунок 1. Схема реконструкции существующего производства прилированной АС под выпуск АС повышенного качества:

— существующие блоки; — реконструируемые блоки

УДК 664.8.047

ОЦЕНКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭФФЕКТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАСОСА ТЕПЛОвого ДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

EVALUATION OF ENERGY SAVING EFFECT AT USE PUMP OF HEAT ACTION IN PROCESSES OF HEAT AND HUMIDITY TREATMENT OF MATERIALS

Наталья Савченкова
Natalia Savchenkova

Кафедра Теплообменных процессов и установок
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14
Department of the Heat and Mass Transfer Process and Devices
National Research University "The Moscow Power Engineering Institute"
111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14
Tel/fax.: (495) 362-71-49
(e-mail: savchenkovanm@mpei.ru)

Аннотация: В данной работе уделяется внимание энергосбережению в системах возврата конденсата в паро-конденсатных сетях, например, при сушке в среде перегретого пара пиломатериалов, сыпучих продуктов, бетона, при использовании насоса теплового действия - тепломассопередающего устройства, разработанного на кафедре ТМПУ, НИУ «МЭИ» позволяющего перемещать конденсат за счет подвода движущей среды, без использования электрической энергии.

Abstract: In this paper attention was paid to energy efficiency in the condensate return systems in vapor-condensate networks, for example, in drying with superheated vapor lumber, bulk products, concrete, using a pump of heat action – heat and mass transfer device, developed at the Department of HMTDP, NRU “MPEI” that allows to move condensate by supplying the moving environment, without using electrical energy.

Ключевые слова: энергосбережение, насос теплового действия; сушка; паро-конденсатные сети

Keywords: energy efficiency, pump of heat action; drying; vapor-condensate networks

В настоящее время все более актуальным становится энергосбережение и, как следствие, развитие и внедрение энергосберегающих технологий и мероприятий. Область применения насосов теплового действия [1,2] обширна и включает в себя такие отрасли промышленной деятельности, как отопление, вентиляция, кондиционирование, пищевая промышленность, молочная промышленность, фармацевтическая, текстильная, химическая промышленность, энергетика, кораблестроение, нефтепереработка. В данной работе уделяется внимание энергосбережению в системах возврата конденсата в паро-конденсатных сетях, например, при сушке в среде перегретого пара пиломатериалов, сыпучих продуктов, бетона, при использовании насоса теплового действия - тепломассопередающего устройства, которое можно отнести к классу пульсационных термосифонов (Рисунок 1).

Цель данной статьи – произвести оценку энергосберегающего эффекта при использовании насоса теплового действия в системах возврата конденсата.

В последнее время разрабатываются различные способы сушки пиломатериалов, сыпучих продуктов, бетона и других материалов, где сушильным агентом является не воздух, а перегретый пар [3,4].

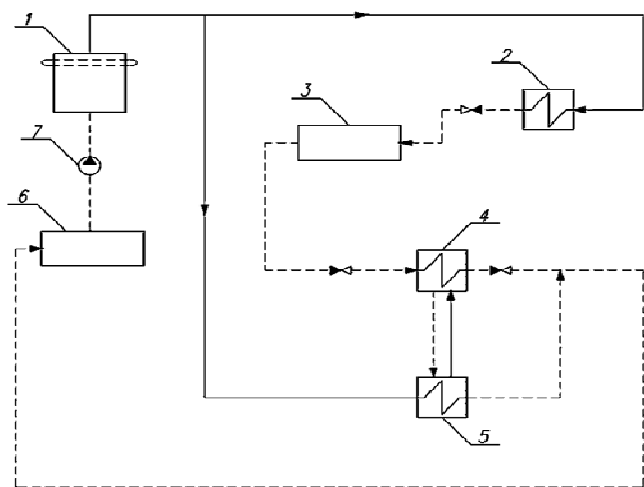


Рисунок 1. Схема системы возврата конденсата с использованием НТД.

1 – котел, 2 – потребитель, 3 – ресивер, 4 – конденсатор-аккумулятор, 5 – испаритель, 6 – сборник конденсата

Сушка в среде перегретого пара является одним из основных направлений интенсификации сушки пиломатериалов. В воздушной среде интенсивная сушка пиломатериалов возможна только тогда, когда воздух находится в очень сухом состоянии, и температура влажной древесины не превышает 70° , если даже температура окружающего воздуха достигает 120° . При нагреве до такой температуры в древесине от чрезмерных внутренних напряжений, вызванных неравномерностью усадки в процессе интенсивной сушки, возникают трещины и искривления.

При сушке древесины перегретым водяным паром и при атмосферном давлении (без присутствия воздуха) влажная древесина нагревается до температуры 100° и более. Древесина, нагретая до 100° (и выше), становится достаточно пластичной и легко воспринимает усадку в процессе быстрой сушки. Поэтому качество древесины, высушенной в среде перегретого водяного пара, хорошее. При температуре древесины 100° и выше происходит кипение влаги вместо обычного испарения, вследствие чего процесс парообразования (т. е. сушки) идет гораздо быстрее.

Интенсифицированная сушка пиломатериалов перегретым паром имеет следующие преимущества.

1. Удельные затраты тепла при сушке перегретым паром по сравнению с сушкой воздухом значительно меньше, так как отпадает необходимость нагрева воздуха. Теплотери через ограждения также уменьшаются, так как сокращаются сроки сушки.

2. Перегретый пар, отводимый из камер, можно использовать для паротушения, нагревания воды, отопления и т. д.

3. Применение для сушки древесины дымовых газов и воздуха при повышенных температурах и незначительном насыщении водяными парами связано с возможностью возникновения пожара. При сушке древесины перегретым паром горение в камере не происходит, так как сушильная камера насыщена водяным паром, и в ней отсутствует воздух. Горение в камере возможно только до и после процесса сушки. Наличие водяного пара в качестве агента сушки позволяет иметь эффективное средство тушения пожара — паротушение.

4. При сушке перегретым паром коэффициенты теплопередачи от калориферов к агенту сушки и дальше к высушиваемым пиломатериалам будут больше, следовательно, поверхность нагрева калориферов будет меньше, чем при сушке воздухом или дымовыми газами.

5. Теплоемкость перегретого пара почти в 2 раза выше теплоемкости воздуха при малой относительной насыщенности. Поэтому для переноса одного и того же количества тепла перегретого пара требуется (по весу) приблизительно в 2 раза меньше, чем воздуха. Осуществление принудительной циркуляции перегретого пара в сушильных камерах потребует меньших затрат механической или электрической энергии и будет дешевле, чем в воздушных и газовых сушильных камерах.

В связи с сокращением сроков сушки удельный расход электроэнергии также будет меньше, чем в камерах, у которых агентом сушки являются дымовые газы или воздух.

Разработан ряд устройств для выпаривания жидкости, содержащейся в сыпучей продукции, посредством перегретого пара в качестве сушильного агента.

Сушка свежеспиленного жомы перегретым паром позволяет обеспечить экологическую чистоту и экономичность производства, а также значительно интенсифицировать процесс сушки. Повышение экономичности процесса сушки, по сравнению с традиционным способом, достигается тем, что отработанный перегретый пар легко можно использовать для рециркуляции, технологических нужд или других целей. Кроме того, перегретый пар, являясь инертной средой, способствует сохранению качества готового продукта. Ряд исследователей отмечает высокие коэффициенты тепло- и массообмена при сушке перегретым паром, что обеспечивает интенсификацию процесса сушки и, как следствие, меньшее тепловое воздействие теплоносителя на материал. Данный способ получения сухого жома используется на сахарных заводах развитых западных стран.

По технологии бетон должен схватиться и затем длительное время набирать прочность. В отсутствие воды никакого набора прочности не происходит. Дальше по теории требуется увлажнять этот уже твердый бетон (ЖБИ изделия), что приведет к тому, что цементные зерна превратятся со временем в более стабильные образования гидросиликаты кальция. Процесс отвердения и набора прочности очень длительный. Если бетон приготовлен и твердеет в естественных условиях стройки, без прогрева и при положительных температурах внешней среды, контрольный срок твердения бетона равен примерно тридцати суткам. Обработка бетона перегретым паром позволяет обеспечить надежность и качество процессы затвердевания.

В связи с широким использованием пара в сушильных установках проблема возврата конденсата становится актуальной. В большинстве случаев конденсат просто сливается в канализацию. При этом теряется потенциальная энергия, которой он обладает и сам конденсат. Существует возможность возврата конденсата в источник теплоты для его повторного использования, то есть экономии теплоносителя в системе. В этом случае перекачиваемая среда — конденсат, а точнее — конденсат высокого потенциала, теплоту которого можно использовать для промежуточного подогрева и, соответственно, экономии топливно-энергетических ресурсов в системе. Обычно в роли устройств для возврата конденсата выступают конденсатные насосы.

Конденсатный насос — центробежный насос, предназначенный для перекачивания основного конденсата от конденсатора через эжекторы и подогреватели низкого давления, для функционирования которого необходим подвод движущей среды, такой как пар, сжатый воздух или инертный газ. Принцип его действия основан на вытеснении движущей средой перекачиваемой среды. По принципу работы конденсатные насосы делятся на электрические и механические. И у тех, и у других есть существенный недостаток — высокая цена. Стоимость механического насоса малой мощности начинается в области 50000 рублей. В свою очередь цены на электрические насосы лежат примерно в этих же пределах, но у них имеется еще один существенный недоста-

ток - необходимость постоянных затрат электроэнергии на эксплуатацию. То есть удельная стоимость таких конденсатных насосов становится еще выше.

На кафедре ТМПУ был разработан насос теплового действия, который производит перекачивание конденсата при помощи пара, отбираемого после источника теплоты – котла. Главным его достоинством является простота устройства. Насос теплового действия имеет небольшую металлоемкость, а значит, его изготовление потребует меньших капиталовложений, чем у устройств-конкурентов. Вследствие всего выше сказанного, данная установка представляется достойным оппонентом существующего на рынке ассортимента конденсатных насосов.

Очевидно, что при не очень высоких нагрузках применение насосов теплового действия имеет значительную выгоду вследствие своей экономичности относительно насосов-конкурентов, ввиду небольшой металлоемкости и низких затратах на эксплуатацию и изготовление.

Данный насос является энергонезависимым устройством без дополнительных потребностей электроэнергии для своей работы, что делает его возможным элементом мероприятий по энергосбережению в паро-конденсатных сетях.

В настоящее время сложные экономические условия, тенденции экологии и энергосбережения, а также стремление производителей приблизиться к европейским стандартам вызывают рост спроса на конденсатные насосы. По предварительным оценкам, в 2015 г. объем спроса на эту продукцию составит не менее 0,7 – 1 млрд. руб.

При установившемся режиме работы, испаритель, работающий на паре, позволяет осуществить полноценный цикл прокачивания конденсата за 15 минут. Насос, совершающий автоколебания за счет подвода электричества от электрогенератора, выдавливает жидкость того же объема за 40 минут [11]. Сопоставление этих фактов приводит к выводу не только об экономической эффективности перевода НТД на вторичные энергоресурсы, но и об увеличении производительности насоса теплового действия.

Тепломассопередающее устройство показало на практике стабильную, эффективную работу при всех мощностях, подводимых к парогенератору, и уменьшение нагрузки на парогенератор не привело к увеличению времени цикла.

Были проведены эксперименты при давлении в паро-конденсатном тракте 1 атм, но очевидно, что существует значительная область расширения возможностей использования насоса при более высоких давлениях внутри системы. Проведен также поверочный расчет, полученные результаты подтвердили отсутствие необходимости в перегреве греющего теплоносителя, а также высокую эффективность использования вторичных энергоносителей для нагревательного тракта.

На основании произведенного мониторинга рынка конденсатных насосов, анализа возможных поставщиков сырья и возможных подрядчиков, расчета объема производства, издержек, налоговых выплат и отчислений, можно сделать вывод, что насос теплового действия, отличающийся простотой и являющийся энергонезависимым устройством, является конкурентоспособным оппонентом на рынке конденсатных насосов.

Список литературы

1. Патент на полезную модель «Тепломассопередающее устройство» / Савченкова Н.М., Буй Мань Ту, Сасин В.Я., Парёхина И.В., Руденков А.С. № 94320 от 26.11.2009.- М.: Роспатент
2. Патент на полезную модель «Тепломассопередающее устройство» / Савченкова Н.М., Сасин В.Я., Парёхина И.В., Чернышов В.А. № 110175 от 24.05.2011.- М.: Роспатент
3. Патент US №2331829 «Устройство для сушки сыпучей продукции перегретым паром» / Кристенсен Х.
4. <http://www.activestudy.info/typy-parovykh-sushilnykh-ustanovok-drevesiny/> © Зооинженерный факультет МСХА

5. Портнов В.Д., Сасин В.Я. Расчет тепломассобменных аппаратов систем искусственного климата.—М.: Издательство МЭИ, 2009.

6. Yang H., Khandekar S. and Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes// Applied Thermal Engineering. – Vol. 28, Issue 1–2008.

УДК 674.04:674.8

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ DEVELOPMENT TECHNOLOGICAL COMPLEX FOR PRODUCTION THERMAL ENERGY IN THE DRYING PROCESS

Ильшат Ф. Хакимзянов*, Петр А. Кайнов*
Ilshat F. Khakimzyanov*, Petr A. Kainov*

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия,
Казань (e-mail: ilshat_170@mail.ru)
Kazan National Research Technological University

Аннотация. Рассмотрены пути повышения эффективности использования тепловой энергии, получаемой при газификации древесных отходов путем применения теплового насоса в технологической цепи. Рассмотрена возможность использования двигателя внутреннего сгорания, работающего на синтез-газе, получаемого в газификаторе.

Abstract. To improve the ways the utilization of the thermal energy produced by the gasification of wood waste through the use of a heat pump in the enological-chain. The possibility of using an internal burn down, whose are working on the synthesis gas produced in the gasifier.

Ключевые слова: газификация, тепловой насос, энергоэффективность, древесные материалы, сушка.

Keywords: gasification, heat pump, energy efficiency, wood materials, drying.

Создание энергосберегающих процессов и оборудования, позволяющих обеспечить экономию топливных и энергетических ресурсов, является важнейшей задачей современного производства. В настоящее время существует проблема возрастания дефицита топливных ресурсов, причем не только традиционных, но и возобновляемых, наблюдается постоянный рост тарифов на энергоносители. При этом наиболее доступным видом возобновляемого сырья в настоящее время является биомасса, основную долю которой составляет древесина.

Поэтому поставлена цель существенного сокращения потребления энергетических ресурсов путем повышения эффективности использования энергии сгорания возобновляемого топлива методом термохимической конверсии в газогенераторной установке [1].

В настоящее время на промышленных предприятиях отходы древесины в лучшем случае сжигаются в печах и топках котлов. Однако, стандартные топки имеют низкий КПД, требуют регулярной очистки и ремонтов, а в атмосферу в виде дыма выбрасываются не сгоревшие сложные и вредные углеводородные соединения и зольная пыль.

Генераторный газ, как топливо, имеет безоговорочные преимущества перед прямым сжиганием древесины и других видов биомассы. Генераторный газ, подобно природному газу, может быть передан на большое расстояние по трубопроводам и в баллонах; его удобно использовать в быту для приготовления пищи, для отопления и нагревания воды, а также в технологических и силовых установках. Сжигание газа легко автоматизировать; продукты сгорания менее токсичны, чем продукты прямого сжигания древесины и других видов биомассы.

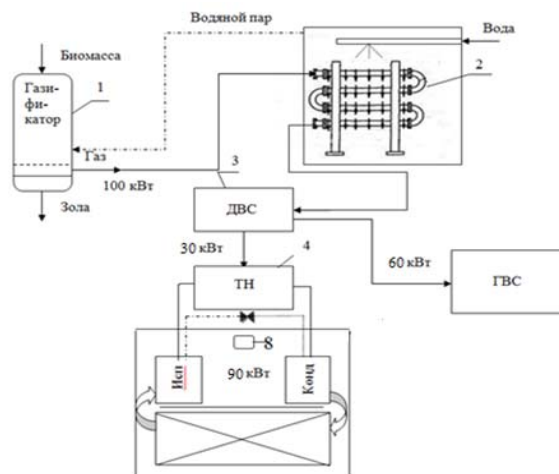


Рис. 1. Схема технологического комплекса по выработке тепловой энергии на основе газификации

В связи с этим нами было предложено создание технологического комплекса на базе газификации древесных отходов для получения тепловой энергии для промышленных и технологических процессов (например, отопления производственных и жилых помещений, суши и тепловой обработки материалов, для нужд горячего водоснабжения) (рис. 1) [2].

Разработка и внедрение данного технологического комплекса позволяет: повысить КПД всей системы и снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, связанную с производством тепловой энергии.

Технологический процесс состоит из следующих операций: газификация биомассы с получением синтез-газа; охлаждение синтез газа; сжигание синтез-газа в двигателе внутреннего сгорания с получением тепловой и механической энергий; осуществление работы компрессора теплового насоса с помощью механической энергии, вырабатываемого двигателем внутреннего сгорания.

Сырье в виде древесных отходов со склада исходного сырья поступает по транспортеру в газификатор 1. В газификаторе 1 происходит процесс разложения растительных отходов с получением синтез-газа, который проходит через охладитель 2, где происходит охлаждение синтез-газа водой посредством теплопередачи через разделяющую поверхность. Охладитель 2 подбирается таким образом, чтобы подаваемая для охлаждения вода полностью перегреваясь, испарялась и подавалась в зону восстановления газификатора 1. Подача перегретого водяного пара в зону восстановления способствует увеличению образования водорода, что повышает в целом энергетический потенциал образующегося синтез-газа. После охлаждения синтез-газ поступает в двигатель внутреннего сгорания 3.

При сжигании газа в двигателе внутреннего сгорания вырабатывается энергия, примерно 60% которой это тепловая составляющая, которая может быть направлена непосредственно для различных промышленных нужд (например, для систем отопления и для нужд горячего водоснабжения), и примерно 30% - это механическая составляющая, которая направляется на привод теплового насоса 4. Тепловой насос, в свою очередь, используется для улова утилизируемой тепловой энергии, например, в процессах сушки, когда требуется осушение сушильного агента. При этом ТН на улов тепловой энергии и возвращение его обратно в технологический процесс затрачивает в 3-5 раз меньше

шую энергию, чем передаваемую. Поэтому можно считать, что эффективность всей системы увеличится в 3 раза, т. е. при потреблении ДВС 10 кВт мы получим тепловую энергию в количестве 15 кВт [3].

Таким образом, предложенный технологический комплекс позволяет уменьшить потребление топливных ресурсов на производство тепловой энергии примерно в 3 раза.

Список литературы

1. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Г. Математическая модель процесса конвективной сушки пиломатериалов в разряженной среде // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2006. № 4. С. 64-71.
2. Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Галяветдинов Н.Р., Иманаев Р.М. Исследование совмещенной сушки-пропитки массивных капиллярно-пористых коллоидных материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2006. № 6. С. 78.
3. Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Оладышкина Н.А., Разумов Е.Ю., Хасаншин Р.Р., Кайнов П.А., Кузьмин И.А., Мазохин М.А., Шайхутдинова А.Р., Ахтямова Т.Н., Воронин А.Е. Способ сушки и термической обработки древесины // патент на изобретение RU2425305 04.03 2010.

УДК 664.871.66.015:621.186.89

**ТЕПЛОВЫЕ И ЭКСПЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СУШЕНЫХ ЯБЛОК И ЯБЛОЧНЫХ ЧИПСОВ
THERMAL AND EXERGY INDICATORS OF THE EQUIPMENT
FOR PRODUCTION OF DRIED APPLES AND APPLE CHIPS**

Г.В. Калашников, Е.В. Литвинов

G.V. Kalashnikov, E.V. Letvynov

*Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Россия, Воронеж*

(e-mail: kagen5@yandex.ru).

Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh

Аннотация: Для различных схем переработки растительного сырья предложено с целью оценки энергетической эффективности разрабатываемых технологий и оборудования, наряду с тепловым и эксергетическим КПД, использовать величины удельных эксергетических затрат и эксерго-экономического показателя. Рассчитана величина эксерго-экономического показателя для разработанной и базовой линии яблочных чипсов. На основе энергетического и эксергетического методов термодинамического анализа выполнена комплексная оценка эффективности ресурсосберегающих технологий для технологических процессов производства сушеных яблок и яблочных чипсов.

Abstract: For various schemes of processing of vegetable raw materials it is offered for the purpose of an assessment of power efficiency of the developed technologies and the equipment, along with thermal and exergy efficiency, to use sizes specific the exergy of expenses and an exergy-economic indicator. The size of an exergy-economic indicator for the developed and basic lines of apple chips is calculated. On the basis of power and exergy methods of the thermodynamic analysis the complex assessment of efficiency of resource-saving technologies for technological processes of production of dried apples and apple chips is executed.

Ключевые слова: ресурсосберегающая технология, яблоки, эксерго-экономический анализ конвективная сушка; СВЧ-сушка.

Keywords: resource-saving technology, apples, exergy-economic analysis the convection drying; microwave drying .

В современных условиях возрастающего потребления энергии все более остро ставятся вопросы рационального её использования, утилизации и рекуперации теплоты во всех технологических процессах при переработке сельскохозяйственного сырья АПК. Существующее оборудование для переработки плодовоовощного сырья отличается низкой тепловой эффективностью и степенью использования потенциала теплоносителя, высокими удельными энергетическими затратами на единицу высушенного продукта [1, 2].

Одним из методов энергетической оценки эффективности использования тепловых потоков является эксергетический анализ, характеризующий качественно изменение теплоты в технологических процессах и особенно теплообменных, что актуально для пищевых производств.

Анализ технологических процессов и оборудования производства пищевых концентратов показал, что основные стадии переработки сырья, оказывающие существенное влияние на величину энерго- и эксергозатрат, связаны с процессами влагопоглощения (гидратация, бланширование, варка и т.д.) и влагоудаления (выпаривание, конвективная и СВЧ сушки), которые ввиду своей энергоемкости определяют себестоимость готовой продукции [1-3].

Целью работы является разработка и адаптация показателя оптимизации для определения степени эффективности технологических режимов различных процессов с влаготепловым воздействием, а также выбора и проектирования оборудования переработки пищевого сырья.

Отмечено, что необходимая для производства сушеных продуктов эксергия расходуется на перемещение влаги внутри продукта (влагоприращение и влагоудаление) с преобразованием веществ и структуры продуктов, а также на покрытие потерь, возникающих вследствие необратимости процессов нагрева и физико-химического изменения веществ продукта, а также воздействия окружающей среды. Полезная эксергия включает эксергию продукта, ее приращения при нагреве и физико-химическом изменении веществ, а также эксергию теплоносителя, используемого на рециркуляции без потерь в окружающую среду [2].

Достижение рациональных технологических режимов влаготепловой обработки растительного сырья и выбор соответствующего эффективного оборудования обуславливается во многом неоднородностью качества исходного сырья (различие вида, сорта, влажности и т.д.), изменением гранулометрического состава и низкой степенью использования энергетического потенциала теплоносителя. Это приводит к снижению пропускной способности оборудования на стадиях производства, способствует повышению продолжительности влаготепловой обработки и дополнительным энергетическим затратам и эксергетическим потерям.

На основе выполненного сравнительного эксергетического анализа изменения эксергетических потоков различных аппаратно-технологических схем переработки растительного сырья (производство фруктовых яблочных чипсов, сушеного плодовоовощного сырья, картофеля, варено-сушеных круп и др.) предложено для оценки энергетической эффективности разрабатываемых технологий и оборудования, наряду с тепловым КПД, использовать величины удельных эксергетических затрат на единицу готового продукта (кДж/т), единицу влагоудаления и влагоприращения (кгДж/(кг·%)), а также эксергетического КПД и эксерго-экономического показателя [2, 3].

Для повышения эксергетического КПД аппаратно-технологических схем переработки растительного сырья эффективно применять энергетические потоки с высокими термодинамическими показателями. Однако при этом накладываются ограничения, обусловленные влиянием температуры теплоносителя на осуществление отдельных стадий схемы и, как следствие, на качество готового продукта. В этой связи ставится задача определения рационального количества теплоты и наименьших эксергетических потерь в контрольной поверхности рабочей камеры проектируемого оборудования с

учетом ограничений, накладываемых на качество продукта.

Для определения эффективных режимов в качестве критерия оптимизации предложено использовать удельные стоимостные ($\Sigma \bar{S}$) влаго-, тепло- и эксергозатраты ($\Sigma \bar{E}$) на единицу изменения массовой доли влаги (ΔG) в продукте

$$K = \frac{\Sigma \bar{A} \cdot \Sigma \bar{S}}{\Sigma \bar{A}_{i \text{ дн}} \cdot \Delta G} \rightarrow \min, \frac{\text{руб}}{\text{кг}}, \quad (1)$$

где $\Sigma \bar{E}_{\text{общ}}$ - суммарные затраты эксергии потоков энерготехнологической системы (ЭТС), которые определяются теплоэнергетическими затратами при влагоперемещении в единицу времени [3].

Для достижения термодинамического совершенства машинно-аппаратурных схем производства сушеных яблок и яблочных чипсов необходимо обеспечение технологической обработки в соответствии с кинетическими закономерностями процесса [4-6]. Величина эксерго-экономического показателя, отражающего рациональные режимы влаготеплового воздействия при переработке плодов на основе кинетики сушки и вычисленная по формуле (1), составляет для разработанной линии яблочных чипсов на основе комбинированной конвективно-СВЧ-сушки

$K = 0,7158 \cdot 10^{-3} \text{ руб} / (\text{кг влаги} \cdot \text{кг исход. сырья})$, а для базового варианта – линии с туннельной сушилкой $K = 97,39 \cdot 10^{-3} \text{ руб} / (\text{кг влаги} \cdot \text{кг исход. сырья})$ при соизмеримых удельных эксергозатратах эксергозатратах [7].

На основе энергетического и эксергетического методов термодинамического анализа с использованием термодинамических КПД и предложенных удельных эксергетических показателей выполнена комплексная оценка эффективности ресурсосберегающих технологий по составленным методикам для технологических процессов производства сушеных яблок и яблочных чипсов, что позволило определить наиболее слабые, по использованию теплоты, технологические участки производства и предложить пути повышения эффективности использования теплоносителя [4, 5, 7].

Список литературы

1. Калашников Г.В., Остриков А.Н. Ресурсосберегающие технологии пищевых концентратов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. 355 с.
2. Калашников, Г. В. Развитие процессов влаготепловой обработки пищевого растительного сырья (теория, технология и техника) [Текст]. - Дисс... докт. техн. наук, Воронеж, 2004. – 365 с.
3. Калашников Г.В. Анализ эксергетических затрат влаготепловой обработки картофеля, круп и овощей при производстве пищевого концентрата // Вестник ВГТА. 2006. № 11. С. 51-60.
4. Калашников Г.В., Литвинов Е.В. Оценка тепловой эффективности технологической схемы производства яблочных чипсов и сушеных плодов // Вестник ВГУИТ. 2014. № 3. С. 11-17.
5. Калашников, Г.В., Литвинов, Е.В. Тепловой анализ ресурсосберегающей линии производства фруктовых чипсов [Текст] / Воронеж: Вестник ВГУИТ, № 4 (62), Серия «Процессы и аппараты пищевых производств».- 2014.- С. 12-16.
6. Калашников Г.В., Литвинов Е.В. Кинетика СВЧ – сушки яблок // Вестник ВГУИТ. 2012. № 2. С. 40-42.
7. Калашников, Г.В., Литвинов, Е.В. Эксерго-экономическая оценка энергетических затрат оборудования сушки и влаготепловой обработки сырья [Текст] / Сборник трудов V Международного научно-технического симпозиума «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) - СЭТТ-2014». Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Т.1. - Иванов: Изд-во ФГОУВПО «ИГХТУ», 2014.– С. 136-139.

УДК 674.047

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СУШИЛЬНЫХ КАМЕР
С ГОРИЗОНТАЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ
СУШИЛЬНОГО АГЕНТА
IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE DRYING CHAMBER
WITH THE DRYING AGENT
A HORIZONTAL-TRANSVERSE CIRCULATION**

Александр Николаевич Чемоданов*, Павел Евгеньевич Царев
Aleksandr Nikolaevich Chemodanov*, Pavel Evgenyevich Tsarev****

**Поволжский государственный технологический университет
Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина 3, 162, индекс 424000
(ChemodanovAN@volgatech.net)*

***Поволжский государственный технологический университет
Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина 3, 006, индекс 424000
(TsPavel@mail.ru)
Volga State University of Technology
3 Lenin sq., Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, Russian Federation, 424000.*

Аннотация: Статья раскрывает возможности повышения эффективности работы сушильных камер, отмечает необходимость разработки новых технических и технологических решений.

Abstract: The article reveals the possibility of the drying chambers increasing efficiency, the need to develop new technical process solutions.

Ключевые слова: сушка древесины, энергия сушки, применяемое оборудование.

Key words: lumber drying, energy drying, applying equipment.

Для оптимизации процессов сушки лесоматериалов сегодня можно рассматривать два принципиально самостоятельных направления. Первое – дальнейшее совершенствование находящихся в эксплуатации сушильных камер. Критерием оптимальности этих камер может быть энергоемкость процесса сушки лесоматериалов в кВт*ч/м³. Как правило, процесс сушки древесины заключается в удаление находящейся в ней влаги посредством ее испарения. Известно что на испарение 1 кг воды требуется 0,66 кВт*ч тепловой энергии. Мы можем последовательно приближаться к этому значению. Для этого необходимо знать влияние технологических и конструктивных параметров на энергоемкость процесса сушки и производительность сушильной камеры. Эти параметры можно разделить на следующие группы [1,2]:

Конструкция и размеры штабеля лесоматериалов: тип штабеля, способ укладки, коэффициент полнотесноты, размеры лесоматериалов и прокладок;

Параметры сушильного агента в камере: скорость и напор воздушного потока, характер циркуляции потока в камере и через штабель, реверсирование потока в камере;

Состояние воздушной среды в камере: температура сушильного агента, психометрическая разность, степень насыщенности среды.

Оптимизируя производительность сушильной камеры и энергоемкость ее работы совершенствованием технологических и конструктивных параметров мы будем приближаться к требуемой величине тепловой энергии на испарение 1 кг. воды. Сушильные камеры с горизонтально-поперечной циркуляцией сушильного агента конструкции ПГТУ по патенту РФ №93950 имеют энергоемкость 35-40 кВт*ч/м³ затрат электро-энергии, что в 2-5 раз меньше чем у камер аналогичного типа. Можно сделать заключение что дальнейшее совершенствование конструктивных и технологических параметров сушильной установки вряд ли принесет значимые результаты.

Между тем эффективность сушки лесоматериалов остается для страны важнейшей проблемой. Современная промышленная сушка является отраслью, имеющая большое значение в лесопромышленных и деревоперерабатывающих производствах.

Современная и качественная сушка увеличивает срок службы деревянных конструкций и изделий, сокращает расходы и перерасход сырья. Т.к. процесс сушки древесины заключается в удалении влаги из материала путем ее испарения, а каждый кубический метр свежесрубленной древесины содержит до 300-400 кг. воды, на испарение 1 кг. которой требуется 0,66 кВт*ч тепловой энергии. С учетом сокращения ресурсов энергоносителей становится очевидной значимость повышения эффективности сушки лесоматериалов. Например для республики Марий Эл (РМЭ) при годовом объеме заготовки 1200 тыс. кубических метров древесины, повышение эффективности сушки только на 1 % позволит сэкономить в год 1620*106 кВт*ч тепловой энергии. В перерасчете на сухие березовые дрова с теплотворной способностью 3620 кВт*ч/м³ это составит 125 железнодорожных составов по 60 вагонов с дровами в каждом.

Отсюда можно сделать вывод, что наиболее предпочтительно второе направление - повышение эффективности сушки, ориентированное на разработку новых способов сушки, исследования новых физических решений.

В этом плане в ПГТУ сложилось новое направление сушки лесоматериалов с использованием энергии СВЧ полей. Получено несколько патентов, созданы действующие физические модели установок, эксперименты показывают высокую эффективность СВЧ сушки лесоматериалов и перспективность этого направления [3,4]. Достоинства: возможность сушки крупномерных (бревна, брусья) лесоматериалов, отсутствие повреждения лесоматериалов (микротрещин, коробления, изменение цвета), относительно невысокая энергоемкость сушки.

Общепринятые сегодня тенденции совершенствования технологических процессов и используемого оборудования, направленные на оптимизацию их технологических и конструктивных параметров требуют пересмотра. Особенно это касается энергоемких производств, требующих серьезных результатов и в кратчайшие сроки. В деревообработке - это гидротермическая обработка древесины, требующая значительных затрат как тепловой, так и электрической энергии.

Более перспективным в этом отношении новые, так называемые «прорывные» технологии, созданные, как правило, на стыке наук, формирующие высокоэффективные направления развития. К их числу относятся технологии деревообработки, связанные с использованием СВЧ – энергии. Экспериментальные исследования с использованием методов физического моделирования показали перспективность использования СВЧ полей для сушки крупномерных лесоматериалов для деревянного домостроения, сушки строганного шпона, защиты древесины от повреждения вредителями при ее длительном хранении.

Список литературы

1. Чемоданов А.Н. Эффективность сушки лесоматериалов в сушильных камерах / Science and World. 2014. №1. С. 131-135.
2. Чемоданов А.Н. Проблемы сушки лесоматериалов / Science and World. 2014. №1. С. 131-135.
3. Патент № 2531709. РФ, СВЧ - КАМЕРА ДЛЯ СУШКИ ШПОНА / Чемоданов Александр Николаевич, Инородцева Наталья Анатольевна, Митрофанова Ольга Викторовна / F26B9/06 (2006.01), F26B3/347 (2006.01) – № 2013130475/06; заявл. 02.07.2013; опубл. 27.10.2014.
4. Патент № 2011128515. РФ, СВЧ-ВАКУУМНАЯ КАМЕРА ДЛЯ СУШКИ ОЦИЛИНДРОВАННЫХ БРЕВЕН / Чемоданов Александр Николаевич, Галимов Айрат Васильевич, Михайлов Александр Юрьевич / МПК F26B3/347 (2006.01), – № 2011128515/06; заявл. 08.07.2011; опубл. 20.01.2013.

УДК625.142.2

**ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СУШКИ
И УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ
THE POWER - AND RESOURCE- SAVING TECHNOLOGIES OF DRYING AND
UTILIZATION OF THE FULFILLED WOODEN CROSS TIES**

Д.В. Тунцев, М.Р. Хайруллина, А.С. Савельев, И.С. Романчева

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань, (e-mail: tuncev_d@mail.ru)*

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань, (e-mail: 09111991m@gmail.com)*

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань, (e-mail: sowells@mail.ru)*

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань, (e-mail: romancheva.irina@inbox.ru)*

Аннотация: В работе рассмотрены наиболее распространенные термические методы сушки и утилизации отработанных деревянных шпал, которые содержат в своем составе органические соединения, обладающие высокой летучестью, токсичными, канцерогенными свойствами.

Abstract: In work the most widespread thermal methods of drying and utilization of the fulfilled wooden cross ties which contain the organic compounds possessing a high volatility, toxic, cancerogenic properties in the structure are considered.

Ключевые слова: деревянные шпалы, сжигание, газификация, пиролиз.

Keywords: wooden cross ties, burning, gasification, pyrolysis.

На фоне ухудшающейся экологической обстановки в стране разработка ресурсосберегающих и экологически обоснованных технологии утилизации отходов [1] транспортной отрасли является актуальной задачей.

Шпалы - это элементы железнодорожных путей, предназначенные для обеспечения постоянства ширины колеи, передачи нагрузки от рельсов на балластную подушку и закрепления пути на дорожном полотне. Материалом для их изготовления служит древесина, железобетон, металлы и полимеры. В настоящее время до 75% железнодорожных путей на территории России и ближнего зарубежья проложено с использованием деревянных шпал (ДШ). Срок службы ДШ от 7 до 40 лет, продолжительность которого зависит от типа исходной древесины, условий и интенсивности эксплуатации. Для увеличения срока службы шпалы пропитывают антисептическими средствами (каменноугольное масло, термokatалитическая жидкость и т. д.).

Данные антисептики содержат в своем составе органические соединения, обладающие высокой летучестью, токсичными, канцерогенными свойствами. Примерный компонентный состав отходов железнодорожных шпал, пропитанных антисептиками (паспорт опасного отхода): целлюлоза – 80,0%, масло сланцевое – 8,2%, вода – 1,5%, бензол – 0,1%, толуол – 0,1%, фенол – 0,1%, кремнезем (SiO₂) - 6,0%, глинозем (Al₂O₃) - 4,0%. Эти соединения способны вызвать тяжелые отравления у людей и появление онкологических заболеваний [2].

В связи с этим разработка ресурсосберегающую и экологически обоснованную технологию утилизации отработанных деревянных шпалах является актуальной задачей.

Наиболее распространенными промышленными способами утилизации твердых органических отходов являются термические методы: сжигание, газификация и пиролиз [3].

Пиролиз - это термическое разложение органических соединений под действием умеренных температур в герметичных установках при отсутствии окислительной среды. В результате процесса пиролиза образуются твердые, жидкие и газообразные продукты. Твердый продукт процесса пиролиза – это углистое вещество, остающееся в камере сгорания [4]. Совместно выделяются жидкие и газообразные продукты, образуя сложную парогазовую смесь (ПГС). При последующем охлаждении и очистке разделяется ПГС на жидкий дистиллят и неконденсируемые газы [5]. Правильная организация технологического процесса данного метода утилизации позволяет покрыть энергетические потребности процесса. Избытки вырабатываемого тепла можно использовать в технических или бытовых нуждах. Повышать экономическую эффективность можно реализацией жидких и твердых продуктов, которые могут быть широко использованы в промышленности. И с экологической точки зрения пиролиз является более интересными и перспективным методом для утилизации органических отходов, так как осуществляется он в герметичных условиях и количество образующихся при этом газов намного меньше, чем при сжигании и газификации.

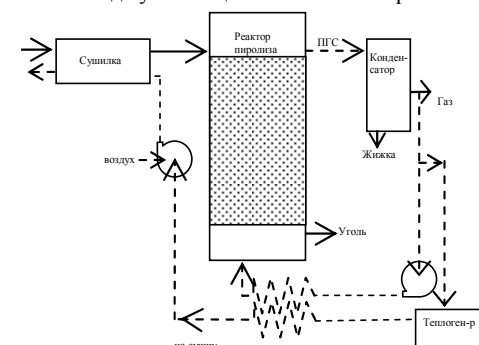


Рис. 1 - Схема утилизации ОДШ

По своей сути процесс термического разложения отработанных деревянных шпал сходен с процессом пиролиза древесины. Это объясняется тем, что ОДШ на 87,5% состоят из древесины.

Происходит утилизация ОДШ следующим образом: сырьё измельчается, затем прогревается и высушивается топочными газами в сушилке при температуре 80°C, откуда поступает в реактор пиролиза, где осуществляется дальнейший прогрев и термическое разложение нагретыми в теплообменнике рециркуляционными газами.

В результате процесса термического разложения образуются уголь и парогазовая смесь. Последняя, проходя через конденсатор, частично конденсируется с выделением компонентов каменноугольного масла, которые отводятся в виде конечного продукта представляющего собой соединения каменноугольного масла. На выходе из конденсатора неконденсирующиеся газы делятся на два потока: часть газов идет на сжигание в теплогенератор; другая же часть, нагнетается газодувкой через теплообменник в реактор, обеспечивая внутренний прогрев и термическое разложение сырья.

На базе кафедры переработки древесных материалов ведется работа по разработке технологической схемы переработки отработанных деревянных шпал методом быстрого пиролиза.

Список литературы:

1. Сафин, Р.Г. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов [Текст]/ Р.Г. Сафин, В.В. Степанов, Э.Р. Хайруллина, А.А. Гайнуллина, Т.О. Степанова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. – Т. 17. – №20. – С. 123-128.
2. Тунцев, Д.В. Ресурсосбережение при утилизации отработанных деревянных шпал [Текст]/ Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, Р.Г. Хисматов, М.Р. Хайруллина, Э.Е. Антипова, И.Ф. Гараева // Вестник Казанского технологического университета. 2015. – Т. 18. – № 5. – С. 248-250.

3. Тимербаев, Н.Ф. Утилизация твердых отходов деревопереработки, содержащих токсичные вещества [Текст]/ Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Сатарова // Вестник Казанского технологического университета. 2011. – №4. – С.79-84.

4. Хисматов, Р.Г. Установка переработки низкокачественной древесины в уголь [Текст]/ Р.Г. Хисматов, Е.В. Хисматова, Д.В. Тунцев, М.Р. Хайруллина, А.С. Савельев, И.С. Романчева // Вестник Казанского технологического университета. 2014. – Т. 17. – №22. – С.297-300.

5. Тунцев, Д.В. Схема контактного пиролиза отходов лесозаготовки [Текст]/ Д.В. Тунцев, Р.Г. Хисматов, А.М. Касимов, И.С. Романчева, А.С. Савельев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. – № 2-3 (7-3). – С. 146-149.

УДК 62.69

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЭФФЕКТОВ ЭНЕРГОСЕРВИСНОГО Контракта для образовательных бюджетных учреждений
THE COMPLEX TECHNIQUE OF CALCULATION OF THE EFFECTS OF ENERGY SERVICE CONTRACT FOR MUNICIPAL EDUCATIONAL INSTITUTIONS

С.В. Гужов
S.V.Guzhov

"Национальный исследовательский университет "МЭИ", Россия, Москва
(GuzhovSV@yandex.ru)

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, Moscow

Аннотация. Внедрение такого механизма государственно-частного партнёрства, как энергосервисные контракты, сталкивается в России с рядом сложностей. В статье рассмотрены проблемы связанные с верификацией технологического эффекта, экономического эффекта. Показаны индикаторы социальных эффектов. Дано описание существующих методик верификации технологического эффекта, описана разработанная методика. Показано сравнение описанных методик. Показано преимущество разработанной отечественной методики верификации данных на примере технико-экономических расчётов для существующего объекта.

Abstract. The introduction of such a mechanism of public-private partnerships energy service contracts, facing in Russia with a number of difficulties. The article considers the problems associated with verification of the technical effect, economic effect. Shown indicators of social effects. A description is given of the existing methods of verification of the technical effect described by the developed method. Shows a comparison of the described methods. The advantage of developed domestic methods data verification on the example of technical and economic calculations for the existing facility.

Ключевые слова: энергосбережение; методика верификации данных; функция состояния качества жизни; технологический эффект; корректировка к стандартным условиям; доверительный интервал.

Keywords: energy saving; method of verification data; a function of state of quality of life; technological effect; correction to standard conditions; confidence interval.

Энергосбережение в бюджетном секторе – одна из приоритетных задач для Российской Федерации. основообразующим законом данной сферы является 261-ФЗ «Об энергосбережении...», для субъекта РФ – г.Москвы - используется Закон г. Москвы от 05.07.2006 N 35 "Об энергосбережении в городе Москве". Каждый орган, в т.ч. исполнительной власти субъекта РФ, в рамках Гос. Задания реализует «Подпрограммы энер-

госбережения...». Основным механизмом менеджмента вовлечения частных организаций является договор на оказание энергосервисных услуг (энергосервисный контракт).

В реализации энергосервисного контракта (ЭСК) выделяют стороны:

1. Инициатор - орган государственной власти, имеющий право распределять бюджетные ассигнования;

2. Заказчик - орган исполнительной власти;

3. Исполнитель - организация, осуществляющая ЭСК;

4. Инвестор - банк, оказывающий Исполнителю услуги по обеспечению доп. объём денежных средств;

5. Потребитель - группы людей, пользующиеся достигнутыми улучшениями в процессе выполнения своих непосредственных обязанностей.

6. Эксперт – независимая организация, выполняющая функцию привлеченного специалиста для решения споров о соблюдении условий энергосервисного контракта, объёмов выплат и пр.

В рамках бюджетных организаций Пользователями могут являться, например, обучающиеся и их родители. Представители перечисленных заинтересованных сторон имеют разные индикаторы отношения к результатам ЭСК. Проведённый анализ и опросы показали следующие приоритетные для обучаемых и их родителей аспекты инноваций и нововведений в образовательных учреждениях (в порядке убывания важности):

Степень здоровья сбережения улучшений (влияние на слух, зрение, осанку, обоняние и осязание, гармоничное развитие личности, адаптированность для возраста и т.п.);

Степень безопасности улучшений (травматическая безопасность, вандалостойкость, применение экологически и физиологически безопасных материалов, пожаробезопасность и т.п.);

Степень экологичности улучшений (безопасность утилизации и длительной эксплуатации и т.п.);

Степень энергетической эффективности улучшений (насколько новое оборудование потребляет ресурсов меньше, чем предыдущее);

Экономические показатели (снижение нагрузки на бюджет ГРБС);

Соответствие социальной политике города (решения не должны приводить к уменьшению рабочих мест, снижению ЗП, к ухудшению условий работы и т.п.);

Повышение качества жизни населения и средней заработной платы специалистов затронутых производств;

Улучшение условий быта и труда затронутых групп населения;

Снижение криминогенности на территории затронутых объектов;

Повышение социальной стабильности;

Степень удобства и комфорта деятельности монтирующей и эксплуатирующей организации;

Необратимость изменений основных фондов организации, (возможность восстановления состояния фондов до исходного уровня).

I Социальная эффективность и методика расчёта соответствующих индикаторов, актуальных для Потребителя, обладают комплексностью, ярко выраженной социальной направленностью, малой корреляцией с экономическими показателями проекта. При обработке большого объёма первичных данных используется математический аппарат, позволяющий учитывать степень размытости и неопределённости исходной информации, из теории нечетких множеств [1], [2], [3], [4]. Выражается метод функцией состояния качества жизни: В оценке социального эффекта инновационных процессов используется метод векторной оптимизации оценки качества жизни по периодам вхождения новшеств в оборот через отслеживание и измерение изменения значения функции состояния качества жизни [5, Глава 2, п. 7]:

$$K1_{1..n} = f1(x1...xm) = f(x1(n-1) + \Delta x1(n) ... xm(n-1) + \Delta xm(n)), \text{ где} \quad (1)$$

$K1_{1..n}$ - показатель уровня качества жизни по функциям $1...n$;

f_1, f_2, f_n – функции качества жизни, последовательно включаемых в оборот инновационных процессов;

$x_1 \dots x_m$ – показатели векторов (социальных результатов), отражающие показатели качества жизни по функциям ($i \dots n$);

$\Delta x_1 \dots \Delta x_m$ – величина приращения векторов по функциям $1 \dots n$.

II Экономическая эффективность инвестиционных мероприятий, организованных в рамках энергосервисного контракта для сторон 1-4, оцениваются на основе существующих российских и мировых методик, проработанных в середине-конце XX-го века.

В настоящее время существует несколько методов оценки экономической эффективности проекта с учётом изменения стоимости денежных средств, которыми пользуются в Европе и США.

Чистый доход за счет экономии энергоресурсов за весь период эксплуатации энергосберегающих мероприятий.

В условиях монополии рынка энергосберегающих мероприятий и энергосервисных услуг, развитие инфраструктуры бюджетных организаций возможно обеспечить за счет согласования интересов Потребителей и Заказчиков и Исполнителей энергосберегающих услуг. В литературе [6] предлагается в качестве критерия экономической оценки эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий можно принять интегральный эффект, (чистый дисконтированный доход за расчетный период), который определяется по выражению:

$$\mathcal{E}_{ин} = \sum_{t=0}^T \frac{(R_t - Z_t)}{(1 + E_t)^t}, \text{ где} \quad (2)$$

T – горизонт расчёта;

t – номер шага расчёта;

R_t – результаты (принимаются сэкономленные затраты), достигаемые на t -ом шаге расчёта;

Z_t – затраты, связанные с реализацией энергосберегающих мероприятий на t -ом шаге расчёта;

E_t – норма дисконта на t -ом шаге расчёта.

Расчет текущей стоимости ежегодной экономии - PV :

$$PV_{AS} = \sum_{t=1}^{T_0} PV_t = \sum_{t=1}^{T_0} \frac{AS_t}{(1+r)^t}, \text{ где} \quad (3)$$

PV_{AS} – текущая стоимость годовых сбережений

T_0 – общее кол-во лет в анализе. Принимаем для анализа $T_0=5$ лет.

AS_t – годовая экономия в год t .

Расчет текущей стоимости инвестиций:

Инвестиции последнего года – это затраты на вывод из эксплуатации (если есть) минус остаточная стоимость оборудования.

$$PV_I = \sum_{t=1}^{T_0} PV_t = \sum_{t=1}^{T_0} \frac{\text{инвестиции}_t}{(1+r)^t}, \text{ где} \quad (4)$$

PV_I – текущая стоимость инвестиций

I_t – инвестиции в год t

Расчет чистой текущей стоимости (чистого дисконтированного дохода) - NPV чистый дисконтированный доход (ЧДД), чистая приведенная (или чистая современная) стоимость, интегральный эффект, Net Present Value (NPV) [6]:

$$NPV = PV_{AS} - PVI, \text{ где} \quad (5)$$

Если $NPV > 0$, то проект – рентабелен (экономически целесообразен).

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t}, \text{ где} \quad (6)$$

B – доходы;

C – затраты;

i – процентная ставка;

t – период.

Расчет нормы прибыли (индекс доходности) (SIR) [6]:

$$SIR = \frac{PV_{AS}}{PV_I}$$

(7) SIR показывает относительную целесообразность проекта, выраженную в процентах. Если $SIR > 1.0$, то проект принесет больше денег, чем на него потрачено.

Расчет внутренней нормы прибыли (внутренней нормы доходности) (ВНД), Internal Rate of Return (IRR). Смысл IRR состоит в определении максимальной ставки платы за привлеченные источники финансирования, при которой проект остается безубыточным. IRR – это гипотетическая процентная ставка, при которой $SIR = 1.0$ или $NPV = 0$. Если $IRR \geq$ процентной ставки в анализе, то инвестиции оправданы (экономически целесообразны).

В случае заключения ЭСК основная задача состоит в выборе лучшего энергосберегающего мероприятия из нескольких предложений. Решение об инвестировании проекта должно приниматься с учетом знания всех критериев и интересов всех участников инвестиционного проекта. Анализ методов социальной, технической, экономической оценки эффективности инвестиций и их влияние на отбор проектов показан в Таблице 1 [5], [4].

Таблица 1. Анализ методов оценки эффективности инвестиций в условиях рынка

Число проектов	Ограничения по инвестициям	Критерии отбора
Один	Нет	$IRR > r, NPV > 0, SIR > 1$
Несколько	Нет	$IRR > r, NPV > 0, SIR > 1$
	Есть	$SIR > 1$, ранжирование по степени снижения SIR

Расчитав указанные показатели для нескольких взаимоисключающих ЭСМ, Заказчик с разрешения Инициатора выбирает наиболее выгодный проект. В дальнейшем используется «Комплексная методика расчёта индексов потребительского менеджмента в сопоставимых условиях», разработанная в НИУ «МЭИ».

III Технологическая эффективность от внедрения энергосберегающих мероприятий рассчитывается в настоящее время практически индивидуально, в ручном режиме. Реализация настоящего расчёта происходит с использованием методик определения сопоставимых условий, разработанная для российских условий. Подобные нормативные документы разработаны также и для определения экономического эффекта в странах Европы.

Расчёт с целью актуализации объемов потребления каждого вида энергетического ресурса в натуральном и финансовом выражении относительно момента до реализации Исполнителем определенного ЭСКО перечня энергосберегающих мероприятий (ЭСМ), направленных на повышение энергетической эффективности, называется определением базового уровня.

Описываемая в документах оценка предусматривает определение технического эффекта при снижении потребления энергоресурса от начального уровня, определённого до внедрения ЭСМ, до уровня энергопотребления после установки энергосберегающего оборудования (рис. 1). В качестве объекта в примере взято здание бассейна общей площадью 2 тыс.кв.м. ЭСМ – комплекс мероприятий по подготовки горячего воды

(ГВС), рециркуляции низкопотенциального тепла влажных вентиляционных выбросов из пом. чаши бассейна, установке устройств автоматического отключения горячей и холодной (ХВС) по времени в душевых и иных мероприятиях, оптимизирующих расход тепловой энергии (ТЭ). Рассматриваемое здание бассейна до модернизации считалось достаточно энергоэффективным. Однако предварительная оценка технологического потенциала энергосбережения показала возможность снижения затрат ТЭ на 31%. Практика подтвердила оцененное значение.

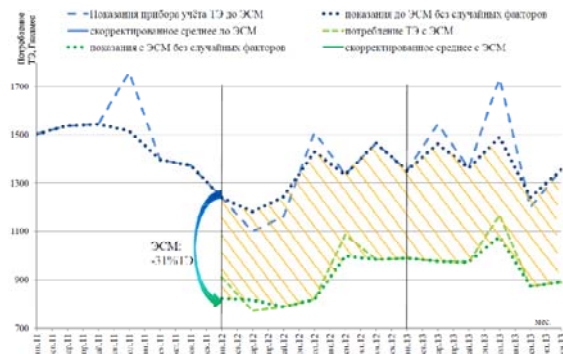


Рисунок 1. Простейший способ определения экономии от ЭСМ.

Описываемая в российских документах последовательность определения технического эффекта достаточно проста:

Определить ежемесячное потребление энергоресурса (на рис. 1 – потребление ТЭ) до и после реализации энергосберегающих мероприятий (штриховые линии);

Для обоих случаев устранить случайные факторы и привести потребление ТЭ к базовому уровню момента до ЭСМ (пунктирные графики);

Площадь между графиками, рассчитанными в сопоставимых условиях, (оранжевая штриховка) есть технологический эффект от ЭСМ;

Пересчёт технологического эффекта для каждого месяца с учётом тарифов на ТЭ позволит рассчитать ежемесячный объём платежей в пользу ЭСК.

Такой подход имеет вполне определённые преимущества и недостатки. К преимуществам можно отнести такие факторы как:

относительная простота и малое время расчёта;

небольшое количество исходных данных для расчёта в сопоставимых условиях;

К недостаткам:

методика не может быть использован для «абстрактного» здания, поскольку требует множества дополнительной информации по инженерным системам и их изменениям;

методика не учитывает такие разовые случайные расходы энергоресурса, как утечки, аварии, влажная генеральная уборка, остановку здания на плановый ремонт, ежегодная полная замену воды в чаше бассейна по СанПин и пр.

методика не учитывает погрешность приборов учёта;

необходимо не только качественно, но и количественно знать объёмы дополнительных затрат ТЭ, текущих изменений, ремонтов, графиков использования ТЭ;

методика не учитывает фактов плановых отключений ГВС и ХВС и связанное с ними существенное месячное изменение потребления ТЭ;

методика не использует экономические критерии. Например, для расчёта дисконтированного срока окупаемости необходимо использовать дополнительные формулы.

Приведённый способ наиболее удобен для краткосрочных и технологически несложно оцениваемых ЭСМ, реализуемых в малых и средних зданиях. В случае дли-

тельного расчёта или модернизации большой и сложной инженерной системы велика вероятность возникновения значительной ошибки, что приведёт к недопустимой для сторон договора погрешности при осуществлении финансовых расчётов.

С целью нивелирования перечисленных недостатков случаев необходимо предварительно произвести отсев показаний, несущих в себе заранее известные нетиповые случаи. Одновременно с этим возникает вопрос о минимально необходимом числе экспериментов на действующем здании в условиях современного рынка энергосберегающих услуг.

В случае тестовых испытаний длительностью в 2 недели, выявляются 10 измерений, позволяющие рассчитывать данные с уровнем достоверности 95%.

Результатом приведённого анализа является выявленный диапазон показаний приборов учёта энергоресурсов, который подлежит исследованию для выявления базовой линии. При определении базовой линии практически для любого вида потребляемых зданием энергетических и водных ресурсов необходимо опираться на диапазон количества снятых показаний приборов учёта от 5 до 18. Очевидно, что даже в наиболее благоприятном случае расчёта, 18 измерений недостаточно для определения базовой линии с точностью хотя бы $\pm 10\%$. Что означает и колебания суммы платежа в пользу ЭСК в аналогичных пределах, что недопустимо для Исполнителя энергосервисного контракта.



Рисунок 2. Определение экономии от ЭСМ с учётом погрешностей.

Необходимо отметить, что погрешностью уже обладают даже данные, сняты по показаниям прибора учёта энергоресурса. Даная погрешность обуславливается классом точности счётчика. Класс точности прибора учёта тепловой энергии, используемый в рассматриваемом здании, составляет 5%, т.е. погрешность при работе в паспортных условиях счётчик не превышает значение $\pm 5\%$. В погрешность первичных данных также вносит вклад: точность в периодичности снятия показаний, показатели качества энергоносителя, непредвиденные ситуации и сбои в подаче энергоносителя и пр. Основываясь на снятых показаниях и оцененных погрешностях, с определённой долей достоверности можно говорить о диапазоне первичных значений (рис. 2, штриховые линии), математическим ожиданием данного диапазона будет искомым график снятых показаний счётчика (рис. 2, синяя пунктирная линия).

Общая методология при определении базового уровня включает:

«стандартную корректировку к фиксированным условиям», учитывающую известные, «плановые» дестабилизирующие расчёт данные;

«нестандартную корректировку к фиксированным условиям», учитывающую случайные, экстренные, непрогнозируемые факторы. А также факторы, участие которых в расчёте было не учтено.

Аналогичный механизм используется и при определении диапазоне значений ресурсопотребления после внедрения ЭСМ (рис. 2, штрихпунктирные линии). Очевидно, что случайных факторов во второй части расчёта будет больше. Диапазон значений, рассчитанный с той же достоверностью, что и в первой части расчёта, будет больше.

Общая формула нормализованной экономии:

Нормализованная экономия =

= (базовое потребление энергетических ресурсов \pm Стандартная корректировка к фиксированным условиям \pm Нестандартная корректировка к фиксированным условиям) - (потребление энергетических ресурсов за отчетный период \pm \pm Стандартная корректировка к фиксированным условиям \pm \pm Нестандартная корректировка к фиксированным условиям).

Очевидно, что приведённая формула наиболее полно позволяет учесть возможные дестабилизирующие расчёт факторы. Вместе с тем, использование уточнённой методики требует применение математического аппарата, основанного на законах распределения вероятностей непрерывных случайных величин. Сложность такого подхода состоит в том, что при малых выборках (до 30 измерений) стандартное и наиболее удобное предположение о замене выборки на нормальное распределение приводит к неоправданному сужению доверительного интервала. Например, при малых выборках доверительный интервал в случае использования функции Лапласа будет уже на 44%, чем результат, рассчитанный по распределению Стьюдента.

Точность прогнозной модели, созданной на основе «Комплексная методика расчёта индексов потребительского менеджмента в сопоставимых условиях», составляет $\pm 7\%$. Поскольку погрешность прибора учёта тепловой энергии составляет $\pm 5\%$, и достигнутая при расчёте погрешность складывается из погрешности математической модели и погрешности исходных данных, равных погрешности прибора учёта, можно говорить о точности математической модели не превышающей для рассматриваемого примера пределов $\pm 2\%$. Такой уровень точности соответствует не только хорошим инженерным расчётам, но и вполне пригоден для осуществления финансовых калкуляций.

Для примера рассмотрим зависимость объёмов платежа по энергосервисному контракту как функцию от достигаемой точности расчёта (табл. 2).

Таблица 2. Функция величины экономического эффекта от точности расчёта.

№	Наименование методики	Достижимая в расчёте точность, %	Погрешность в натуральных показателях, Гкал/мес.	Погрешность в финансовых показателях, тыс.руб./мес.
	Методика, использующая индуктивный метод описания здания и его инженерных систем	$\approx \pm 20\%$	$\approx \pm 25$	$\approx \pm 40$
	Методика, использующая дедуктивно-индуктивный метод описания работы инженерной системы с учётом стандартных и нестандартных корректировок к режимам работы	$\approx \pm 12\%$	$\approx \pm 15$	$\approx \pm 23,5$
	«Комплексная методика расчёта индексов потребительского менеджмента в сопоставимых условиях»	$\approx \pm 2 \div 4\%$	$\approx \pm 2,5 \div 5,0$	$\approx \pm 4 \div 8$

Аналогичную информацию можно показать графически (рис. 3).

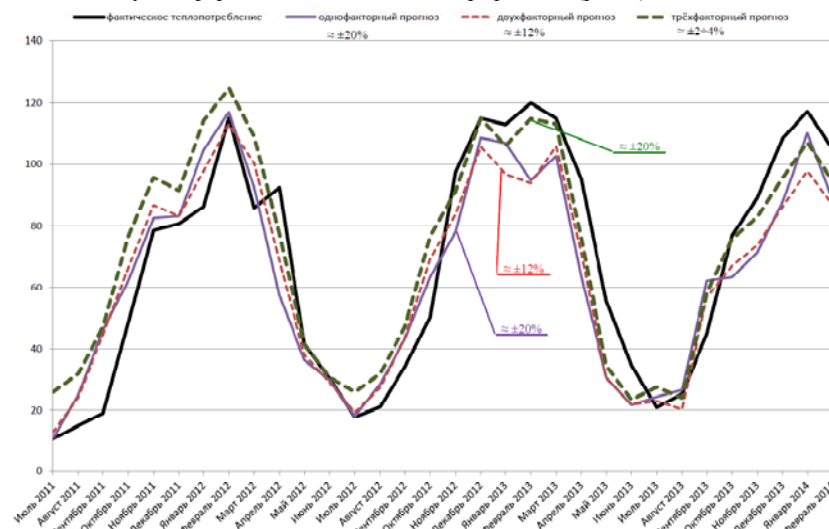


Рисунок 3. Точности расчётных моделей для теплотребления здания бассейна.

Учитывая факт показанной величины экономии (31%), ни первая, ни вторая методики, основанные на математических аппаратах индуктивного описания инженерных систем здания, не подходят для определения технологического и экономического эффекта ЭСМ в силу их существенной погрешности ($\pm 20\%$ и $\pm 12\%$ соответственно). Точность данных методик возможно повысить путём увеличения детализации и глубины проработки моделей, что связано с существенным увеличением трудозатрат. Для выполнения данной задачи также потребуются существенное число дополнительной информации о здании и измерений, что часто не возможно на практике. Напротив третья «Комплексная методика расчёта индексов потребительского менеджмента в сопоставимых условиях», опираясь на стандартные исходные данные обладает существенным преимуществом в точности. Финансовое выражение диапазона неопределённости экономического эффекта, а значит и рисков энергосервисной компании, невелико не только в относительном, но и в экономическом выражении.

«Комплексная методика расчёта индексов потребительского менеджмента в сопоставимых условиях» является предпочтительной для использования энергосервисными компаниями.

Показанная методика может быть также использована в качестве инструмента при решении споров Исполнителя и Заказчика энергосервисного контракта об определении уточненного объёма достигнутого технологического эффекта от энергосберегающего мероприятия и определения объёмов ежемесячных отчислений в счёт погашения затрат на реализацию энергосервисного контракта.

Список литературы

1. Недосекин А.О. Нечетко-множественный анализ рисков фондовых инвестиций. — СПб, Типография «Сезам», 2002. — 181 с.
2. Недосекин А.О. Управление продажами нового товара с использованием нечетко-множественных описаний// Управление продажами. — 2004, №3. с.с. 16 - 25.
3. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. Пособие для бакалавров / В.Е. Гмурман. — 12-е изд. — М.: Издательство Юрайт, 2013. — 479 с.: ил.

4. А. А. Михалевич. Энергоэффективность экономики и энергетическая безопасность. Материалы Международной научно- практической конференции : Энергоэффективные технологии. Мн., 2010. 260 - Leon Freris, David Infield Renewable energy in power systems, John Wiley&Sons Ltd, 2008.

5. Грачёва Наталья Викторовна. Методология управления развитием инновационной деятельности в промышленности в условиях модернизируемой экономики. АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени доктора экономических наук. Санкт-Петербург – 2012;

6. Шкрет А.Ф., Методические особенности оценки экономической эффективности энергосберегающих мероприятий. Материалы Четвертой Российской научно-технической конференции “Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности”, Ульяновск, 24-25 апреля 2003 г. ОЭП СНЦ РАН.

УДК 674.047.3

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ
ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ
В СРЕДЕ НАСЫЩЕННОГО ПАРА
DEVELOPMENT OF THE ENERGY-SAVING TECHNOLOGY OF THERMAL
MODIFICATION OF WOOD IN SATURATED STEAM**

**Айгуль Р. Шайхутдинова, Фарида В. Назипова
Aigul R. Shaikhutdinova, Farida V. Nazipova**

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань
(e-mail: aigulsha@mail.ru)
Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan
(e-mail: aigulsha@mail.ru)*

Аннотация: Предложено проведение процесса в условиях насыщенного водяного пара высокого давления с последующей подсушкой путем вакуумирования за счет аккумулированной материалом энергии. Создана экспериментальная установка для термомодифицирования высоковлажной древесины в среде насыщенного пара высокого давления, которая позволила получить рекомендации по режимным параметрам ускоренного термомодифицирования древесины в насыщенном водяном паре без проведения предварительной сушки.

Abstract: Proposed by conducting the process under conditions of saturated high pressure steam followed by vacuum drying by energy accumulated material. An experimental setup for thermomodification of high-wood among the high-pressure saturated steam, which provide advice on regime parameters of accelerated thermomodification wood in the saturated steam without a pre-drying.

Ключевые слова: термодревесина; пар; энергосберегающая технология; термомодификация.

Keywords: thermo wood; steam; energy saving technology; thermal modification.

Во всем мире в последние годы происходит развитие новых технологий в области строительных материалов, в частности, древесины, которые направлены главным образом на то, чтобы улучшить физико-механические и декоративные свойства исходного материала, сделать его более прочным [1], упругим, долговечным [2]. До недавнего времени для изменения свойств древесины и борьбы с грибом самым распространенным был метод химической обработки древесины путем пропитки или поверхностной

обработки органическими или неорганическими солями, токсичное действие которых прекращает развитие грибка, но при этом оказывает негативное воздействие на окружающую среду. В связи с этим, одним из передовых направлений в технологии переработки древесины в последнее время является термомодифицирование древесины, в результате которого получается экологически чистое термодерево, обладающее биостойкостью, долговечностью [2], стабильностью геометрических размеров [4], а также привлекательным эстетическим видом [5]. Несмотря на высокую стоимость водяного пара многие производители термодревесины остановили свой выбор на водяном паре, как наиболее оптимальном агенте обработки для получения термоматериала высокого качества, выделяя среди преимуществ высокий коэффициент теплоотдачи, высокую пожаробезопасность и качество готовой продукции, определяемое однородностью цвета по всему сечению термодерева. Однако, такой фактор, как перегретый водяной пар наряду с использованием стадии предварительной длительной сушки материалов, значительно увеличивающий энергозатраты на ведение процесса, сдерживает широкое применение технологии термомодифицирования в среде водяного пара, постепенно вытесняясь менее энергозатратными. В связи с этим является актуальной разработка энергосберегающей технологии термомодифицирования высоковлажного древесного сортамента в среде насыщенного водяного пара без предварительной сушки. Технологический процесс термического модифицирования древесины в насыщенном водяном паре складывается из следующих основных этапов: повышение температуры в аппарате до 180–220 °С путем подачи насыщенного пара из парогенератора, выдержка древесины при высокой температуре и давлении насыщенного пара в течение 4-8 часов с целью термомодифицирования материала, вакуумирование для подсушки обработанной древесины. Температура и продолжительность выдержки зависит от требуемых свойств и цвета конечного материала. Процесс одновременной подсушки и охлаждения заканчивается при достижении древесиной температуры порядка 20 °С. Влажность термомодифицированного материала в результате подобной подсушки может быть снижена на 25–35 % в зависимости от породы, начальной влажности и толщины. В случае необходимости дальнейшей сушки пиломатериала цикл «прогрев – вакуумирование» может быть повторен несколько раз. С целью определения оптимального агента обработки при термомодифицировании древесины проведен сравнительный анализ процессов, протекающих при термомодифицировании древесины в насыщенном и перегретом паре. В результате моделирования установлена зависимость времени прогрева пиломатериала при S=50 мм до требуемой температуры обработки при прогреве сосны в перегретом и в насыщенном паре. Согласно кривым, представленным на рис. 1, можно сделать вывод, что с целью ускорения процесса прогрева древесины, необходимо использовать высокую температуру, которая, однако, должна быть выбрана с учетом физико-механических свойств древесины, изменяющихся под воздействием высоких температур. Также видно, что время прогрева материала до требуемой температуры обработки в насыщенном паре является менее продолжительным по сравнению со временем прогрева в перегретом паре, что объясняется высокими теплообменными характеристиками насыщенного пара и хорошими теплопроводными свойствами влажного материала, используемого для данного процесса.

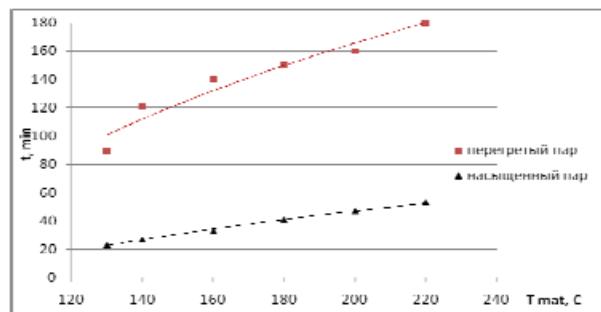


Рис. 1. Время повышения температуры в центре образца сосны (при $s=50$ мм) до требуемой температуры при прогреве в перегретом и насыщенном паре.

Еще одной отличительной особенностью представленной технологии термомодификации древесины в среде насыщенного водяного пара являются улучшенные конечные качества материала, а именно отсутствие характерного для термодревеси запаха, что достигается путем многократного пропаривания и вакуумирования термодерева на стадии охлаждения.

Список литературы

1. Boonstra, M. J., Acker, J. V., Tjeerdsm, B. F. & Kegel, E. V., 2007. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Science*, 64, 679-690.
2. Boonstra M J, Tjeerdsm B F, Groeneveld HAC, 1998. Thermal modification of non-durable wood species. Part 1. The PLATO technology - thermal modification of wood. IRG/WP/98-40123, 13 s.
3. Calonego WF, Durgante Severe ET, Furtado EL, 2010. Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140 °C, 160 °C, 180 °C, 200 °C and 220 °C. *Bioresour Technol.* 101:9391-9394.
4. Evan Banks, 1990. Degradation of wood surfaces by water // *Holz als werkstoff*. №4. 159-163.
5. Bekhta P, Niemz P., 2003. Effect of high temperature on the changes in colour, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforsch*, 57, (5), 539-546.

СУШКА ЛЕКАРСТВЕННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ С ТЕПЛОВОМ НАСОСОМ

Елена В. Романова*, Александр Н. Колиух**

* ФГБОУ ВПО Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия,

(тел. (84752)637239, e-mail: romanohel@yandex.ru)

** ФГБОУ ВПО Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия,

(тел. (84752)639152, e-mail: a_koliuh@mail.ru)

Аннотация: Сушка лекарственных растений является одной из наиболее важных технологических операций, существенным образом определяющих качество готовой продукции. Теплонасосные технологии подготовки сушильного агента успешно применяются для сушки термолабильных материалов, обеспечивают энергосбережение и высокое качество. В качестве объекта сушки выступали корневища с корнями подопилла гималайского. Экспериментальные исследования проводились в диапазоне температур от 30 до 70 °C и скорости сушильного агента от 2 до 5 м/с. Полученные данные планируется использовать для дальнейших исследований: обоснования технологических параметров процесса сушки с тепловым насосом и выработки практических рекомендаций для применения в промышленности.

Abstract: Drying is the most common way to preserve quality of medicinal plants. Heat pump drying has been reported as an innovative drying technique for the drying of thermolabile materials in terms of energy cost and product quality. In this study, rhizomes and roots of podophyllum emodi were dried in a heat pump dryer. Drying experiments were carried out at an air temperature range of 30–70 °C. The velocity of drying media in the drying chamber was range of 2-5 m/s. The received data will be use for the further researches: substantiations of technological parameters of process of drying with the heat pump and developments of practical recommendation for application in the industry.

Ключевые слова: сушка, энергосбережение, тепловой насос, лекарственное растительное сырье, корневища с корнями подопилла гималайского.

Keywords: drying, energy saving, heat pump, herbal medicinal plant, rhizomes and roots of podophyllum emodi (podophyllum hexandrum Royle).

Лекарственные растения являются источниками биологически активных веществ. Некоторые вещества, получаемые из растений, не используются непосредственно с лечебной целью, но служат исходными продуктами для синтеза эффективных лекарственных веществ. В России заготавливаются значительные количества дикорастущего и культивируемого лекарственного растительного сырья. Доброкачество лекарственного растительного сырья в значительной степени зависит от соблюдения сроков заготовки, правильной технологии сбора и режима сушки. Биохимические процессы в собранном сырье в первое время протекают как в живом растении, т.е. преобладает синтез биологически активных веществ. Затем, по мере обезвоживания, в связи с прекращением поступления влаги и питательных веществ, процессы обмена сдвигаются в сторону распада, что приводит к снижению содержания биологически активных веществ в сырье. Однако в некоторых случаях процессы, протекающие в сохнущем сырье, приводят, напротив, к увеличению содержания действующих веществ [1].

Сушка лекарственных растений является одной из наиболее важных технологических операций, существенным образом определяющих качество готовой продукции. Для сушки лекарственного растительного сырья применяется естественная сушка и с искусственным нагревом (тепловая). Тепловая сушка обеспечивает быстрое обезвожи-

вание и может использоваться при любых погодных условиях и в любых районах заготовок. Сохранить, а в ряде случаев и улучшить свойства лекарственных препаратов в процессе сушки можно при соблюдении оптимальных технологических и эксплуатационных режимов.

Небольшие объемы производства и разнообразие высушиваемых материалов создают сложности в обеспечении требуемых технологических параметров сушки. Из-за недостатка специального сушильного оборудования многие продукты высушиваются в сушилках, которые не соответствуют всем необходимым требованиям, в результате чего снижается качество готового продукта, увеличиваются энергозатраты.

Сегодня необходимо решать возникшие технологические проблемы, разрабатывать новое специальное оборудование для высушивания термолабильных, растительных продуктов в производстве медицинских препаратов. При этом ставятся цели: упрощение технологического процесса, обеспечение требуемого качества высушенного продукта, снижение энергозатрат. Эти цели полностью соотносятся с политикой государства: осуществление технологического перевооружения российской фармацевтической отрасли одна из стратегических задач госбезопасности страны в будущем [2]. Также распоряжением Правительства Российской Федерации утверждена государственная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», основная цель которой рациональное использование топливно-энергетических ресурсов за счет энергосбережения, повышение энергоэффективности различных отраслей экономики, расширение использования возобновляемых источников энергии [3].

Энергосбережение в сушильных установках имеет значительный потенциал, в связи с широкой распространенностью процессов сушки, высокой энергоемкостью и недостаточным техническим совершенством используемых сушильных установок. С этой целью предлагается использовать тепловые насосы для утилизации теплоты отходящего сушильного агента.

В качестве объекта сушки выступали корневища с корнями подофилла гималайского, являющиеся источником подофиллотоксина. Подофиллотоксин используется в качестве исходного вещества при синтезе противоопухолевых препаратов. Существует несколько, описанных в научной литературе, способов получения подофиллотоксина. Основным источником субстанции подофиллотоксина для фармацевтической промышленности в ближайшей перспективе остаётся растительное сырьё, так как другие способы получения этого соединения дают существенно более низкий выход целевого продукта и экономически более затратны. За рубежом производятся лекарственные препараты, действующими веществами которых является либо сам подофиллотоксин, либо его полусинтетические производные. В последние годы потребность мировой фармацевтической промышленности в подофиллотоксине заметно возросла, что связано с ростом числа опухолевых заболеваний. В настоящее время Россия закупает препараты подофиллотоксина производства стран Европы, США, Индии и Китая [4].

Для проведения исследований была создана экспериментальная установка, состоящая из следующих элементов: теплового насоса, смонтированного на базе парокомпрессионного холодильного агрегата, сушильной камеры, калорифера для дополнительного нагрева, а также рекуперативного теплообменника [5]. Экспериментальные исследования по сушке корней подофилла проводились в диапазоне температур от 30 до 70 °C и скорости сушильного агента от 2 до 5 м/с.

Полученные данные планируется использовать для дальнейших фармакотехнологических исследований: обоснования технологических параметров процесса сушки с тепловым насосом и выработки практических рекомендаций для применения в промышленности.

Список литературы

1. Гришина, Е.И. Фармакогнозия: электронное учебное пособие [Электронный ресурс]/ Е.И. Гришина, И.С. Погодин, Е.А. Лукша. Омская гос. мед. академия, 2008. URL: <http://www.studmed.ru/docs/document3832/content> (дата обращения: 31.03.2014)
2. Стратегия развития фармацевтической промышленности Российской Федерации на период до 2020 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pharma2020.ru/> (дата обращения: 31.03.2014)
3. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года//Российский социально-экологический союз [Электронный ресурс]. URL: http://www.rusecounion.ru/doc_rf_energysave2020 (дата обращения: 31.03.2014)
4. Мурадханов, Р.Р. Фармакогностическое изучение некоторых видов растительного сырья, содержащих подофиллотоксин: автореф. дис. канд. фарм. наук: 14.04.02/ Р.Р. Мурадханов. – Пенза, 2013. – 24 с.
5. Романова, Е.В. Энергосберегающая сушильная установка с тепловым насосом/ Е.В. Романова, А.Н. Колиух // Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества: сборник докладов Международной научно-практической конференции. – В 4 т. / под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. Н.С. Попова ; Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2013. – Т. 4. – С. 231-232.

УДК 697.92-52

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ С ПЕРЕМЕННЫМ РАСХОДОМ ВОЗДУХА

А.В. Антипов

ООО «НЭД-Центр», г. Москва, Россия

Ц.Б. Дугаров

Восточно-сибирский государственный университет технологии и управления,
г. Улан-Удэ, Россия siden@mail.ru

Стремление к созданию зданий с малыми энергетическими затратами привело к увеличению требований к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций (в Европе в 70-х годах прошлого столетия, в России с 2000 года). Применительно к стенам и покрытиям требования к сопротивлению теплопередаче возросли на 150 – 200 %, к окнам на 20 - 30%, при этом требования к сокращению затрат энергии на вентиляцию не изменены. Требуемый воздухообмен в помещениях, обеспечивающий оптимальный уровень микроклимата в помещении - важный параметр. При вентиляции происходит удаление внутренних загрязнений, бактерий, поддерживается оптимальный влажностный режим и необходимое соотношение концентраций кислорода и углекислого газа. В летний и зимний период энергия также затрачивается на охлаждение и подогрев вентилируемого воздуха. Затраты на вентиляцию в современных зданиях оцениваются в 40 - 50% всех затрат на отопление [1]. И улучшение утепления здания, без внедрения специальных инженерных мероприятий в системах вентиляции, не дает возможности снизить энергозатраты. Наоборот, чем больше теплозащита здания, тем больше увеличивается доля энергии в затратах на поддержание требуемых параметров микроклимата.

В большинстве случаев параметры микроклимата в помещениях, включая газовый состав, регулируются и поддерживаются с применением имеющихся в здании систем отопления, вентиляции и кондиционирования. При этом система отопления отвечает за обогрев внутреннего воздуха, вентиляция – за нормализацию состава воздушной среды путем продувки ее наружным воздухом, кондиционирование – за охлаждение воздуха и поддержание заданной влажности.

Таким образом, регулировка состава внутренней воздушной среды, осуществляется только продувкой внешним воздухом, за исключением регулирования влажности. Перечисленные способы регулирования параметров внутренней воздушной среды не затрагивают важной задачи регулировки состава внутренней атмосферы помещения. Объемная доля кислорода в воздухе помещений, согласно СНиП, должна быть не менее 20 и не более 23 %. Длительное пребывание в помещении с недостаточным уровнем содержания кислорода может привести к более серьезным проблемам со здоровьем, т.к. кислород отвечает за все обменные процессы организма, то следствием его недостатка становятся:

- нарушение обмена веществ;
- снижение иммунитета.

Существует ряд различных технических и инженерных решений систем газоразделения, на основе которых возможно обеспечить содержание кислорода во внутреннем воздухе помещения более высокой концентрации. Наиболее лучшим выходом из сложившейся ситуации является получение кислорода непосредственно на месте его использования. Установки, основанные на этой технологии, часто называют кислородными концентраторами.

Принципы организации процессов воздуходеления:

Адсорбционные генераторы кислорода;

Азот лучше, чем кислород поглощается адсорбентами. Такими адсорбентами являются цеолиты, и воздух в контакте с ними обогащается кислородом.

При осуществлении процесса разделения воздуха, необходимо учитывать наличие в воздухе аргона, воды, диоксида углерода. Практически обогащенный поток может содержать до 95-95,6% O₂.

В настоящее время наиболее широко используются и разрабатываются два метода осуществления адсорбционных процессов очистки, разделения и сепарации газов, называемые в зарубежной литературе методами TSA и PSA [2].

Метод TSA (temperature swing adsorption) – традиционный метод проведения адсорбционных процессов в циклах адсорбции-десорбции при разных температурах. Полный технологический цикл включает стадии адсорбции, нагрева слоя адсорбента, стадию десорбции и стадию охлаждения перед проведением следующего цикла. Необходимость периодического нагрева и охлаждения слоя адсорбента осложняет использование этого метода и является его главным недостатком. Стадия нагрева обычно весьма энергоемка, так как здесь приходится прогревать не только адсорбент, но и весь адсорбер.

В основе безнагревных адсорбционных процессов PSA (pressure swing adsorption) очистки и разделения газов, лежит схема, где процесс разделения газовой смеси адсорбционным методом включает четыре стадии: производство насыщенной кислородом газовой смеси; противоточная регенерация адсорбента; сброс давления после производства; набор давления после регенерации.

Главное преимущество процессов PSA перед TSA – в устранении стадий нагрева и охлаждения адсорбера, требующих больших затрат времени и энергии. Важнейшая отличительная особенность PSA – малая продолжительность цикла, которая лимитируется временем срабатывания клапанов и установления давления в адсорбере. В типовых ситуациях продолжительность полного цикла – несколько минут. Именно поэтому в русскоязычной литературе PSA называют КБА – короткоцикловая безнагревная адсорбция [3].

Качество смеси, которую необходимо получить на выходе из установки, определяется количеством адсорберов входящих в ее состав. Так для получения кислорода чистотой 50-90% необходимо использовать два или три адсорбера. Кислородные концентраторы разрешено подсоединять к уже имеющейся системе кондиционирования и приточной вентиляции. Объединив концентратор кислорода с системой вентиляции,

можно обеспечить тепловлажностную обработку воздуха и насыщение его кислородом. Ряд фирм Южной Кореи, Германии, приступили к серийному производству внешних модулей кислородных концентраторов, присоединяемых к системе вентиляции [4].

Основным недостатком метода адсорбционного оборудования является сложность и громоздкость аппаратуры, необходимость регенерации адсорбента. Поэтому, более экономически выгодным может оказаться использование мембранных кислородных генераторов.

Мембранные кислородные концентраторы;

Мембранный генератор кислорода построен из одного модуля, оборудованного распределительными и регулирующими клапанами и прочими устройствами. В свою очередь, мембранный модуль представляет из себя емкость, обычно цилиндрической формы, в которой параллельно размещены полые внутри волокна из специальных материалов со стенками, представляющими собой мембраны. Скорость проникновения через поры стенок-мембран молекул газов, в том числе и кислорода с азотом, различна. Медленнее всего через мембрану диффундируют молекулы азота N₂. Китайскими фирмами производятся внешние мембранные модули кислородных концентраторов для вентиляционных систем. Из общих преимуществ мембранной технологии выделения кислорода можно отметить:

Низкий уровень шума при работе.

Отсутствие потребности в техническом обслуживании.

Мембранные модули не содержат компонентов, нуждающихся в обслуживании.

Можно отметить, что и мембранные установки в целом также несколько проще по конструкции, чем адсорбционные.

Длительный срок службы. Прогнозируемый срок службы мембранного модуля составляет не менее 10 лет.

В России налажен серийный выпуск вентиляционных приточно-вытяжных установок [5] с рекупераций тепла и влаги. Основное их отличие - наличие кислородного концентратора, который позволяет создать зоны с повышенным содержанием кислорода до 21,5 – 21,8% и увлажнителем воздуха.

Представленные на рынке концентраторы кислорода, в том числе, интегрированные в систему кондиционирования, не имеют дополнительных средств по удалению углекислого газа, кроме вентиляции наружным воздухом.

Концентрация углекислого газа отображает степень загрязнения воздуха другими продуктами жизнедеятельности организма. Концентрация углекислого газа в помещениях увеличивается пропорционально количеству людей и времени их пребывания в помещении. Для того чтобы обеспечить благоприятную атмосферу по содержанию кислорода и углекислого газа, в помещении следует использовать одновременно две системы: концентратор кислорода относительно небольшой производительности и устройство удаления углекислого газа – например, мембранно-адсорбционного типа [6].

Совместное применение данных систем обеспечит улучшение состава атмосферы, а именно:

повышенное содержание кислорода по сравнению с наружным воздухом;

пониженное содержание углекислого газа по сравнению с наружным воздухом; комфортный уровень влажности в зимний период без включения дополнительных средств увлажнения.

Еще одним важным результатом совместного применения данных систем является возможность сокращения суммарного энергопотребления на поддержание комфортной атмосферы в помещении по сравнению с традиционными системами.

Нормы по вентиляции эксплуатируемых помещений определяются удалением углекислого газа, что приводит к значительным энергозатратам на нагрев/охлаждение приточного воздуха и регулировку влажности. При этом, реальная эффективность сис-

темы вентиляции напрямую зависит от содержания CO₂ в наружном воздухе, которое варьируется в зависимости от экологической обстановки и непрерывно растет. По существующим нормам комфортная атмосфера помещений соответствует относительной влажности в пределах 40-60% концентрация углекислого газа в воздухе на уровне среднемесячного значения 0,5%. Но, данная концентрация, в действительности, не соответствует комфортной атмосфере. Содержание CO₂ в благоприятной атмосфере находится в пределах 0,05-0,1%.

Применяемый в настоящее время способ удаления углекислого газа путем вентиляции атмосферы помещения наружным воздухом, связан с высокими энергозатратами, так как содержание в атмосфере данного газа находится на весьма высоком уровне. Альтернативным, перспективным способом организации удаления данного газа является применение газоразделительных технологий.

Эти проблемы решает поглотитель (абсорбер) углекислого газа, встраиваемый в систему вентиляции.

Поглотитель – это прибор, способный поглощать углекислый газ из воздуха в закрытых помещениях. Он так же очищает воздух от пыли, пыльцы, спор плесени, мелких насекомых и других микроскопических частиц.

Повышенное содержание углекислого газа в рабочем помещении является причиной плохого самочувствия, головной боли, усталости и сложности с концентрацией, что влечёт за собой снижение работоспособности и повышение заболеваемости.

Процессы фильтрации и регенерации поглотителя углекислого газа производятся в постоянном режиме. Переключение между режимами полностью автоматическое.

В качестве одной из мер повышения энергетической эффективности систем вентиляции, новый американский стандарт ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2004 предусматривает динамическое изменение режимов работы вентиляции жилых и общественных зданий. Это реализуется путем регулирования количества подаваемого свежего воздуха сверх минимально необходимого по мере изменения реально складывающейся обстановки, определяемой количеством людей, присутствующих внутри вентилируемого объема. При использовании адаптивных систем вентиляции жилые помещения с большими потребностями получают больший поток воздуха, чем пустые помещения [7].

Эти системы предназначены для вентиляции помещений с переменным воздухообменом и индикацией, как содержания кислорода, так и степени загрязнения воздуха по концентрации углекислого газа в воздухе помещений. Система включает вентиляционную установку, сеть воздуховодов, регулирующие клапаны, воздухораспределители, датчики концентрации углекислого газа, кислорода, блоки автоматики.

В зависимости от концентрации углекислого газа и кислорода, замеряемой, как правило, в вытяжном воздуховоде или представительной точке помещения, регулируется величина воздухообмена на соответствие нормативным значениям концентрации [2]. Необходимо отметить, что дополнительные капиталовложения для организации адаптивной системы вентиляции незначительны; для повышения энергетической эффективности существующей системы вентиляции в помещениях с переменным количеством людей в течение периода эксплуатации необходимо приобрести датчик углекислого газа и кислорода (расположить их в вытяжном канале), заменить вытяжной и приточный вентилятор на аналогичные с частотным приводом и включить в существующую систему автоматизации контроллер, позволяющий регулировать частоту вращения вентиляторов в зависимости от измеряемой концентрации CO₂ и O₂. Дополнить систему вентиляции концентратором кислорода и поглотителем углекислого газа.

Адаптивные системы вентиляции особенно эффективны при применении в зданиях с переменным количеством персонала (посетителей):

залах ожидания вокзалов и аэропортов;
конференц-залах;
переговорных комнатах;

зрительных залах кинотеатров, театров, спортивных комплексов;
торговых комплексах.

При устройстве адаптивных систем вентиляции достигается снижение среднегодовой величины воздухообмена на 40–60%, экономия тепловой энергии до 60–80 кВт·ч/м² в год и электрической энергии до 10–15 кВт·ч/м² в год [8].

Список литературы

1. Горшков А. С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий // Инженерно-строительный журнал. 2010. №1. С. 9-13.
2. Ruthven, D.M. Pressure Swing Adsorption / D.M. Ruthven, S. Farooq, K. Knaebel. – N.Y. : VCH, 1994. – 387 p.
3. Никифоров, Ю.В. Получение обогащенного кислородом воздуха методом безнагревной адсорбции / Ю.В. Никифоров, А.Н. Слыщенко // Вестник МГТУ. – 1996. – Вып. Криогенная и холодильная техника. – С. 27 – 33.
4. Концентратор кислорода «Armed» 7F-1L. Паспорт и инструкция по эксплуатации.
5. Приточно-вытяжная установка ZENIT-7001F. паспорт и инструкция по эксплуатации.
6. Воздухоочиститель, абсорбер CO₂, для систем вентиляции. Паспорт и инструкция по эксплуатации.
7. Гошка Л.Л. К вопросу о необходимости внедрения эффективных систем климатизации зданий // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 7. С. 33-37.
8. Наумов А.Л., Капко Д.В. Локальные системы кондиционирования воздуха в офисных зданиях // АВОК. – 2012. – № 2.

УДК 674.04

ОСЦИЛЛИРУЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВАКУУМНОЙ СУШКИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛООВОГО НАСОСА OSCILLATING TECHNOLOGY VACUUM DRYING OF WOOD WITH HEAT PUMPS

Шамиль Р. Мухаметзянов*, Ильшат Ф. Хакимзянов*
Shamil R. Mukhametzyanov*, Ilshat F. Khakimzyanov*

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия,
Казань (e-mail: joker775.87@mail.ru)
Kazan National Research Technological University

Аннотация. Описана энергосберегающая технология сушки древесины в вакуум-осциллирующей установке. Рассмотрены пути повышения эффективности процессов сушки древесных материалов. Представлен анализ энергопотребления сушильной установки для различных пород древесины при помощи теплового насоса с электрическим нагревом.

Abstract. Described of energy-saving technology wood drying in a vacuum oscillating unit. In article of improving the ways the efficiency of the drying of wood materials. Consumption the analysis of the energy of the dryer for the different types of wood using heat pump with electric heating.

Ключевые слова: сушильная камера, тепловой насос, энергоэффективность, вакуум, древесные материалы.

Keywords: drying chamber, heat pump, energy efficiency, vacuum, wood materials.

Получение высокого качества высушенной древесины и сокращение продолжительности процесса позволяет техника сушки материалов, осуществляемая в условиях пониженного давления. При этом, несмотря на неоспоримые преимущества, вакуумная сушка имеет проблему с подводом тепловой энергии к высушиваемому материалу. Существующие в различных отраслях промышленности известные технологии сушки, такие как СВЧ, конвективные, радиационные способы не всегда позволяют получить материал с необходимым качеством и с небольшими энергозатратами. Поэтому разработка технологий ускоренной сушки с наименьшими энергозатратами является актуальной проблемой.

При этом в плане снижения затрат в процессах сушки в последние годы наибольшее внимание уделяется использованию альтернативных источников энергии, в частности, отходов деревообработки.

С целью снижения затрат в процессах вакуумной сушки пиломатериалов была разработана технология вакуумно-кондуктивной сушки в осциллирующих режимах с использованием теплового насоса. Особенностью предложенной технологии является передача тепловой энергии влаги, испаренной из материала на стадии вакуумирования в одной камере на нагрев материала в другой камере [1].

Тепловой насос представляет собой замкнутый контур, в котором хладагент переносит тепловую энергию от низкопотенциального источника энергии (испаренная влага из древесины) к высокопотенциальному (жидкостной теплоноситель) с помощью компрессора.

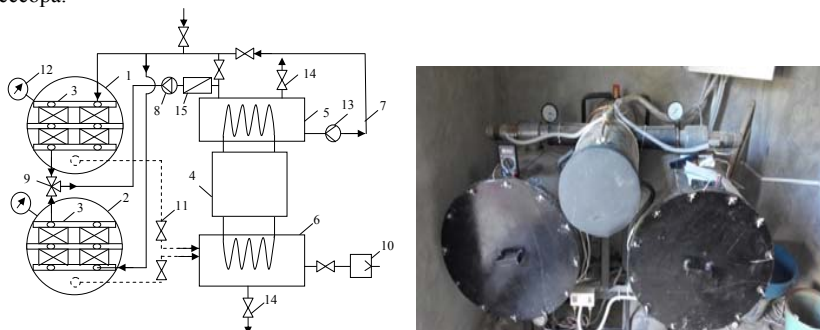


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки пиломатериалов: 1 – верхняя камера; 2 – нижняя камера; 3 – плиты с жидкостным нагревом; 4 – теплонасосная установка; 5 – конденсатор; 6 – испаритель; 7 – трубопровод; 8 – циркуляционный насос; 9 – трехходовой кран; 10 – вакуумный насос; 11 – электромеханический клапан; 12 – вакуумметр; 13 – расходомер; 14 – вентиль; 15 – дополнительный электроподогреватель

Для проведения экспериментальных исследований процесса сушки по разработанной технологии создана установка (рис. 1), которая работает следующим образом. Исследуемые свежесрубленные образцы древесины укладываются в камерах на нагревательных плитах. При этом с целью предотвращения интенсивного удаления влаги с торцов древесины последние закрашиваются быстросохнущей краской. Далее камеры герметизируются с помощью крышек и, включением дополнительного электроподогревателя и циркуляции жидкостного теплоносителя по малому кругу, начинается нагрев образца в первой камере. Нагрев производится с помощью плит с жидкостным подводом тепла контактным способом. Подогрев древесины продолжается до тех пор, пока температура внутри образца не достигнет заданного значения. После нагрева первая камера подвергается вакуумированию и выдержке до остывания пиломатериала. При этом испаряющаяся из высушенного материала влага, конденсируясь на испарителе те-

плового насоса, отдает тепловую энергию хладагенту, за счет чего осуществляется стадия нагрева находящегося материала во второй камере. Продолжительность стадии вакуумирования в одной камере определяется продолжительностью нагрева материала во второй камере. Далее происходит одновременная смена стадий в камерах. Сушку проводят до тех пор, пока влагосодержание пиломатериалов не достигнет заданного конечного значения [2].

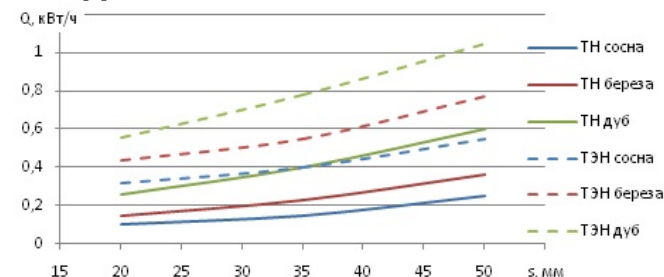


Рис. 2. Показатели энергопотребления установки осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки для разных пород пиломатериалов

С целью получения данных по энергоэффективности применения теплового насоса в процессах вакуумно-осциллирующей сушки древесных материалов, было проведено сравнение энергопотребления созданной установки для различных пород древесины с электрическим и теплонасосным нагревом (рис.2). Из графиков видно, что сушка с электрическим подводом тепла проходит со значительно большим энергопотреблением (примерно в 3 раза). Таким образом, было установлено, что применение теплового насоса в процессе осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки древесных материалов является перспективным направлением эффективного использования тепловой и электрической энергии.

Список литературы

1. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Галяветдинов Н.Р., Валиев Ф.Г. Экспериментальные исследования осциллирующей сушки древесины в гидрофильных жидкостях // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2008. Т. 51. № 12. С. 104-106.
2. Сафин Р.Р. Вакуумно-конвективная сушка пиломатериалов. монография / Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Разумов Е.Ю.; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Казанский гос. технологический ун-т". Казань, 2009.

УДК 674.8

**ЭНЕРГОРЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ
И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ
ENERGY SAVING TECHNOLOGY OF DRYING AND THERMAL
DECOMPOSITION OF WOOD**

Алмаз Касимов*, Ирина Романчева, Александр Савельев***, Лариса Герке******
Almaz Kasimov*, Irina Romancheva, Alexander Sowell***, Larisa Gerke******

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань,
(e – mail: kasim.91@inbox.ru).

**Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань,
(e – mail: romancheva.irina@inbox.ru).

***Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань,
(e – mail: sowells@mail.ru).

****Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Казань,
(e – mail: sowells@yandex.ru).

Kazan national research technological university, Russia, Kazan,

Аннотация: дано описание технологической схемы контактного пиролиза для производства пиролизной жидкости из отходов лесного комплекса, разработанной на кафедре «Переработка древесных материалов».

Abstract: the description of the technological scheme contact pyrolysis for production of pyrolysis liquids from wood waste complex, developed on chair «Processing of wood materials» is given.

Ключевые слова: отходы лесного комплекса; контактный пиролиз; пиролизная жидкость; газификация древесного пиротоплива; генераторный газ.

Keywords: waste wood complex; contact pyrolysis; liquid pyrolysis; gasification wood biofuel producer gas.

Полное использование отходов древесного сырья от лесозаготовок, лесопиления и деревообработки является одной из наиболее серьезных и пока не решенных проблем лесного комплекса. Растительная биомасса обладает специфическими свойствами, обуславливающими определенные требования к технологическому оборудованию, используемому для его переработки в различные виды топлива. К факторам, снижающих энергетическое использование отходов лесного комплекса, можно отнести: нестабильная влажность и размеры, низкая энергетическая плотность[1].

Одним из решений данной проблемы является получение из древесной биомассы жидкого топлива методом пиролиза. Максимальный выход жидкого топлива наблюдается при использовании технологии быстрого контактного пиролиза.

В производстве пиротоплива, одним из важнейших показателей состояния растительной биомассы, используемых в пиролизных установках, является влажность. Высокая влажность растительной биомассы, подвергающейся пирогазификационному разложению, значительно понижает эффективность процесса.

При разработке энергосберегающих технологических процессов и оборудования для быстрого контактного пиролиза, необходимо учитывать влияние характеристики физико-химических свойств различных видов влаги на условия термохимического процесса, состава и свойства конечных продуктов.

Исходя из этого, в технологическую схему быстрого контактного пиролиза включается процесс сушки растительной биомассы, с обеспечением регулирования режимов сушки и пиролиза. Следовательно, повышение производительности аппаратов пиролиза растительного сырья во многом зависит от увеличения скорости сушильного процесса.

Для осуществления процесса контактного пиролиза используются отходы лесного комплекса, предварительно высушенные до влажности не более 12% и измельченные до размеров 15 мм.

Технологическая схема процесса контактного пиролиза отходов лесного комплекса представлена на рис.1[2].

Из сушильного бункера 1, древесные отходы поступают в загрузочное устройство 2, после этого подаются в реактор 3, для контактного пиролиза древесных отходов, твердые остатки пиролиза собираются в приемник 4. Полученная парогазовая смесь в реакторе, проходит через теплообменник 5, где происходит её конденсация и жидкая часть направляется в приемный резервуар 6, неконденсированные газы сжигаются на факеле.

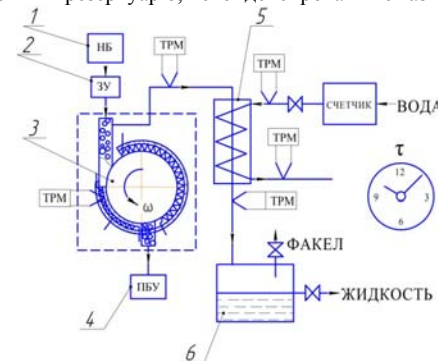


Рис.1. Схема быстрого контактного пиролиза древесных отходов.

1 – сушильный бункер древесных отходов, 2 – загрузочное устройство, 3 – реактор, 4 – приемник, 5 – теплообменник, 6 – приемный резервуар.

Значительными критериями процесса быстрого контактного пиролиза являются: 1) очень высокие потоки тепла (для интенсивной теплопередачи требуется мелко размельченная биомасса и механоактивация процесса); 2) тщательно контролируемая температура (500 - 550°C) и время пребывания паров пиролиза в реакторе (не более 1с); 3) быстрое охлаждение парогазовой смеси. Угольный остаток и неконденсированный газ рассматриваются как побочные продукты быстрого контактного процесса пиролиза[3]. За счет соблюдения данного условия, возможность получить до 75% по массе жидкого продукта.

Жидкое пиротопливо, полученное при быстром контактном пиролизе, обладает более высокой, чем исходная биомасса, энергетической плотностью, может долго храниться, безопасно транспортироваться и использоваться в качестве топлив в турбинных установках, паровых котлах и печах. Также перспективным направлением пиролизной жидкости является ее газификация и применение генераторного газа для получения электрической энергии[4].

Таким образом, необходимым условием для эффективного использования отходов лесного комплекса, для получения тепловой и электрической энергии, является предварительная подготовка (измельчение до требуемых размеров и сушка до оптимальной влажности) к процессу быстрого контактного пиролиза.

Список литературы

1. Сафин, Р.Г. Разработка технологии переработки высоковлажных древесных отходов в высокооктановые компоненты моторного топлива [Текст] / Р.Г. Сафин, Н.Ф. Тимербаев, А.Р. Садтрдинов, Д.Б. Просвирников // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. № 7. – С. 250 – 254.
2. Тунцев, Д.В. Схема контактного пиролиза отходов лесозаготовки [Текст] / Д.В. Тунцев, Р.А. Халитов, М.К. Герасимов, А.М. Касимов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. № 2 – 3 (7 – 3). – С. 146 – 149.
3. Тунцев, Д.В. Пиротопливо – продукт быстрого пиролиза растительной биомассы / Тунцев Д.В., Филиппова Ф.М., Хисматов Р.Г., Тимербаев Н.Ф. // Журнал прикладной химии, г. Санкт – Петербург. - 2014. -Т. 18. № 9. – С. 1381.
4. Тунцев, Д.В. Схема промышленной установки для переработки отходов лесного комплекса [Текст] / Д.В. Тунцев, Р.Г. А.М. Касимов, Р.Г. Хисматов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. - Т. 2. № 3 – 2 (8 – 2). - С. 445-448.

УДК 621.9:697.1

**ПЛАСТИНЧАТЫЙ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОР «ГАЗ-ГАЗ»
С ОПТИМИЗИРОВАННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
PLATE HEAT EXCHANGER “GAS-GAS” WITH OPTIMISED PERFORMANCE**

**Ю.Я. Печенегов, Ю.В. Першина, Е.А. Малышева
Y.Y. Pechenegov, Y.V. Pershina, H.A. Malysheva**

*Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А., Россия, Энгельс,
(e-mail: mxp@techn.sstu.ru)
Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University named after
Yuri Gagarin, Russia, Engels,
(e-mail: mxp@techn.sstu.ru)*

Аннотация: Рассматривается предложенный авторами новый пластинчатый теплоутилизатор «газ-газ», работающий по схеме противотока. На основе технико-экономического анализа получены зависимости для оптимальных скорости и средней разности температур теплоносителей. Приведены результаты расчетов оптимизированных характеристик в зависимости от определяющих факторов. Приведены численные значения экономической эффективности теплоутилизатора с оптимизированными характеристиками.

Abstract: We consider the proposed new authors plate heat exchanger “gas-gas”, working under the scheme backflow. On the basis of a feasibility study prepared according to the optimum speed and the average temperature difference between the heat transfer. The results of the calculations are optimized, depending on the characteristics of the determining factors. The numerical values of economic efficiency heat exchanger with optimized characteristics.

Ключевые слова: теплоутилизатор «газ-газ», оптимальная скорость теплоносителей, оптимальная разность температур теплоносителей, экономическая эффективность.

Keywords: heat exchanger “gas-gas”, the optimal rate of heat transfer, the optimum temperature difference between coolant, economic efficiency.

Нами предложен новый пластинчатый теплоутилизатор для газовых сред [1], обладающий рядом преимуществ по отношению к известным аналогам. Теплоутилизатор состоит из набора однотипных гладких пластин, выполненных из

теплопроводного материала, образующих прямые щелевые каналы. По смежным каналам перемещаются навстречу друг другу потоки газовых теплоносителей.

Расчеты показывают, что энергетическая эффективность теплообмена в щелевом канале увеличивается при уменьшении ширины канала a . Учитывая технологические ограничения можно рекомендовать принимать a в интервале от 3 до 10 мм.

В соответствии с [2], при одинаковых расходах горячего (1) и холодного (2) теплоносителей ($G_1 = G_2 = G$, кг/с) коэффициент теплопередачи $k = 0,5a$, где коэффициент теплоотдачи α для турбулентных потоков определяется по формуле $\alpha = 3,34w^{0,8} / a^{0,2}$, Вт/(м²·К), а отношение затрачиваемой на перемещение теплоносителей мощности N к площади теплопередачи определяется по выражению $N / F = 0,0027w^{2,8} / a^{0,2}$, Вт/м².

В качестве критерия оптимальности принята переменная часть годовых приведенных затрат, руб/год:

$$Z = (C_m M_m + C_n N)(p_n + p_a) + \tau \cdot C_{эл} \cdot N, \quad (1)$$

где C_m – цена на материал теплопередающих пластин с учетом стоимости их монтажа; M_m – масса материала пластин, $M_m = F \cdot \delta \cdot \rho_m$, кг; δ – толщина пластин, м; ρ_m – плотность материала пластин, кг/м³; C_n – стоимость единицы установленной мощности вентиляторов с учетом стоимости их монтажа (принималось 4000 руб/кВт); p_n – нормативный коэффициент (равен 0,12 год⁻¹); p_a – коэффициент амортизационных отчислений (равен 0,13 год⁻¹); τ – число часов работы в год; $C_{эл}$ – стоимость электроэнергии, затраченной на привод вентиляторов (принято 4 руб/(кВт·ч)).

Исследование функции (1) на экстремум привело к зависимости для оптимальной скорости, м/с:

$$w_{\text{опт}} = 1,8 C_m^{0,35} \cdot a^{0,07}. \quad (2)$$

Для квадратной формы поперечного сечения теплоутилизатора число теплопередающих пластин при оптимальной скорости теплоносителей

$$n = 0,935 G^{0,5} / (C_m^{0,175} \cdot a^{1,035}). \quad (3)$$

При этом ширина утилизатора составит $a \cdot n$, высота $h = a \cdot n$, а его длина $b = Q / (h \cdot n \cdot k \cdot \Delta t)$, где Q – передаваемая тепловая мощность; Δt – средняя разность температур теплоносителей.

Оптимальное значение Δt определялось по максимуму получаемой в течение года экономии

$$\Xi = \Xi_Q - Z, \quad (4)$$

где $\Xi_Q = Q \cdot C_Q \cdot \tau$; C_Q – цена тепловой энергии.

Расчеты с использованием (4) и (1) при оптимальной скорости $w_{\text{опт}}$ и $C_Q = 477$ руб/ГДж показали, что функция (4) имеет максимум, соответствующий оптимальной разности температур $\Delta t_{\text{опт}}$. Полученные значения $\Delta t_{\text{опт}}$ представлены на рис. 1 в виде зависимости от ширины каналов a при $C_m = 50$ и 300 руб/кг. Видно, что $\Delta t_{\text{опт}}$ выше при больших a и C_m .

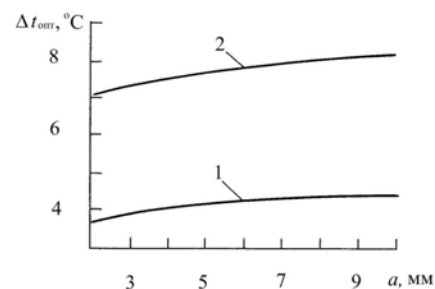


Рис. 1. Зависимость $\Delta t_{\text{опт}}$ от а: 1 - Цм = 50 руб/кг; 2 - 300 руб/кг.

Согласно расчетам, величина \mathcal{E} по (4), приходящаяся на один канал теплоутилизатора с оптимальными характеристиками, составляет $2,95 \cdot 10^3$ руб/год при Цм = 50 руб/кг и она равна $3,7 \cdot 10^3$ руб/год при Цм = 300 руб/кг. Полная экономия, получаемая при использовании теплоутилизатора, может быть определена умножением приведенных выше значений \mathcal{E} на число каналов n , определяемое по формуле (3) и зависящее от расходов G потоков теплоносителей.

Список литературы

1. Патент №2416764 РФ, МПК F 24 F 7/0. Теплоутилизатор/ Печенегов Ю.Я., Яковлева В.М., Шаров А.В., Абакумов Ю.В. // Открытия. Изобретения. 2011. № 11.
2. Печенегов Ю.Я. Технико-экономический анализ и методика расчета оптимизированных пластинчатых теплоутилизаторов // Промышленная энергетика. 2013. № 3. С. 46-49.

УДК 66.092-977

КОНДУКТИВНАЯ СУШКА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ CONDUCTIVE DRYING OF WOOD WASTE GASIFICATION

Н.Ф. Тимербаев, З.Г. Саттарова, Р.Р. Зиятдинов, Л.Р. Смирнова, М.Н. Суходова
N. F. Timerbaev, Z. G. Sattarova, R. R. Ziatdinov, R. L. Smirnova, M. N. Sukhodova

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия,
Казань, (e-mail: kstu.ru).

Kazan national research technological university, Russia, Kazan

Аннотация: В тезисе описан газогенератор для газификации влажного топлива с дополнительной зоной кондуктивной сушки.

Abstract: the thesis describes the gasifier for the gasification of wet fuel with additional conductive zone of drying.

Ключевые слова: кондуктивная сушка; утилизация древесных отходов; газификация.

Keywords: conductive drying; utilization of wood waste; gasification.

Утилизация древесных отходов – одна из важнейших проблем современного общества. Из-за низкого уровня технологических процессов деревообработки процент древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса может достигать 60%. Образующиеся древесные отходы в виде щепы, опилок, горбыля, срезов и стружек являются малоэффективными для использования в качестве топлива, из-за высокого уровня влажности. На сегодняшний день одним из самых распространенных методов

утилизации отходов древесины является – метод газификации, который включает в себя зоны сушки, пиролиза, горения и восстановления.

Увеличение влажности древесных отходов свыше 30% приводит к снижению содержания горючих компонентов и теплотворной способности генераторного газа. В связи с этим целесообразна предварительная сушка отходов перед газификацией. Для газификации высоковлажных древесных отходов, образующихся на лесозаготовительных производствах, разработаны газогенераторы с предварительной сушкой отходов. Конструкция узла сушки данных газификаторов зависит от фракционного состава древесных отходов и их геометрических размеров.

В случаях, когда контакт теплоносителя с древесными частицами не допустим, например, при необходимости одновременного извлечения из влажных древесных частиц экстрактивных веществ, целесообразно применять кондуктивный подвод тепла для предварительной сушки древесных частиц. Среди преимуществ кондуктивной сушки можно выделить высокую скорость обработки. Это связано с повышенной теплоотдачей, которая происходит в результате непосредственного контакта продукта с нагреваемой поверхностью. На рис. 1 показан газогенератор для газификации влажного топлива, состоящий из двух частей: верхней для подсушки топлива и нижней для пиролиза.

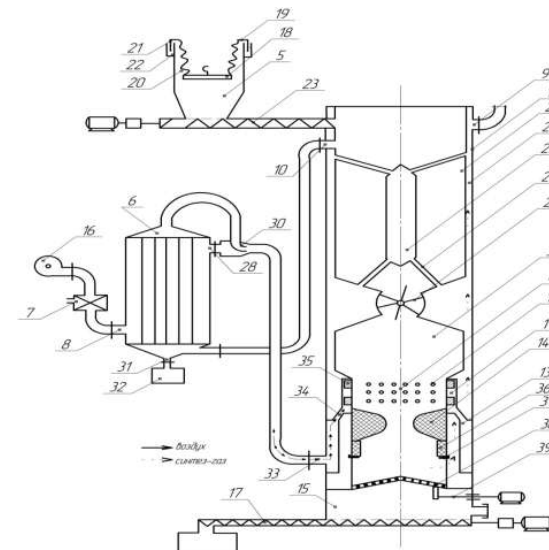
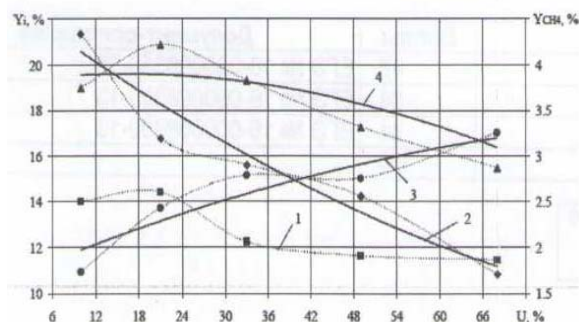


Рис. 1 Схема газогенератора для газификации влажного топлива.

Древесные отходы поступают в верхнюю часть бункера 2 для сушки, в которой установлены дополнительные нагревательные элементы в виде воздушной рубашки 24, осуществляющей прогревание отходов по периферии, и цилиндрического элемента 25, осуществляющего прогревание щепы изнутри бункера. Прогрев данных элементов осуществляется за счет поступления генераторного газа, образующегося в нижней части газификатора. Верхняя часть бункера для подсушки топлива 2 изолирована от нижней части бункера для пиролиза 3 лопастным барабанным питателем 27, который не позволяет проходить пиролизным газам.

Древесные отходы, соприкасаясь со стенками воздушной рубашки и цилиндрическим элементом, нагреваются. В связи с чем повышается их температура и уменьшается влажность. Образующийся в зоне сушки влажный воздух удаляется через патру-

бок 10. Подсушенные и прогретые древесные отходы поступают в зону пиролиза с последующей их газификацией.



Результаты экспериментальных исследований показывают (рис.2), что с уменьшением влажности древесных отходов увеличивается количество CO и содержание H₂. Так же можно отметить снижение выхода образуемого генераторного газа при увеличении влажности древесных отходов.

Список литературы

1. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Хисамиева, Т.Д. Исхаков. «Совершенствование техники и технологии процесса газификации высоковлажных древесных отходов», стр.3- 5.
2. Тимербаев, Н.Ф. Техника и технологии термической переработки отходов деревообрабатывающей промышленности (монография)/ Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова. – М-во образ. И науки РФ, Казан. Гос. Технол. Ун-т. – Казань: КГТУ, 2010.- 172с.
3. Просвирников, Д.Б. Получение фильтрующего материала на основе порошковой целлюлозы / Д.Б. Просвирников, И.Р. Ахметшин // Актуальны направления научных исследований XXI века: теория и практика.- 2014. –Т.2. - №3-2 (8-2). – С. 411-414.
4. Тимербаев, Н.Ф. Кондуктивный теплообмен дисперсного материала в установке для производства древесного угля / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Садретдинов, И.И. Хуснуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. - №18. - С.69-75.
5. Тимербаев, Н.Ф. Утилизация твердых отходов деревопереработки, содержащих токсичные вещества (статья)/ Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова. - Вестник Казанского технологического университета, 2011, №4, С.79-84.

УДК 536.2

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ СЛОИСТЫХ СИСТЕМ

В.С. Глазов*, М.В. Горелов**, М.Ю. Юркина***

V.S. Glazov*, M.V. Gorelov**, M.Y. Yurkin***

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва
(e-mail: tamurik@bk.ru)

**Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва
(e-mail: ioghan_vaiss@mail.ru)

***Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва
(e-mail: yurkinamy@mpei.ru)
National Research University "MPEI"

Аннотация: Рассмотрены способы расчета нестационарного температурного поля многослойной пористой системы при условии доминирующего влияния излучения от внешнего источника над теплопроводностью и собственным излучением слоистой системы.

Abstract: The methods of calculation of stationary temperature field of multilayer porous system subject to the dominant influence of radiation from an external source over the conductivity and own radiation of a layering system

Ключевые слова: многослойные системы, температурное поле, излучение
Keywords: multilayer system, temperature field, radiation

Введение. Число работ, посвященных расчету температурного поля в многослойных системах, продолжает расти [1, 2, 3, 4, 5], что указывает на актуальность этой задачи. Известные из литературы [3, 4 и др.] точные аналитические решения, как правило, громоздки и из-за трудоемкости расчетов в инженерной практике применяются редко. Достаточно конкурентным подходом в решении поставленной задачи является метод (приближенный), основанный на замене многослойной системы её однослойной моделью, расчет температурного поля которой не вызывает больших затруднений. Согласно [1] при стационарных (или близких к ним) процессах геометрические параметры и теплотехнические характеристики многослойной пластины и её однослойной инженерной модели связаны между собой следующим образом

$$R_3^M = \sum_{n=1}^N R_n, \quad \frac{M}{3} = R_3^M / \sum_{n=1}^N (R_n / \frac{M}{n}), \quad c_3^M = (1/R_3^M) \sum_{n=1}^N (R_n c_n), \quad a_3^M = \frac{M}{3} / c_3^M.$$

Для резко нестационарных процессов в [6, 7] предлагаются следующие соотношения

$$R_3 = \sum_{n=1}^N R_n \sqrt{a_3 / a_n}, \quad c_3 = R_3^{-1} \sum_{n=1}^N (R_n c_n), \quad \alpha_{\phi} = a_3 c_3. \quad (1)$$

где a_3 принимает значение равно коэффициенту теплопроводности слоя, примыкающего к нагреваемой поверхности, или выбирается произвольно.

Эти два подхода опираются на условие преобладающего переноса тепловой энергии посредством теплопроводности. Если же переносы теплоты излучением и теплопроводностью сопоставимы по величине, то сведение одного механизма к другому (без знания эквивалентных значений коэффициентов переноса и интервалов, в пределах которых они верны) может привести к ошибочному результату.

Предложение. Ясно, что при доминирующем подводе энергии излучением и сопоставимости энергии, переносимой посредством теплопроводности и излучения, следует учитывать объемный механизм поглощения последнего. В этом случае необходимо дополнить систему соотношений (1) выражением (2)

$$Bu_3 = k_3 R_3 = \sum_{n=1}^N Bu_n \quad (2)$$

Тогда с учетом (1)-(2) температурное поле однослойной модели можно рассчитать по формуле

$$\vartheta(X, Fo) = (1 - \exp(-Bu))[Fo + (3X^2 - 1)/6 + Bu^{-2}] + (1 - 2X)/2 - \exp(-BuX)/Bu - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bu^2[1 - (-1)^n \exp(-Bu)] \cos(n\pi X)}{n^2 \pi^2 (Bu^2 + n^2 \pi^2)} \exp(-n^2 \pi^2 Fo) \quad (3)$$

где $\vartheta = (T - T_0)/(Rq_0)$, $X = x/R$, $Fo = at/R^2$.

Заметим, что при выполнении условия

$$atk^2 \ll 1, \quad (4)$$

температурное поле однослойной модели описывается выражением

$$T = T_0 + q_0 \tau (k_3/c_3) \exp(-k_3 x), \quad 0 \leq x \leq R_3 \quad (5)$$

Другой возможный путь определения температурного поля многослойной пластины заключается в последовательном проведении следующих операций:

1. Аппроксимация и сшивка (путем сглаживания) скачкообразного изменения теплофизических свойств многослойной пластины непрерывными функциями $c(x)$, $a(x)$ и $k(x)$.

2. Расчет эффективных параметров однослойной модели по формулам

$$R_3 = \sqrt{a_3} \int_0^R [a(x)]^{-1/2} dx, \quad c_3 = \frac{1}{R_3} \int_0^R c(x) dx, \quad k_3 = \frac{1}{R_3} \int_0^R k(x) dx.$$

3. Определение по условию (4) (при заданной погрешности) временного интервала $(0, \tau^*)$, в пределах которого можно пренебречь теплопроводностью и собственным излучением многослойной пластины и её модели.

В этом случае расчет температурного поля модельной пластины можно проводить по одному из следующих выражений:

$$\}} \text{right}) \cdot \tau \cdot \exp \left(- \{k\} \text{rsub} \{ \tau \} \text{rsup} \{ \tau \} x \text{right}) \right)$$

$$T = T_0 + q_0 \frac{c_3}{k_3}, \quad 0 \leq x \leq R_3, \quad 0 \leq \tau \leq \tau^*$$

$$T = T_0 + q_0 [k(x)/c(x)] \cdot \tau \cdot \exp \left[- \int_0^x k(x) dx \right], \quad 0 \leq x \leq R_3, \quad 0 \leq \tau \leq \tau^*,$$

В заключение отметим вариант описания формирования температурного поля в однослойной модели в условиях высокоинтенсивного нагрева излучением и конечной скоростью распространения теплоты посредством теплопроводности. Система уравнений (6)-(8) описывает один из возможных вариантов такого процесса.

$$\dot{T} + \tau_p \ddot{T} = aT'' + q(k/c) \exp(-kx) \quad (6)$$

$$T(x, 0) = f(x) \quad (7)$$

$$\dot{T}(x, 0) = \varphi(x) \quad (8)$$

При условии $aT'' \ll q(k/c) \exp(-kx)$ система (6)-(8) имеет решение (9)

$$T(x, \tau) = f(x) - \tau_p \left(1 - \exp(-\tau/\tau_p) \right) [q(k/c) \exp(-kx) - \varphi(x)] + q(k/c) \cdot \tau \cdot \exp(-kx) \quad (9)$$

Это решение верно при условии

$$\left| atk^2 [\tau/\tau_p - 1 + \exp(-\tau/\tau_p)] + \frac{af'' + a\tau_p(1 - \exp(-\tau/\tau_p)\varphi'')}{q(k/c) \exp(-kx)} \right| \ll 1$$

Если $f(x)$ и $\varphi(x)$ полиномы степени $n \leq 1$, то для использования выражения (9) необходимо выполнение условия

$$|atk^2 [\tau/\tau_p - 1 + \exp(-\tau/\tau_p)]| \ll 1$$

Заключение. Предлагаются варианты расчета нестационарного температурного поля при лучистом нагреве полупрозрачной многослойной системы по однослойной модели с эффективными теплофизическими свойствами. Даны выражения для определения коэффициентов переноса и условия, которые определяют интервал, где результаты расчета не превышают заданной вычислителем погрешности.

Список литературы

1. Беликов В.И., Шаронов О.В., Бойков Г.П. Определение эффективного значения температуропроводности плоской слоистой системы // Сб. Теплообмен и гидродинамика. – Красноярск: КПИ. – 1981. – С. 35-43.
2. Видин Ю.В. О нестационарной теплопроводности в слоистой среде // Инж. Физич. Журнал. -1968. –Т.14, 36. – С. 1048-1055.
3. Вольницкая Е.П. Расчет нестационарных температурных полей в слоистых средах // Изв. Вузов. Энергетика. – 1985. – №6. – С. 81-85.
4. Гузов Л.А. Нестационарная теплопроводность в многослойной пластине // Изв. Вузов. Энергетика. – 1979. – №11. – С. 65-69.
5. Коган М.Г. Нестационарная теплопроводность в слоистых телах // Журнал техн. Физика. – 1957. – Т. 57, вып. 3. – С. 522-531.
6. Бровкин Л.А., Гузов Л.А. Инженерный расчет нагрева многослойной пластины при граничных условиях первого рода // Изв. Вузов. Энергетика. – 1985. – №9. – С. 94-97.
7. Бровкин Л.А., Гузов Л.А. К выбору эффективных теплофизических параметров слоистого полуограниченного массива // Сб. Теплообмен и гидродинамика. – Красноярск: КПИ. – 1983. – С. 9-14. УДК 66.047.38: 633.1

СУШКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ DRYING OF AGRICULTURAL PRODUCTS WITH THE USE OF HEAT PUMPS

Д.С. Кашменский

Российский государственный аграрный университет –
МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия, Москва,
(e-mail: Kashmensky11@gmail.com)

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

Аннотация. Статья посвящена сушке сельскохозяйственных продуктов с применением тепловых насосов, в ней освещены основные проблемы сушки сельскохозяйственных продуктов. Также в статье предлагается решение данной проблемы с использованием нетрадиционных источников энергии, что позволит сократить энергозатраты на сушку сельскохозяйственных продуктов.

Abstract. This article is devoted to the drying of agricultural products with the use of heat pumps. The article highlights the main problems of drying of agricultural products. The article also offers a solution to this problem with the use of alternative energy sources, which will reduce costs for drying agricultural products.

Ключевые слова: сушка, сельскохозяйственная продукция, тепловой насос, нетрадиционные источники энергии, низкопотенциальная энергия.

Keywords: drying of agricultural products, heat pump, alternative energy sources, low potential energy, heat pump system.

Сушка сельскохозяйственной продукции является одним из основных процессов технологии сельскохозяйственного производства. Сушке подвергаются зерно, хлопок, сено, картофель и другие продукты. Сушкой подготавливают к длительному хранению яйца и молоко, превращая их в порошок [2].

Сушка сельскохозяйственной продукции является одним из энергоемких процессов в сельском хозяйстве. Основным энергоносителем для сушки служит жидкое топливо, газ и электроэнергия. Затраты топлива на сушку продукции растениеводства в настоящее время намного превышают затраты на его выращивание [4].

Использование интенсивных методов ведения сельского хозяйства приводит к необходимости сбора зерна с высоким содержанием влаги, что вызывает необходимость его искусственной сушки [4].

Например, в конвективных сушилках с электронагревом воздуха, расход электроэнергии составляет от 1,3 до 1,9 кВт/ч на 1 кг испаренной влаги, в терморadiaльных (инфракрасных) от 1,4 до 2,2 кВт/ч в высокочастотных от 1,8 до 3,5 кВт/ч [4].

Кризис в топливно-энергетическом комплексе и рост цен на все виды энергоресурсов требует поиска и внедрения энергосберегающих технологий и все более широкого использования возобновляемых источников энергии. Одним из решений данной проблемы является применение тепловых насосов, который использует низкопотенциальную энергию, взятой с окружающей среды.

Тепловой насос – это устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии к потребителю с более высокой температурой. Для обеспечения работы теплового насоса требуется электрическая энергия – это главный недостаток тепловых насосов [1].

Теплонасосная установка (ТНУ) состоит из теплового насоса и вспомогательного оборудования (вентиляторы, трубопроводы, системы энергоснабжения, контроля и регулирования). Основными узлами теплового насоса являются компрессор, конденсатор, испаритель и дроссель (регулирующий вентиль), связанные между собой системой трубопроводов для циркуляции рабочего тела.

В сушильных установках, работающих с тепловым насосом, в качестве вторичных энергетических ресурсов используют отработавший теплоноситель. Возврат теплоты осуществляется путем обратной конденсации содержащихся в нем водяных паров. Влажный отработавший теплоноситель охлаждается в испарителе теплового насоса до точки росы и осушается в результате конденсации влаги, затем нагревается в конденсаторе и подается в высушиваемый материал, после чего процесс повторяется [4]. Совмещение в этом процессе нагрева воздуха тепловым насосом и рекуперации тепла теплонасосной установкой делает процесс сушки эффективным.

Оценка технологии и техники сушки показывает, что реализация известных способов энергосбережения позволит получить экономии до 30% энергии и до 50% металла. Это равноценно обеспечению сушки всего прироста продукции без дополнительных затрат топливно-энергетических и материальных ресурсов. Применение тепловых насосов эффективно для низкотемпературных процессов [3].

Процесс сушки с применением тепловых насосов безопасный и экологичный, что позволяет использовать его в автоматическом режиме.

Список литературы

1. Рудобашта С.П. Теплотехника. Учебник. – М.: КолосС. 2010. – 600 с.
2. Клименко А.П. Сжиженные углеводородные газы. – Москва. 1962. 411с.
3. В.И. Муштаев. Сушка дисперсных материалов. – М.: Химия. 1988г. 352с.
4. <http://mehanizator-ua.ru/>

УДК 66.081.6

ДИФфуЗИОННАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ МЕМБРАНЫ МГА-95 ПРИ АКТИВНОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ПРОКАЧКИ РАСТВОРА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ АППАРАТА DIFFUSION PERMEABILITY MEMBRANE MGA-95 WITH THE ACTIVE SOLUTION TRANSFER IN A FLAT CHANNEL APPARATUS

С.В. Ковалев, С.И. Лазарев, Р.В. Попов

*Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,
(e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru)
S.V. Kovalev, S.I. Lazarev, R.V. Popov
Tambov State Technical University
(e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru)*

Аннотация: в работе представлены результаты экспериментальных исследований по определению коэффициентов диффузионной проницаемости мембраны МГА-95.

Abstract: the results of experimental studies to determine the diffusion coefficient permeability MGA-95.

Ключевые слова: диффузия, мембрана, раствор, процесс.

Keywords: diffusion, membrane, solution process.

Процессы мембранного разделения растворов активно используются в промышленности для очистки сточных вод и технологических растворов, наряду с традиционными методами извлечения растворенных органических и неорганических веществ. Изучение некоторых особенностей процессов мембранного разделения растворов наталкивается на необходимость изучения кинетических характеристик через полупроницаемые перегородки, одной из которых является диффузионная проницаемость. Интересными с точки зрения практики являются эксперименты, в которых используется активный гидродинамический режим прокачки раствора над поверхностью мембран и движения среды по разные стороны мембран прямотоком и противотоком.

Цель работы: исследование диффузионной проницаемости мембраны МГА-95 при активном гидродинамическом режиме прокачки раствора (прямоток, противоток).

При разработке математических моделей процессов разделения растворов баромембранными и электробаромембранными методами и составлении методик расчета аппаратов плоскокамерного, рулонного и трубчатого типов необходимым является определение значений коэффициента диффузии в мембране.

Экспериментальным путем данный коэффициент определить сложно, что связано с несовершенством методик его определения, в практическом случае для инженерных методик расчета, разработке и усовершенствования математических моделей описания мембранных процессов можно использовать при расчете диффузионной проницаемости пористых полимерных перегородок (мембран). Хотя вклад диффузионного потока в общую схему процессов массопереноса при электробаромембранном и баромембранном разделении незначителен, он необходим экспериментатору для изучения, так как дополняет физическую картину познания изучаемого процесса разделения растворов и без него обойтись нельзя.

Исследование диффузионной проницаемости мембран проводилось на экспериментальной установке и по методике, представленной в работе [1], при сравнении двух вариантов циркуляции растворов над и под мембраной (прямоток (рис. 1) и противоток (рис. 2)).

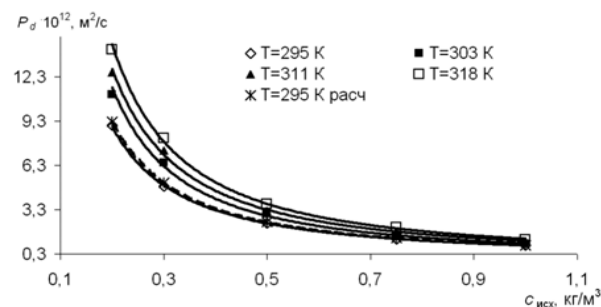


Рисунок 1. Зависимость коэффициента диффузионной проницаемости мембраны МГА-80 П от концентрации и температуры водного раствора сульфата железа (сплошная линия – эксперимент; штриховая линия – расчет) (прямоток)

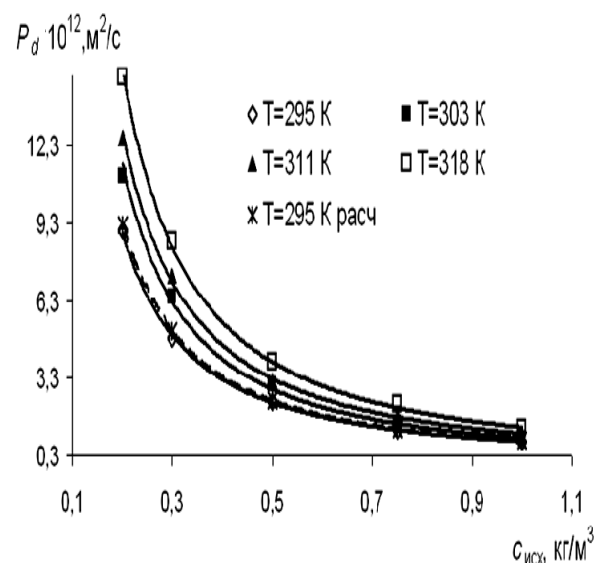


Рисунок 2. Зависимость коэффициента диффузионной проницаемости мембраны МГА-80 П от концентрации и температуры водного раствора сульфата железа (сплошная линия – эксперимент; штриховая линия – расчет) (противоток)

При увеличении температуры раствора коэффициенты диффузионной проницаемости для мембран МГА-80 П, (рис. 1 и 2) возрастают для исследованных растворов сульфатов железа, цинка и олова, что соответствует известным фактам о влиянии температуры раствора на диффузию воды в полимерных перегородках [2].

При увеличении концентрации растворенного вещества в растворе при прокачки раствора над поверхностью мембраны, (рис. 1 и 2) в полупроницаемой перегородке происходит насыщение растворенным веществом преимущественно порового пространства за счет сорбционных процессов, данный процесс суживает и даже полностью блокирует, вероятно, внутрипоровое пространство, что сказывается на снижении коэффициента диффузионной проницаемости [3].

Можно отметить также тот факт, что при подачи исходного раствора (сульфата цинка и железа) и дистиллированной воды по разные стороны мембраны при активном гидродинамическом режиме прокачки при прямотоке и противотоке для мембраны МГА-80 П незначительно влияет на различие значений коэффициентов диффузионной проницаемости от концентрации исходного раствора.

Список литературы

1. Ковалев, С.В. и др. Исследования коэффициентов диффузионной проницаемости сульфата олова на проточной мембранной установке плоскокамерного типа / С.В. Ковалев, С.И. Лазарев, А.В. Эрлих и др. // Известия вузов. Химия и химическая технология. - 2011. - Т. 54. Вып. 2. - С. 65–67.
2. Николаев, Н.И. Диффузия в мембранах. / Н.И. Николаев.- М.: Химия, 1980. – 232 с.
3. Мамонтов, В.В. Кинетика обратноосмотической очистки минерализованных растворов предприятий ТЭЦ: дис. канд.тех.наук: 05.17.08: защищена 2007: утв.2008 / Мамонтов Василий Васильевич. – Тамбов, 2007. –193 с.

УДК 628.16.08

УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННАЯ ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНОГО МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ THE ULTRAFILTRATION OF SECONDARY RAW MILK

Владимир Ю. Богомолов, Сергей И. Лазарев, Сергей А. Вязовов*
Vladimir Y. Bogomolov, Sergey I. Lazarev, Sergey A. Viazovov*

*Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
(e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru)

Аннотация: В работе приведен расчет стадии предварительного ультрафильтрационного концентрирования перед стадией сушки вторичного молочного сырья. В совокупности две стадии позволяют получать конечный продукт – концентрат сывороточного белка.

Abstract: The calculation of preliminary ultrafiltration before drying of secondary raw milk. Together both steps allow to obtain final product - whey protein concentrate.

Ключевые слова: сухой белковый концентрат, ультрафильтрация, расчет.

Keywords: dry protein concentrate, ultrafiltration, calculation.

При производстве одного из самых популярных продуктов переработки молока – сыра - 80–90% массы исходного молока приходится на молочную (подсырную) сыворотку, которая и является основным отходом сыродельных производств. Состав подсырной сыворотки зависит от вида вырабатываемого сыра и его жирности. В сыворотку переходят практически все соли и микроэлементы молока, а также водорастворимые витамины. Использование этих полезных компонентов возможно в виде сухого сывороточного концентрата – КСБ. Для его получения необходимо организовать технологический процесс сушки. Однако, как показывает практика, наиболее эффективной является сушка предварительно сконцентрированного продукта.[1]

Рассчитаем установку для ультрафильтрационного концентрирования подсырной сыворотки, исходя из объемов ее образования в технологическом цикле Бондарского сыродельного завода. Для этого, разделим объем сыворотки, образующейся после разгрузки сыроизготовителей на четыре параллельных потока с таким расчетом, чтобы до поступления следующей партии сыворотки полностью переработать уже имеющуюся.

Таким образом, необходимо спроектировать четыре аналогичные мембранные установки, производительностью по исходной сыворотке $L=0,555$ кг/с каждая.

Исходная концентрация белка в сыворотке составляет $x_{1n} = 0,8\%$ (масс.) белка, при содержании 3% неорганических солей. Концентрирование следует осуществлять до $x_{1n} = 40\%$ (масс.) с последующей сушкой. Содержание белка в пермеате не должно превышать 0,3% (масс.).

Учитывая легкую сбраживаемость сыворотки при повышенных температурах, прием в качестве рабочей температуры $t=20^\circ\text{C}$. Классическим давлением в процессах ультрафильтрации является 0,1 – 0,3 МПа, однако из-за малых коэффициентов диффузии белков работа при высоких давлениях приводит к резкому увеличению толщины поляризационного слоя на мембране. А при низких давлениях падает производительность установок, поэтому прием перепада рабочего давления $\Delta P=0,2$ МПа.

Наиболее доступными мембранами с хорошими характеристиками сегодня являются ацетатцеллюлозные мембраны УАМ, выпускаемые в г.Владимир. Будем производить выбор из этой линейки мембран. Для этого определим истинную селективность мембран различной производительности по сывороточным белкам (примем для расчета сывороточный альбумин).

Найдем отношение диаметра молекул к диаметру пор мембраны. В интервал $\frac{d_{\text{мол}}}{d_{\text{пор}}} > 0,5$ попадают мембраны УАМ-30, УАМ-50 и УАМ-100. Значения отношения диаметров соответственно равны 2,13; 1,28 и 0,64. Рассмотрим наиболее производительную из этих мембран – УАМ-100. По графику селективности определим истинную селективность $\phi_u = 0,997$. В первом приближении примем, что наблюдаемая селективность равна истинной и вычислим степень концентрирования K .

$$K = \frac{x_{1k}}{x_{1n}} = 50.$$

Тогда средняя концентрация белка в пермеате

$$x_2 = \frac{x_{1n} \left(1 - K^{-\frac{1-\phi}{\phi}} \right)}{1 - K^{-\frac{1}{\phi}}} = 0,01\%.$$

Полученное значение ниже допустимых 0,3% белка в пермеате, поэтому выбираем рассматриваемую мембрану УАМ-100.

Определим удельную производительность данной мембраны по чистой воде

$$G_0 = A \Delta P = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)},$$

где константа проницаемости $A=1,7 \cdot 10^{-2}$ кг/(м²·с·МПа).

Для перехода к удельной производительности в рабочей среде воспользуемся коэффициентом динамической вязкости

$$\mu = \nu \rho = 0,000935 \text{ кг/(м} \cdot \text{с)},$$

где коэффициент кинематической вязкости $\nu=0,919 \cdot 10^{-6}$ м²/с и плотность $\rho=1017$ кг/м³ взяты для 3% раствора соли.

$$G = \frac{G_0 \mu_0}{\mu} = 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Расход пермеата L_p вычисляем, считая, что наблюдаемая селективность равна истинной

$$L_n = L_p (1 - K)^{-\frac{1}{\phi}} = 0,544 \text{ кг/с}.$$

Рабочая поверхность мембраны

$$F = \frac{L_n}{G} = 167,4 \text{ м}^2.$$

Расход концентрата

$$L_k = L_n - L_p = 0,011 \text{ кг/с}.$$

Таким образом, обеспечивается подача на стадию сушки 0,011 кг/с концентрированного раствора сывороточного белка. Такое предварительное концентрирование позволяет повысить энергоэффективность [2] процесса сушки, снизить нагрузку на сушильное оборудование и повысить качество конечного продукта [3].

Список литературы

1. Храмов А.Г. Феномен молочной сыворотки. – СПб.: Профессия, 2011. – 804 с.
2. Полянский К.К., Шапошник В.А., Пономарев А.Н. Деминерализация молочной сыворотки электродиализом. – Молочная промышленность №10, 2004. – с.48 – 49.
3. Богомолов В.Ю., Лазарев С.И., Головин Ю.А., Полянский К.К. Баромембранная очистка сточных вод от продуктов сыроделия. - Сыроделие и маслоделие. М., 2013. №6. С. 56-58.

УДК 66. 067. 38:668

ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД CROMIUM-CONTAINING REVERSE OSMOSIS CONCENTRATION WASTEWATER

Д.О. Абоносимов, С.И. Лазарев, О.А. Абоносимов
D.O. Abonosimov, S.I. Lazarev, O.A. Abonosimov

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

Аннотация: В работе рассмотрена проблема очистки сточных вод гальванопроизводств. Представлены основные методы очистки сточных вод и обосновано преимущество мембранных методов. Рассмотрены основные кинетические характеристики баромембранного разделения растворов, к которым относятся диффузионная, гидродинамическая проницаемости и коэффициент задержания. Оценено влияние концентрации, температуры и давления на основные кинетические характеристики баромембранного разделения растворов.

Abstract: The paper considers the problem of electroplating wastewater treatment. The main methods of wastewater treatment and reasonable advantage of membrane methods. The main kinetic characteristics baromembrane separation solutions, which include diffusion, hydrodynamic permeability coefficient detention. The influence of concentration, temperature and pressure on the main kinetic characteristics baromembrane separation solutions.

Ключевые слова: гальваническое производство; обратноосмотическая мембрана; диффузионная проницаемость; гидродинамическая проницаемость; коэффициент задержания.

Keywords: galvanic production; reverse osmosis membrane; diffusion permeability; hydrodynamic permeability; coefficient of detention.

Гальваническое производство является одним из наиболее опасных источников загрязнения окружающей среды, главным образом поверхностных и подземных водо-

ёмов, ввиду образования большого объёма сточных вод, содержащих вредные примеси тяжёлых металлов, в основном хромсодержащих.

Попадание неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод и других видов отходов, содержащих цветные металлы, в водные объекты наносит ущерб народному хозяйству и окружающей природе не только из-за потерь, используемых в производстве металлов, но и вследствие огромного негативного воздействия на окружающую среду.

Одним из путей решения данной проблемы является создание малоотходных и безотходных экологически безопасных технологических процессов нанесения гальванических покрытий и очистки сточных вод, при которых достигается минимальный расход металлов и минимальное негативное воздействие на окружающую природную среду.

На сегодняшний день мембранные системы очистки воды являются одним из самых эффективных и качественных методов очистки сточных вод. Они являются наиболее продуктивными и представляют собой комплекс из особых полупроницаемых мембран, отделяющих фильтрат от очищаемой суспензии. Жидкая часть загрязненной субстанции проходит сквозь перегородку, а механические частицы задерживаются мембранным фильтром.

Среди мембранных методов наиболее востребованными являются баромембранные процессы, в которых перенос вещества через мембрану происходит под действием разности давлений. В их число, прежде всего, входят микрофильтрация и ультрафильтрация (И.Бехгольд, 1907 г.) и обратный осмос (И.Манегольд, 1929 г.) [1–3].

Основными из наиболее важных параметров процесса баромембранного разделения является диффузионная, гидродинамическая проницаемость и коэффициент задержания. Коэффициент задержания зависит от многих факторов: типа системы мембрана-раствор, давления, температуры и концентрации и гидродинамики процесса [1–3].

Многие вопросы диффузионной проницаемости в мембранах объясняются исходя из общих положений диффузии в полимерных системах. Величина диффузионной проницаемости зависит от типа полимерной матрицы мембраны, вида растворителя и растворенного вещества, концентрации и температуры раствора.

Гидродинамическая проницаемость (водопроницаемость) мембран оценивается объемом жидкости, прошедшей через единицу поверхности мембраны за единицу времени при единичном перепаде давления.

На величину водопроницаемости при разделении растворов влияет давление, под которым находится разделяемый раствор, температура раствора, концентрация растворенных веществ в растворе и природа растворенного вещества.

Чаще всего при инженерных расчетах (определение рабочей площади мембраны) используют экспериментальные данные по гидродинамической проницаемости (водопроницаемости) в зависимости от ряда факторов (давления, температуры, скорости течения раствора и вида растворенного вещества). На рисунке 1 представлена зависимость коэффициента гидродинамической проницаемости мембраны МГА-95 от температуры и скорости течения раствора $K_2Cr_2O_7$.

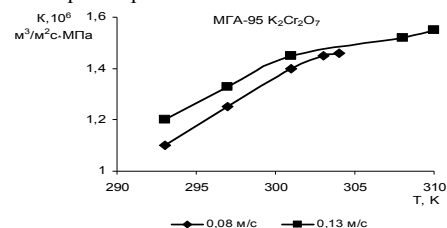


Рис.1. Зависимость коэффициента гидродинамической проницаемости мембраны МГА-95 от температуры и скорости течения раствора $K_2Cr_2O_7$

Коэффициент задержания зависит от многих факторов: типа системы мембрана-раствор, давления, температуры и концентрации и гидродинамики процесса [1–3].

Обратный осмос рекомендуется использовать при следующей концентрации стоков: для одновалентных солей - не более 5-10 %; для двухвалентных - 10-15 %; для многовалентных - 15-20 %.

Данный метод обладает рядом преимуществ: возможность очистки до требований ПДК, возврат очищенной воды до 60% в оборотный цикл, возможность утилизации тяжелых металлов. Но также имеются и недостатки: необходимость предварительной очистки сточных вод от масел, ПАВ, растворителей, органики, взвешенных веществ, дефицитность и дороговизна мембран, сложность эксплуатации, высокие требования к герметичности установок и отсутствие селективности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания.

Список литературы

1. Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы. М.: Химия, 1986. 272 с.
2. Мулдер М. Введение в мембранную технологию / под ред. Ю.П.Ямпольского, В.П.Дубяги. М.: Мир, 1999. 513 с.
3. Шапошник В.А. Мембранные методы разделения смесей веществ // Соросовский образоват. журн. 1999. № 9. С. 27–32

УДК 641.78:664

ФИЛЬТРАЦИОННАЯ СУШКА ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ ДАВЛЕНИИ DRYING FILTRATION UNDER ELEVATED PRESSURE

Владимир Потапов, Олег Гриценко
Volodymyr Potapov, Oleg Gritsenko

*Харьковский государственный университет питания и торговли, Украина, Харьков,
(e-mail: potapov@bigmir.net).*

Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Ukraine, Kharkiv

Аннотация: Описан новый метод фильтрационной сушки в тепло-массообменном модуле под действием повышенного давления. Проведено сравнение удельных энергозатрат конвективной сушки и сушки в тепло-массообменном модуле под действием повышенного давления. Показано, что предложенный способ сушки приводит к снижению удельных энергозатрат на процесс сушки в 1,5...2 раза.

Abstract: A new method of filtration drying in the heat-mass exchange module under the elevated pressure is presented. A comparison of specific energy for convective drying and drying in the heat-mass exchange module under elevated pressure were done. It is shown that the proposed method of drying leads to decrease in specific energy consumption for the drying process is 1.5 ... 2 times.

Ключевые слова: сушка; тепло-массообменный модуль; повышенное давление; энергоэффективность.

Keywords: drying; Heat mass transfer module; elevated pressure; energy efficiency..

Наиболее энергоемкими являются тепло и массообменные процессы, и в первую очередь процесс сушки, как универсальный и безопасный способ консервирования. На процессы сушки тратится 25% потребления энергии промышленно развитых стран, а в пищевой и перерабатывающей промышленности до 30% [1]. Анализ современных технологий сушки показывает, что наибольшее применение в пищевой промышленности получил конвективный метод сушки. В то же время удельные энергозатраты современ-

ных конвективных сушилок составляют 4000 ... 9000 кДж / кг испаренной влаги, что в 2 ... 4 раза больше теоретического минимума на испарение 1 кг воды. Одной из причин является то, что 20 ... 30% потерь энергии приходится на потери с сушильным агентом, который выбрасывается в окружающую среду при повышенной температуре, что приводит также к ухудшению экологической ситуации.

Основными современными методами повышения энергоэффективности и экологичности процессов сушки являются: утилизация тепла уходящего сушильного агента, принудительная осушка сушильного агента с целью интенсификации массообмена, рециркуляция сушильного агента, автоматическое регулирование режимов обезвоживания..

В Харьковском государственном университете питания и торговли активно развивается научное направление в теории и технике сушки, основанное на концепции адресной доставки энергии к высушиваемому материалу: это сушка смешанным теплоподводом (СТП-сушка) [2], вакуумно-микроволновая сушка [3], фильтрационная сушка в тепло-массообменном модуле (ТМОМ) при повышенном давлении [4]. Согласно последнему способу, мелкодисперсный или зернистый влажный материал размещается в герметичном ТМОМ, в котором создается избыточное давление с помощью внешнего компрессора (рис.1). При этом в результате сжатия воздуха в компрессоре он нагревается до требуемой температуры. При фильтрации воздуха через пористый влажный материал он полностью насыщается и конденсируется, а затем под действием избыточного давления парожидкостная смесь выводится из ТМОМ. При этом сушильный агент полностью использует свой сушильный потенциал, охлаждаясь до температуры окружающей среды.

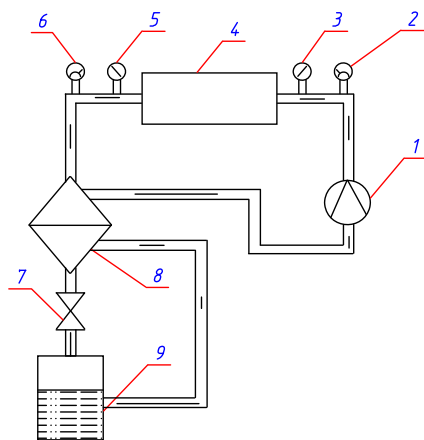


Рисунок 1. Схема фильтрационной сушилки в тепло-массообменном модуле при повышенном давлении;

1 - компрессор; 2,6 - датчики температуры; 3,5 - датчики давления; 4 – тепло-массообменный модуль; 7 - дроссель; 8 - теплообменник; 9 - влагоотделитель.

После выхода из ТМОМ насыщенный влажный воздух охлаждается в теплообменнике и дросселируется. Конденсат поступает во влагоотделитель, а осушенный воздух вновь нагнетается компрессором в ТМОМ. В результате такой способа сушки отсутствуют потери теплоты с уходящим сушильным агентом, которые, как указано, выше являются основной причиной низкого КПД конвективных сушилок, также отсутствуют выбросы отработанного сушильного агента в окружающую среду. Отсутствует калори-

фер, энергия адиабатического сжатия непосредственно превращается в теплоту, а сушильный агент адресно доставляется к каждой дисперсной частице за счет высокого давления. Наличие влагоотделителя позволяет собирать ароматические и пигментные вещества, уходящие с паром, и использовать их в дальнейшем. Нетрудно оценить энергоэффективность сушки под давлением и конвективной сушки. При сушке под давлением теплота передается сушильному агенту при адиабатическом процессе в компрессоре, при конвективной сушки сушильный агент нагревается изобарически. Исходя из этого было получено следующее выражение

$$q_{\text{филт}} = \frac{B_0}{\gamma - 1} \frac{T - T_0}{T_0} \left[\frac{v}{d_2 - d_0} \right], \quad (1)$$

$$q_{\text{конв}} = \rho C (T - T_0) \left[\frac{v}{d_2 - d_0} \right]. \quad (2)$$

$q_{\text{филт}}$, $q_{\text{конв}}$ - удельные энергозатраты для фильтрационной сушке под давлением и конвективной сушки, Дж/кг; B_0 - давление на входе в компрессор, Па; \square - показатель адиабаты для воздуха: \square - плотность воздуха, кг/м³; \square - удельный объем воздуха, м³/кг; T_0 , T - температура на входе в компрессор (калорифер), температура сушильного агента после компрессора (калорифера); C - удельная теплоемкость воздуха, Дж/кг; d_0 , d_2 - влагосодержание воздуха на входе и выходе из сушилки.

Если положить величину в квадратных скобках одинаковой для обоих способов сушки, то сушки, то для нормальных условий для воздуха и одинаковых температурах T на входе в сушильную камеру отношение $q_{\text{филт}}/q_{\text{конв}}=0,7$, то есть нагрев воздуха в компрессоре в 1.4 раза эффективнее, чем нагрев в калорифере

Список литературы

1. Kudra, T. Energy aspects in drying// Drying Technology. 2004. Vol.22, №5. P. 917-932..
2. Погожих М. І. Наукові основи теорії й техніки сушіння харчової сировини в масообмінних модулях: дис... д-р техн. наук : 05.18.12 : захищена 04.06.2002 / Погожих Микола Іванович. – Х., 2002. – 331 с.
3. Михайлова С.В. Використання мікрохвильової вакуумної обробки в процесах виробництва овочевих концентратів: дис... канд. техн. наук : 05.18.12: захищена 19.05.2014 / Михайлова Світлана Володимирівна. – Х., 2014. – 182 с.
4. Потапов В.А. Гриценко О.Ю, Пономаренко Ю.О. Исследование процесса сушки в массообменных модулях под действием повышенного давления // Прогрессивная техника и технологии пищевых производств ресторанного хозяйства и торговли: сб. наук. пр. Х.: ХГУПТ, 2013. С 148 – 153.

УДК 621.577

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕХОДА НА АВТОНОМНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ОТ ВОЗДУШНОЙ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РОССИИ

И.В. Яковлев*, И.В. Парёхина**, А.М. Исхакова***

I.V. Yakovlev*, I.V. Parezina**, A.M. Iskhakova***

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский университет

«Московский энергетический институт», Россия, Москва

(*e-mail: YakovlevIV@mpei.ru)

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

(***)e-mail: KoltikovaAM@mpei.ru)

National Research University «Moscow power engineering institute»,
Russia, Moscow

Аннотация: работа посвящена анализу возможности перехода на автономное теплоснабжение от воздушной парокомпрессионной теплонасосной установки (ТНУ) в условиях климата России. На примерах показано, что экономически и энергетически такой переход может быть выгоден в зависимости от климатических условий и соотношения тарифов на тепловую и электрическую энергию.

Abstract: The paper analyzes the possibility of switching to autonomous heat supply of the air vapor compression heat pump system in the climatic conditions of Russia. The example shows that this transition may be beneficial economically and energetically, depending on the climatic conditions and the ratio of tariffs for electricity and heat.

Ключевые слова: теплонасосная установка; автономное теплоснабжение; относительная теплопроизводительность ТНУ; электрическая мощность; электрическая энергия; коэффициент обеспеченности отопительной нагрузки; климат России.

Keywords: heat pump system; autonomous heat supply; relative heat productivity heat pump system; electric power; electrical energy; a ratio of the heating load; climate Russia.

В настоящее время теплонасосные установки (ТНУ) получили повсеместное широкое распространение. В Северной Европе широко применяются ТНУ, где в качестве низкопотенциальных источников тепла могут быть использованы: наружный и вытяжной воздух, тепло грунта, подземные воды (артезианские, грунтовые, термальные), вода естественных и искусственных водоемов. Наибольшее распространение получили воздушные ТНУ, которые позволяют использовать низкопотенциальное тепло наружного воздуха для отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования зданий в летний период.

В России также существуют примеры использования ТНУ для теплоснабжения. Однако в нашей стране использование ТНУ для теплоснабжения зданий носит скорее единичный характер. Во многом это объясняется большим колебанием температур наружного воздуха в течение отопительного периода, а также соотношением тарифов на тепловую и электрическую энергию в регионах России. Чем ниже температура наружного воздуха тем больше теплоты требуется на отопление зданий. С другой стороны с понижением температуры источника (воздуха) снижается коэффициент трансформации теплоты и растет электрическая мощность, потребляемая ТНУ.

При теплоснабжении только от тепловых насосов и пиковых электродотлов вводим коэффициент обеспеченности отопительной нагрузки, равный $a = \frac{Q_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}}}{Q_0^{\text{ном}}}$, где $Q_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}}$ - но-

минальная теплопроизводительность ТНУ; $Q_0^{\text{ном}}$ - расчетная отопительная нагрузка. То-

гда при $a=1$ $\bar{Q}_{\text{ТНУ}} = \frac{t_b^p - t_n}{t_b^p - t_n^p}$; при $a < 1$ $\bar{Q}_{\text{ТНУ}} < \frac{t_b^p - t_n}{t_b^p - t_n^p}$; при $a > 1$ $\bar{Q}_{\text{ТНУ}} > \frac{t_b^p - t_n}{t_b^p - t_n^p}$.

Выделяем три периода работы системы теплоснабжения (рис. 1). I период: $t_n^p < t_n < t_{n2}$, в данном периоде тепловая нагрузка обеспечивается электродотлом $Q_0 = Q_{\text{эк}}$, t_n^p - расчетная температура наружного воздуха, t_n - текущая температура наружного воздуха, t_{n2} - температура, до которой тепловая нагрузка обеспечивается только электродотлом. II период: $t_{n2} < t_n < t_{n1}$ - тепловая нагрузка обеспечивается и тепловым насосом и электродотлом $Q_0 = Q_{\text{ТНУ}} + Q_{\text{эк}}$. III период: $t_{n1} < t_n$ - тепловая нагрузка обеспечивается тепловым насосом $Q_0 = Q_{\text{ТНУ}}$; t_{n1} - температура, по превышении которой требуемая нагрузка полностью обеспечивается ТНУ (точка пересечения кривых на графике 1).

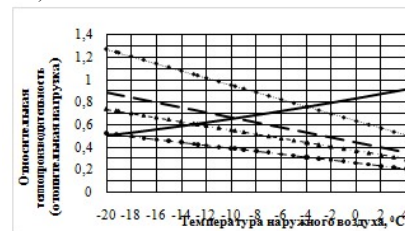


Рис. 1. Зависимость относительной теплопроизводительности ТНУ ($\bar{Q}_{\text{ТНУ}}$) и относительной отопительной нагрузки ($\frac{1}{a} \cdot \frac{t_b^p - t_n}{t_b^p - t_n^p}$) от температуры наружного воздуха при различных значениях коэффициента обеспеченности: ♦ $a = 0,7$, ▲ $a = 1,2$, ● $a = 1,7$, — $a = 1$, $\bar{Q}_{\text{ТНУ}}$.

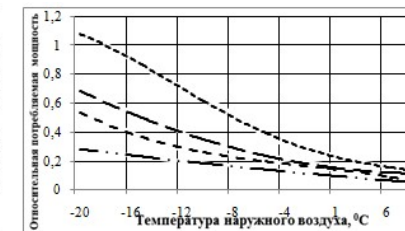


Рис. 2. Зависимость относительной электрической мощности, потребляемой теплоснабжающей установкой в зависимости от температуры наружного воздуха при различных значениях коэффициента обеспеченности: ---- $a = 0,7$, - - $a = 1$, - - $a = 1,2$, — $a = 1,7$.

Для каждого из периодов электрическая мощность, кВт, потребляемая электродотлом, ТНУ или при их совместной работе, рассчитывалась по следующим зависимостям: для I периода ($t_n^p < t_n < t_{n2}$) — по уравнению (1), для II периода ($t_{n2} < t_n < t_{n1}$) — по уравнению (2), для III периода ($t_{n1} < t_n$) — по уравнению (3).

$$P_{\text{ТНУ}}^I = Q_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}} \cdot \frac{1}{a \cdot \eta} \cdot \frac{t_b^p - t_n}{t_b^p - t_n^p}, \quad (1)$$

$$P_{\text{ТНУ}}^{II} = Q_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}} \cdot \left(\frac{\bar{Q}_{\text{ТНУ}}(t_{n1})}{\mu(t_{n1})} + \frac{1}{a \cdot \eta} \cdot \frac{t_b^p - t_n}{t_b^p - t_n^p} - \frac{\bar{Q}_{\text{ТНУ}}(t_{n1})}{\eta} \right), \quad (2)$$

$$P_{\text{ТНУ}}^{III} = Q_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}} \cdot \frac{1}{a \cdot \mu(t_{n1})} \cdot \frac{t_b^p - t_n}{t_b^p - t_n^p}, \quad (3)$$

Потребление электрической энергии, кВт ч, за период со средневзвешенной температурой определялось по формулам (4)-(6):

$$\mathcal{E}^I = Q_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}} \cdot \left(\frac{1}{a \cdot \eta} \cdot \frac{t_b^p - t_n}{t_b^p - t_n^p} \cdot \sum n_i \right), \quad (4)$$

$$\mathcal{E}^{II} = Q_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}} \cdot \left(\sum \left(\frac{\bar{Q}_{\text{ТНУ}}(t_{n1})}{\mu(t_{n1})} \cdot n_i + \frac{1}{a \cdot \eta} \cdot \frac{t_b^p - t_n^{\text{cp}}}{t_b^p - t_n^p} \cdot \sum n_i - \frac{1}{\eta} \sum (\bar{Q}_{\text{ТНУ}}(t_{n1}) \cdot n_i) \right) \right), \quad (5)$$

$$\mathcal{Q}^{III} = Q_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}} \cdot \frac{1}{a} \cdot \sum \left(\frac{1}{\mu(t_{n_i})} \cdot \frac{t_{\text{в}}^{\text{р}} - t_{\text{н}}^{\text{р}}}{t_{\text{в}}^{\text{р}} - t_{\text{н}}^{\text{р}}} \cdot n_i \right), \quad (6)$$

где $\mu(t_{n_i})$ – коэффициент трансформации теплоты, как функция температуры наружного воздуха, η – коэффициент полезного действия электродкотла, $t_{\text{в}}^{\text{р}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха для отопления, n_i – длительность периода со средней температурой $t_{\text{н}}^{\text{ср}}$, часов. Расчеты проводились с использованием фактических климатических данных (графики стояния заданных температур за отопительный период 2011-2012 гг.) для двух районов – г. Киров (Кировская область) и г. Волгоград (Волгоградская область). Рассмотрены возможности работы системы теплоснабжения только от воздушной ТНУ или полностью от тепловой сети. Результаты представлены на рис. 3. Эксплуатация воздушной ТНУ в условиях г. Кирова невыгодна, т.к. затраты на теплоснабжение от сети меньше затрат по оплате электрической энергии при применении ТНУ. В расчетах потребления энергоресурсов для условий г. Волгограда при коэффициенте обеспеченности отопительной нагрузки равным 1,7, существует экономия затрат на энергоносители. Автономное теплоснабжение от воздушной ТНУ не является безусловно энергоэффективным мероприятием, необходимо детально проводить технико-экономический анализ.

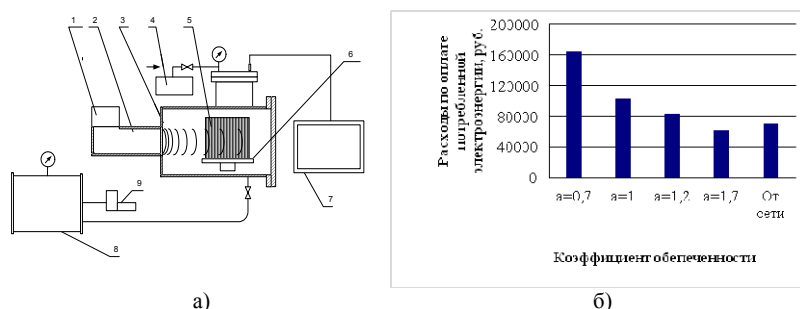


Рис. 3. Расходы по оплате электрической энергии, потребленной ТНУ, при различных значениях коэффициента обеспеченности и тепловой энергии, получаемой из тепловой сети. а) климатические условия Кировской области, $t_{\text{н}}^{\text{р}} = -33^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{н}}^{\text{ср}} = -8,7^{\circ}\text{C}$; б) климатические условия Волгоградской области, $t_{\text{н}}^{\text{р}} = -25^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{н}}^{\text{ср}} = -5,4^{\circ}\text{C}$.

УДК 672.86

ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТОВ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ HYDROTHERMAL TREATMENT OF MATERIALS BY THE USE OF THE PULSATING COMBUSTION UNITS

Михаил Александрович Терещенко*, Николай Васильевич Мозговой**

*Воронежский государственный технический университет,
Россия, Воронеж, (e-mail: mcclay@mail.ru).

**Воронежский государственный технический университет,
Россия, Воронеж, (e-mail: nv_moz@mail.ru).
Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh

Аннотация: В статье описывается пример повышения эффективности процесса термовлажностной обработки материалов за счет использования теплогенератора на основе аппарата пульсирующего горения. Приводится принципиальная схема такого теплогенератора, а так же предлагается одна из областей его применения.

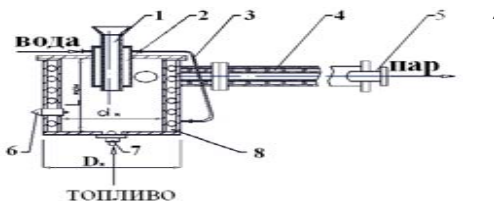
Abstract: The article describes an example of increasing the efficiency of hydrothermal treatment of materials by the use of heat source on the basis of the pulsating combustion unit. Is a schematic diagram of the heat generator, as well as the proposed one area of its application.

Ключевые слова: термовлажностная обработка материалов; аппараты пульсирующего горения; теплогенератор.

Keywords: hydrothermal treatment of materials; pulsating combustion apparatus; heat generator.

Процессы сушки и термовлажностной обработки материалов, как и другие теплотехнические процессы, в последнее время все больше и больше нуждаются в увеличении своей эффективности. Одним из перспективных направлений развития теплогенерирующего и энергетического оборудования является внедрение в них принципов пульсирующего горения, преимущества и недостатки которых уже были не раз описаны [1-3]. Главным из них является то, что процесс пульсирующего горения отличается наибольшей полнотой сгорания топлива. В настоящее время созданы товарные конструкции водонагревателей, теплогенераторов и парогенераторов, в которых реализован данный принцип. Например, использование аппаратов пульсирующего горения в процессе сушки позволяет получить высокие экологические и экономические результаты и дает возможность проводить обработку большого перечня материалов, вплоть до лекарственных препаратов. Усилия конструкторов и исследователей, работающих в области применения установок пульсирующего горения, сосредоточены на вопросах наиболее полного использования положительных эффектов пульсирующего в аппаратах теплоносителя в технологических процессах.

В процессе термовлажностной обработки материалов применение может найти парогенератор на основе аппарата пульсирующего горения с аэродинамическим клапаном. В нем используется камера сгорания вихревого типа, результаты испытаний которой приводятся в работе [1]. Принципиально схема парогенератора с рубашкой охлаждения на основе АПГ приведена на рис. 1.



1-аэродинамический клапан; 2- рубашка охлаждения клапана; 3- соединительная трубка; 4- рубашка охлаждения резонансной трубы; 5- выходной патрубок для пара; 6- электросвеча; 7- центробежная форсунка; 8- рубашка охлаждения камеры сгорания

Рис. 1. Парогенератор на основе АПГ с рубашкой охлаждения

Холодная вода, поступающая в рубашку охлаждения аэродинамического клапана через штуцер, как показано на рисунке 1, движется без ограничительных перегородок по всему щелевому зазору клапана. После этого она по соединительной трубке 3 попадает в рубашку охлаждения уже камеры сгорания 8. К камере сгорания тангенциально приварен патрубок, к которому при помощи фланцевого соединения можно крепить резонансную трубу различной длины и диаметра. Это позволяет изменять частоту автоколебательного процесса аппарата. Как фланец, так и резонансная труба имеют рубашку охлаждения. Щелевой зазор рубашки охлаждения резонансной трубы образован коаксиально расположенной внешней трубой. Для создания спирального канала в рубашке охлаждения использовалась навитая стальная проволока. Для выпуска подогретой воды на конце резонансной трубы расположен патрубок 5. В нем предусмотрена возможность установки и закрепления дроссельных шайб с различными диаметрами отверстий. При выходе воды в атмосферу, давление в струе резко падает и образуется насыщенный водяной пар. Процесс первоначального пуска аппарата пульсирующего горения обеспечивают расположенные на днище камеры сгорания центробежная форсунка 7, предназначенная для распыливания органического топлива, и электросвеча 6.

В ходе работы и исследования парогенератора на основе пульсирующего горения с аэродинамическим клапаном получено, что доля энергии топлива, которая используется в парогенераторе в тепловых процессах при получении пара и газообразного теплоносителя составляла до 95% [3]. Так как в этих процессах механическая работа не совершается, то по физическому смыслу эта величина является эксергетическим к.п.д. потока тепла. Не маловажно отметить и то, что в этих процессах потери связаны с необратимостью и в среднем составляли порядка 18,4% [1]. В аналогичных же процессах при стационарном горении (не связанном с пульсацией теплоносителя) они составляют 57,5%, т.е. они почти в 3 раза больше [3].

Процесс пульсирующего горения в АПГ характеризуется наличием потока газообразного теплоносителя с высокой скоростью и температурой. Этот поток создает импульс давления несущего потока на выходе из резонансной трубы. Это позволяет отказаться от дутьевого вентилятора, которым обычно снабжаются теплогенераторы стационарного горения, что в свою очередь положительно сказывается как на надежности конструкции, так и на простоте производства. Необходимо отметить, что конечное значение коэффициента полезного действия парогенератора будут зависеть от организации процессов использования тепловой энергии и энергии потока.

В качестве возможной области применения предлагается аграрная отрасль, например использование парогенератора для обогрева теплиц. Парогенератор помещается в звукоизолированный теплопункт. После включения парогенератора питательная вода подается циркуляционным насосом в его рубашку охлаждения. Газообразный теплоноситель направляется в систему труб для обогрева культивируемого грунта. Эти трубы располагаются на глубине 50...70 см ниже грунта. Они соединены с трубами, расположенными в объеме теплицы. Последние имеют отверстия для создания тепловых завес

вдоль наружных ограждений теплицы. Теплоноситель в виде пара через дроссель поступает в паропроводы теплицы. Трубы парового отопления на входе оборудуются устройством для разделения потока пара на две независимые системы. Одна из них служит для конденсации в ней пара и возврата конденсата через конденсатопровод в конденсационный бак. Вторая система паропроводов имеет отверстия, через которые пар поступает на обогрев верхнего остекления теплицы. Обогрев паром остекления приводит к подтаиванию снега на внешней поверхности, что способствует очистке верхнего остекления. На внутренней поверхности происходит конденсация водяного пара, который с помощью направляющих пластин может использоваться для полива растений.

Реализуемый в аппаратах пульсирующего горения процесс нестационарного сжигания топлива, помимо высокого к.п.д., позволяет получить более совершенные экологические показатели теплоносителя. Последнее замечание в процессе термовлажностной обработки материалов позволяет производить работы даже с продуктами питания и лекарственными препаратами.

Список литературы

1. Терещенко М.А., Мозговой Н.В., Быченко В.И. /Экспериментальное исследование парогенератора на основе пульсирующего горения и оценка его экологичности.// М:Теплоэнергетика.2009. №6. С. 69-72.
2. Мозговой Н.В., Терещенко М.А. Влияние процессов пульсации в камере сгорания аппаратов пульсирующего горения на выход окислов азота. // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т.4 №7. Воронеж: 2008. С. 73-76.
3. Быченко В.И., Мозговой Н.В., Терещенко М.А. /Парогенератор на основе пульсирующего горения для термовлажностной обработки материалов // Вестник ВГТУ Том № 2, №6, 2006 - Воронеж, 2006, С. 32-36.

Секция 8. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 66.03

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СУШИЛЬНЫХ РАСТВОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗДТ UTILIZATION OF HEAT OF THE DRYING AGENT FOR HEAT TREATMENT DRYING SOLUTIONS USING TPCT

Михаил П. Тюрин*, Елена С. Бородина**
Mikhail P. Tyurin*, Elena S. Borodina**

*Московский государственный университет дизайна и технологии
(e-mail: tjurinmp@yandex.ru)

**Московский государственный университет дизайна и технологии
(e-mail: pacht.ppss@gmail.com)

Moscow state university of design and technology (MSUTD)

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы использования теплоты сушильного агента для нагрева рабочих растворов с применением ЗДТ для повышения энергетической и экологической эффективности производства. Разработана конструкция закрытого двухфазного термосифона, промышленные испытания которого показали его высокую эффективность и позволили провести модернизацию технологического процесса.

Abstract: The paper describes issues of utilization of heat of the drying agent for heat treatment process solutions using TPCT for increasing energy and ecological efficiency of the manufacturing. The design of two-phase closed thermosyphon is proposed. Its industrial tests have shown its high efficiency and have made possible production modernization.

Ключевые слова: химическая технология; утилизация теплоты; термосифон; распылительная сушка; энергосбережение.

Keywords: chemical technology; heat recovery; thermosyphon; spray drying; energy conservation.

Важнейшей задачей в химической и текстильной отраслях промышленности является реализация малоотходных технологий путем рационализации технологических процессов, снижения сырьевых потерь и реализации возможных резервов экономии тепловой энергии. Одними из наиболее энергоемких процессов на химических и текстильных предприятиях являются процессы распылительной сушки, сопровождающиеся значительными нерациональными затратами тепловой энергии.

В качестве сушильного агента зачастую используются разбавленные воздухом дымовые газы специально сконструированной для этих целей топки с температурой 600 °С, использующей в качестве топлива природный газ. При этом обеспечение технологических процессов теплотой осуществляется от сторонних низкотемпературных тепловых источников (насыщенный пар ТЭЦ) с температурой 140 °С. Такое теплоснабжение приводит к неоправданно высоким тепловым и материальным потерям. Целесообразным является использование для этих целей теплоты топочных газов, т.е. использование одного источника теплоты.

При этом для реализации требуемых энергосберегающих мероприятий, как показал анализ с учетом конструктивных особенностей производства, требуется теплообменный аппарат небольших габаритных размеров с высокой теплопередающей способностью, в качестве которого было принято решение использовать закрытый двухфазный

термосифон (ЗДТ) [1]. Данное решение потребовало проведения дополнительных исследований с целью обеспечения требуемых характеристик такого аппарата [2].

Основой описания процессов переноса в ЗДТ служат системы дифференциальных уравнений сохранения массы, импульса и энергии для паровой и жидкой фаз теплоносителя. Дополненные уравнениями материального и теплового баланса, а также краевыми условиями они позволили получить с помощью метода конечных элементов численные решения для характеристик теплообменных процессов в ЗДТ. При этом рассматривалась осесимметричная краевая задача естественной конвекции в замкнутом цилиндрическом двухфазном термосифоне с теплопроводными стенками с учетом условий внешнего теплообмена в зонах испарителя и конденсатора термосифона, что позволило приблизить результаты теоретических исследований к реальным условиям эксплуатации [3].

Сравнение результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными на опытном образце термосифона, показали их хорошее согласование, что говорит об адекватности предложенной математической модели. Расхождения при этом находились в пределах погрешности экспериментальных исследований, т.е. не превышали 8%.

Исходя из анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований на опытных образцах термосифонов была разработана и запатентована конструкция термосифона, предназначенного для применения в технологической установке с целью использования теплоты топочных газов для нагрева рабочих растворов, служащих сырьем для получения пищевых фосфатов (рис. 1) [4].

В нижней части 1 теплообменного аппарата размещен испаритель термосифона, представляющий собой продольно оребренную трубу 3, находящуюся в смесительной камере смешения топки 16.

Конденсатор термосифона находится в верхней части аппарата 2 в нагревательном баке с фосфатными растворами 6 и представляет собой четыре трубы 5, наклонных под углом 60-80° к горизонтали и соединенных с испарителем 3 посредством переходной трубы 4. Такой наклон труб объясняется тем, что, как было выявлено в процессе исследований, он обеспечивает максимальный перенос теплоты от испарителя к конденсатору.

Нагревательный бак состоит из корпуса 6 с теплоизолированными пенофолом стенками (на рисунке теплоизоляция не показана) и патрубками 7 и 8 соответственно для ввода и вывода обогреваемого раствора. Патрубок 9 в нижней части корпуса 6 нагревательного бака, предназначен для опорожнения емкости корпуса 6. Кроме того нагревательный бак содержит расширитель 10 с патрубком 11 для вывода раствора в циркуляционный контур (на рисунке не показан).

Промышленные испытания термосифона показали его высокую эффективность и данная конструкция легла в основу промышленной установки (рис. 1).

На рис. 2 представлена полученная экспериментально зависимость производительности термосифона от температуры топочных газов при средней температуре нагре-

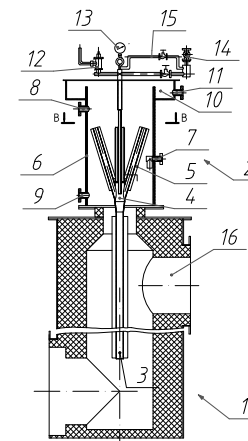


Рис. 1. Схема полупромышленной установки.

ваемого раствора в 50 °С. Из рисунка следует, что данная конструкция термосифона полностью обеспечивает требуемый нагрев растворов.

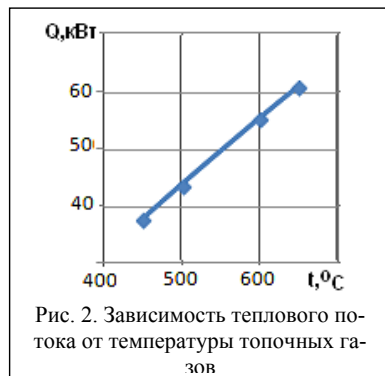


Рис. 2. Зависимость теплового потока от температуры топочных газов

Таким образом, на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана конструкция закрытого двухфазного термосифона, промышленные испытания которого показали его высокую эффективность и позволили провести модернизацию технологического процесса распылительной сушки с повышением его экологической и энергетической эффективности.

Список литературы.

1. Сажин Б. С. Теоретический анализ и разработка алгоритма расчета энергосберегающей конструкции на примере тепловой трубы [Текст] / Б. С. Сажин, Е. С. Бородина, Е. В. Отрубянников, Г. А. Кесоян / Химическая технология (Сборник тезисов докладов): IV Всерос. конф. по хим. тех., Всерос. молод. конф. по хим. тех., Всерос. школа по хим. тех. для мол. ученых и специалистов, Всерос. 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 (433 с.).
2. Тюрин М. П. Экспериментальное исследование процессов переноса в термосифоне как элементе энергосберегающей технологии при производстве солей на основе фосфорной кислоты [Текст] / М. П. Тюрин, Е. С. Бородина, Л. М. Кочетов, О. Г. Бельданова // Дизайн и технологии. – 2014. – № 39. – С. 28-33.
3. Тюрин М. П. Теоретическое моделирование процессов теплопереноса в двухфазном закрытом термосифоне [Текст] / М. П. Тюрин, Е. С. Бородина, Л. М. Кочетов, О. Г. Бельданова // Дизайн и технологии. – 2014. – № 41. – С. 55-59.
4. Пат. 2473856 Российская Федерация, МПК F 28 D 7 00, F 28 D 15 02. Теплообменный аппарат [Текст] / Бородина Е. С., Зиновьев В. В., Розанов И. Ю., Сажин Б. С., Кесоян Г. А.; заявитель и патентообладатель Бородина Е. С. – № 2011142397/06; заяв. 20.10.11; опубл. 27.01.13, Бюл. №3. – 7 с. : ил.

УДК 66.03

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ И ОЧИСТКА ВЫБРОСОВ ПОСЛЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ HEAT RECOVERY AND GAS TREATING AFTER SPRAY DRYING

Михаил П. Тюрин*, Елена С. Бородина**, Маргарита А. Апарушкина***
Mikhail P. Tyurin*, Elena S. Borodina**, Margarita A. Aparushkina***

*Московский государственный университет дизайна и технологии
(e-mail: tjurinmp@yandex.ru)

**Московский государственный университет дизайна и технологии
(e-mail: pacht.ppss@gmail.com)

***Московский государственный университет дизайна и технологии
(e-mail: paxt@yandex.ru)

Moscow State University of Design and Technology (MSUDT)

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы утилизации теплоты и очистки высокотемпературных газовых выбросов после агрегата распылительной сушки при производстве

пищевых фосфатов, предложена конструкция центробежного скруббера для утилизации теплоты и очистки выбросного нагретого воздуха.

Abstract: The paper describes issues of heat recovery and treating of the high-moisture gas after spray drying in the production of food phosphates. The design of centrifugal scrubber for heat recovery and treating of off hot gas is proposed.

Ключевые слова: химическая технология; сушка; утилизация теплоты; очистка газовых выбросов.

Keywords: chemical technology; drying; heat recovery; gas treating.

Одними из важнейших проблем химической и легкой промышленности, особенно в производстве сыпучих материалов, сопровождающихся их термической обработкой в потоке газа, являются проблемы экологической безопасности, заключающиеся в необходимости утилизации теплоты и очистки выбросных нагретых газов. Одним из примеров таких процессов является производство пищевых фосфатов в агрегате с распылительной сушкой на заводе ОАО «РЕАТЕКС».

При этом температура нагретых запыленных газов составляет 200 – 210 °С, запыленность газового потока – 5 мг/м³, медианный диаметр частиц пыли – 5 мкм при расходе пылевоздушной смеси $V = 9080 \text{ м}^3/\text{ч} = 11700 \text{ кг/ч}$ и влажностного содержания $d = 0,139 \text{ кг/кг с.в.}$, а сама фосфатная пыль является ценным сырьевым ресурсом.

Существует огромное число методов и средств снижения таких выбросов и утилизации их теплоты. Однако одним из наиболее эффективных в этом случае является использование скрубберного метода, обеспечивающего как мокрую очистку газов, так и нагрев технологической воды. При этом нагретая вода, содержащая пищевые фосфаты, может быть возвращена в технологическую цепочку производства пищевых фосфатов.

Для производства фосфатных продуктов на ОАО «РЕАТЭК» используется сушильная установка, в состав которой входит распылительная сушилка с дисковым диспергатором, пылеуловитель типа ВПУ и полый противоточный форсуночный скруббер, орошаемый водой. В качестве сушильного агента используются дымовые газы, образующиеся в топке при сгорании природного газа. Количество воды, испаряемой в сушилке составляет 600-700 кг/ч. Продукт, уловленный в скруббере, возвращается в технологический процесс.

Рис.1. Схема центробежного скруббера. А - вход газа из распылительной сушилки, из прокалочного аппарата и из системы пневмотранспорта; Г - выход газа; Д - вход воды; Е - выход воды.

цесс.

Основными недостатками такого скруббера являются:

1. Низкая эффективность улавливания пыли $\eta = 0,65$.
2. Значительный расход воды, используемой для орошения скруббера 1,0-1,2 л/м³.
3. Значительный капельный унос жидкости.

С целью повышения эффективности пылеулавливания с возвратом фосфатов в производство и повышения эффективности утилизации теплоты конструкция скруббера была модернизирована путем изменения ввода запыленных газов с центрального на тангенциальный и превращения полого противоточного скруббера в центробежный.

При этом скорость потока газа и соответственно интенсивность процессов тепло- и массообмена были существенно увеличены.

Конструкция вихревого центробежного скруббера представлена на рис. 1.

Орошение скруббера осуществляется с помощью одной или нескольких форсунок с широким факелом раскрытия, установленных по оси скруббера. Капли воды, распыляемой форсунками, достигают стенок скруббера и стекают по ней вниз в виде пленки. При этом создается двойной эффект контакта запыленного газа с жидкостью: в факелах распыла, перекрывающих поперечное сечение скруббера, и в пленке жидкости, стекающей по стенке.

На основании экспериментальных данных для центробежного скруббера удельный расход воды составляет около 0,4-0,6 л/м³ газа.

С учетом каплеуловителя, гидравлическое сопротивление (потери напора) центробежного скруббера не будут превышать 250 Па. Т.е. потери напора в центробежном и полом форсуночном скруббере практически одинаковы.

Расчет эффективности заключался в расчете эффективности пылеулавливания при отсутствии орошения с учетом, что вся пыль, достигшая стенок аппарата (пленки жидкости), захватывается орошающей водой, и дополнительной очистки за счет осаждения пыли на каплях жидкости. При этом эффективность сухой пылеочистки (осаждения пыли на пленке жидкости) составила $\eta_c=0,75$ и эффективность осаждения пыли на каплях $\eta_k=0,60$. Таким образом, суммарная эффективность очистки составила 0,90, что существенно выше, чем в полом противоточном скруббере.

При расчете эффективности предполагали, что осаждение твердых частиц на каплях жидкости происходит за счет трех механизмов: инерционного соударения, перехвата и диффузия. Суммарная эффективность осаждения на одиночной капле рассчитывается по формуле:

$$\eta_{oc} = 1 - (1 - \eta_{ic})(1 - \eta_n)(1 - \eta_d)$$

(1) где $\eta_{ic}, \eta_n, \eta_d$ - эффективность пылеулавливания от инерционного соударения, перехвата и диффузии.

На рис. 2 приведены зависимости фракционной эффективности пылеулавливания η и проскока K от размера частиц пыли.

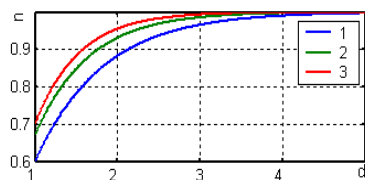
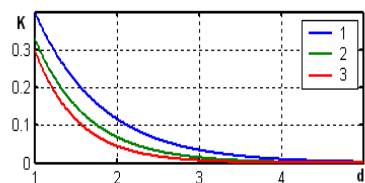


Рис. 2. Фракционная эффективность пылеулавливания η и коэффициент проскока K при $v_{xcp}=15 м/с$. 1 - $L/G = 0,4$; 2 - $L/G = 0,6$; 3 - $L/G = 0,8$



Для оценки эффективности утилизации теплоты в центробежном скруббере было получено соотношение для интенсивности теплообмена

$$Km_\alpha = \left(1 + \frac{\alpha_V \cdot m \cdot V_A \cdot e^{-\alpha_V \cdot m \cdot V_A}}{1 + Bm} \right)$$

$$(2) \text{ где } Km_\alpha = \frac{t_{2K} - t_{2N}}{t_{2N} - t_{2KH}} - \text{отношение разностей температур}; \quad m = \frac{1}{G_{жс} \cdot C_{pжс}} + \frac{1}{G_z \cdot C_{pz}};$$

$$Bm = (G_{жс} \cdot c_{pжс}) (G_z \cdot c_{pz})$$

После анализа составляющих уравнения (2) и соответствующих преобразований было получено критериальное уравнение для коэффициента интенсивности теплообмена, которое с учетом экспериментально полученных значений постоянных коэффициентов выглядит следующим образом:

$$Km = 5,91 \cdot Re^{-0,325} \cdot Bm_1^{-0,35}$$

(3) Таким образом, предложена конструкция центробежного скруббера для утилизации теплоты и очистки выбросного нагретого воздуха после агрегата распылительной суши.

Список литературы.

1. Сажин Б. С. Исследование процесса мокрого пылеулавливания в вихревом скруббере. [Текст] / Б. С. Сажин, М. П. Тюрин, М. Б. Сажина, Л. М. Кочетов, М. А. Апарушкина, О. В. Платонова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. – № 3. – С. 103-109.
2. Тюрин М. П. Определение дисперсного состава капель жидкости в центробежных скрубберах. [Текст] / М. П. Тюрин, Л. М. Кочетов, В. Б. Сажин, И. А. Попов, М. А. Апарушкина, З. Н. Османов, К. В. Ильина // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – Т. 25 – № 11(127). – С. 119-121.
3. Тюрин М. П. Утилизация теплоты от теплотехнического оборудования в вихревом аппарате. [Текст] / М. П. Тюрин, М. А. Апарушкина, З. Н. Османов, В. Б. Сажин, Н. А. Солдатова // Успехи в химии и химической технологии. – 2012. – Т. 26 – № 5(134). – С. 13-15.
4. Тюрин М. П. Определение дисперсного состава капель жидкости в центробежных скрубберах. [Текст] / М. П. Тюрин, Е. С. Бородин / Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2014): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 2. – М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2014. – С. 189-191.

УДК 62-1/-9

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ
СУШИЛОК ВЗП (СО ВСТРЕЧНЫМИ ЗАКРУЧЕННЫМИ ПОТОКАМИ)
THE RESEARCH OF PRODUCTIVITY AND ECOLOGICAL EFFICIENCY
OF DRYERS WITH COUNTER-SWIRLING FLOW**

Игорь А. Попов*
Igor A. Popov*

**Московский государственный университет дизайна и технологии
(e-mail: igoralekspopov@yandex.ru)*

Moscow state university of design and technology (MSUTD)

Аннотация: Рассмотрены вопросы работы сушилок со встречными закрученными потоками, основные зависимости показателей работы от режимных параметров, вопросы эффективности пылеулавливания.

Abstract: The paper describes issues of dryer with counter-swirling flow works and its basic characteristics depending on operating parameters. Also the paper is focused on dust collecting efficiency.

Ключевые слова: сушилка для дисперсных материалов, время пребывания, эффективность улавливания.

Keywords: dryer for disperse material; residence time; dust collection efficiency.

Для проведения опытов была использована установка сушилки непрерывного действия, включающая аппарат со встречными закрученными потоками. Диаметр цилиндрической части составлял 100 мм. Высота рабочей части была 210 мм или 1100 мм.

Снизу в аппарат по аксиальному трубопроводу подводился первичный поток теплоносителя, который закручивался лопастным завихрителем с вытеснителем. В верхней части аппарата осуществлялся ввод вторичного потока теплоносителя через тангенциальный патрубок прямоугольной формы.

Подача дисперсного материала в аппарат предусмотрена через канал первичного потока и через канал вторичного потока. Она осуществляется шнековыми питателями с регулируемым числом оборотов.

Эффективность улавливания аппарата определялась весовым методом, т.е. посредством взвешивания массы дисперсного материала подаваемого в аппарат и выгружаемого из него. Контроль баланса осуществлялся с учетом материала, уловленного в системе пылеулавливания.

Время пребывания твердой фазы в аппарате может быть представлено в виде относительной величины $\frac{\tau}{\tau_0}$, когда время пребывания относят к времени пребывания твердой фазы гарантирующее достижение требуемой, остаточной влажности материала одной группы по теплофизической классификации [1,2]. Для широкопористых материалов с размером пор порядка 1000 Å это время составляет 0,5 секунды.

Поскольку непосредственное определение времени пребывания дисперсного материала связано с использованием сложных методов, например способа основанного на получении кривых отклика, предоставляется практически целесообразным проведение оценки среднего времени пребывания через величину удерживающей способности:

$$\tau = \frac{q}{G}$$

где q – удерживающая способность аппарата [кг],

G – производительность [кг/сек],

Для обеспечения одновременной отсечки воздуха на воздуховоде был установлен один электромагнитный клапан, а на выхлопной трубопровод – другой.

Среднее относительное время пребывания дисперсного материала в аппарате в зависимости от его подачи, при постоянном расходе воздуха и постоянном соотношении расходов потоков, монотонно уменьшается с увеличением подачи материала. Изменение соотношения расходов потоков так же оказывает влияние на время пребывания материала. Оно так же уменьшается с увеличением доли вторичного потока.

Время пребывания материала в аппарате с большей высотой рабочей части больше чем в аппарате с меньшей высотой, однако оно не прямо пропорционально соотношению высот.

В ряде случаев применения аппаратов ВЗП позволяет отказаться от системы пылеулавливания. Однако следует иметь в виду, что эффективность улавливания рассматриваемых аппаратов зависит от режимных и конструктивных параметров. Так при подаче материала по вторичному каналу наблюдается наиболее высокая степень улавливания, а наименьшая эффективность наблюдается при подаче дисперсного материала по первичному и вторичному каналам одновременно.

Возможность регулирования работы аппарата за счет изменения соотношения расходов потоков позволяет изменять время пребывания при высокой эффективности улавливания.

Список литературы

1. Сажин Б.С., Шадрин Н.Б. Выбор и расчет сушильных установок на основе комплексного анализа влажных материалов как объектов сушки. М., Изд. МТИ 1989г.
2. Сажин Б.С. Аппараты с активными гидродинамическими режимами для сушки дисперсных волокнообразующих полимеров. М., Изд. МТИ 1980г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ
ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МЕДИЦИНСКОЙ
ГИГРОСКОПИЧЕСКОЙ ВАТЫ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

**THE RESEARCH AND INTENSIFICATION OF THE PROCESSES
OF HYGROTHERMAL PROCESSING IN THE RECEIVING OF MEDICAL
ABSORBENT COTTON WITH THE AIM OF INCREASING INDUSTRIAL
AND ENVIRONMENTAL SAFETY**

Б.Т. Федотов, М.К. Кошелева, Л.В. Гурьева, В.Ю. Алейников
B.T. Fedotov, M.K. Kosheleva, L.V. Guryeva
V.U. Aleynikov

НТЦ «Техносоник» Москва, Россия
flint967@gmail.com

STC "Tehnosonik", Moscow, Russia

Московский государственный университет дизайна и технологии, Москва, Россия
oxtpast@ya.ru

Moscow state University of design and technology, Moscow, Russia
Московский государственный университет технологий и управления
имени К.Г. Разумовского, Россия, Москва,
(vburovtsov@mail.ru)

Moscow State University of Technology and Management, Russia, Moscow

Аннотация: В работе представлены результаты исследования процессов термовлажностной обработки в производстве медицинской ваты при их интенсификации ультразвуковым воздействием.

Abstract: The results of a researching of wet thermal treatment processes in the production of medical cotton wool in their intensification of ultrasonic impact.

Ключевые слова: медицинская вата, отварка, ультразвук, экологическая и производственная безопасность

Keywords: medical cotton wool, boiling, ultrasonic, environmental and industrial safety.

Сырьём в ватной промышленности, как правило, выступают волокна растительного происхождения, обладающие гигроскопическими свойствами, в первую очередь это — хлопковое волокно.

Производство медицинской ваты — это сложное химико-технологическое производство, представляющее собой комплекс механических, химических, влажных и тепловых обработок, в которых используется большое разнообразие оборудования и химических реагентов. Кроме того, это производство является водо- и энергоёмким. Все эти факторы создают негативную с точки зрения техносферной безопасности обстановку.

Был проведён анализ труда на предприятиях, занимающихся производством ваты, который показал, что к числу вредных и опасных относятся такие факторы как повышенная температура и влажность воздуха в рабочей зоне, брызги кислот, щелочей и окислителей, брызги горячих растворов, повышенный уровень шума и т.д.

Самыми вредными процессами являются отварка и беление. Именно эти процессы — самые продолжительные, и проходят с использованием большого количества вредных химических веществ, таких как гидроксид натрия, техническая серная кислота,

техническая кальцинированная сода, смачиватели, силикат натрия, которые в итоге попадают в сточные воды, значительно ухудшая экологические показатели производства.

Целью работы является изучение экспериментальных данных по исследованию процесса отварки и повышению производственной и экологической безопасности за счет его совершенствования, а также разработка рекомендаций по улучшению условий охраны труда.

Процесс отварки проводится в котлах периодического действия, длится 2,5 часа при достаточно высоких концентрациях гидроксида натрия, ТВВ, серной кислоты и кальцинированной соды.

Пути повышения эффективности процесса отварки были намечены на основе анализа свойств волокнистой основы, литературных данных и особенностей процесса отварки.

Для интенсификации выбрано ультразвуковое воздействие на варочный раствор.

На рис.1 и рис.2 представлены графики, построенные по результатам экспериментальных лабораторных данных.

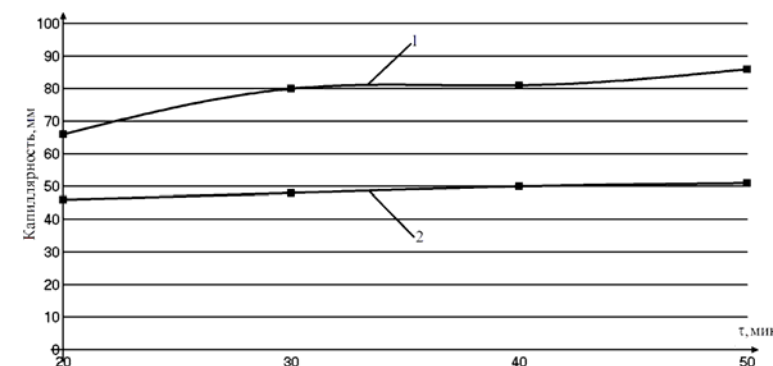


Рис. 1. Влияние времени отварки на капиллярные свойства хлопковой ваты в варочном растворе без ТВВ при $C(\text{NaOH}) = 8 \text{ г/л}$ с ультразвуковым воздействием (1) и без него (2).

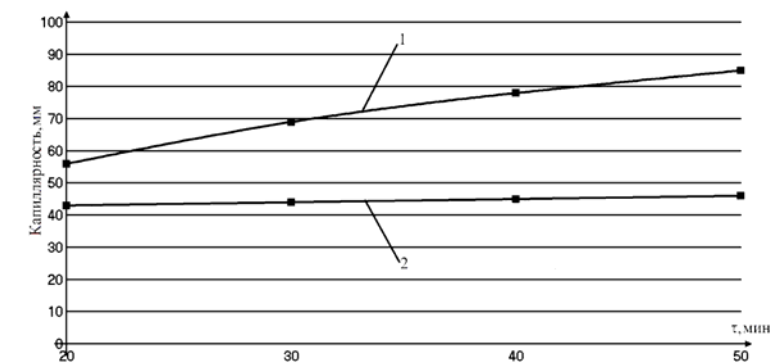


Рис. 2. Влияние времени отварки на капиллярные свойства хлопковой ваты в варочном растворе без ТВВ при $C(\text{NaOH}) = 4 \text{ г/л}$ с ультразвуковым воздействием (1) и без него (2).

Как показывает анализ, при использовании ультразвука капиллярность, соответствующая нормативам, достигается за 40-50 минут, вместо 2,5 часов, при этом концентрация щелочи может быть снижена на 50% - с 8 г/л до 4 г/л.

Совместно со специалистами НТЦ «Техносоник» разработаны практические рекомендации по реализации выбранного способа интенсификации. Результаты сравнения показателей производственной и экологической безопасности при интенсификации процесса отварки и без него представлены в таблице 1, из которой видно, что они заметно улучшаются при выбранном способе интенсификации.

Таблица 1. Сравнение показателей производственной и экологической безопасности при совершенствовании процесса отварки

Отварка по технологии	Отварка после интенсификации ультразвуком	Результат интенсификации
Концентрация NaOH в растворе, г/л		
8	4	Снижение концентрации в варочном растворе на 50%. Способствует снижению содержания NaOH в сточных водах, снижению экологической и производственной безопасности, экономии реагента
Концентрация NaOH в сточных водах, г/л		
4	1,5	Снижение концентрации в сточных водах на 62,5%. Сокращается объем сточных вод и степень загрязнения, следовательно, сокращаются платы за сбросы вредных и опасных веществ в поверхностные воды и уменьшается экономический ущерб
Концентрация Na ₂ CO ₃ в растворе, г/л		
1,5	0	Снижение концентрации в варочном растворе на 100%
Концентрация Na ₂ CO ₃ в сточных водах, г/л		
1,1	0	Снижение концентрации в сточных водах на 100%
Время нахождения в рабочей зоне и воздействие опасных факторов, мин		
120-150	30-40	Снижение продолжительности на 73-75%. Снижается вредное воздействие производственных факторов на работников производственного цеха, уменьшается вероятность травматизма и производственных заболеваний

Проведена оценка экономической эффективности предлагаемого инженерного решения по совершенствованию процесса отварки, а именно снижение платы за загрязнение поверхностных и подземных водных объектов. Кроме того, экономия достигается за счёт снижения затрат на электроэнергию и чистую техническую воду.

Список литературы

1. Товажнянский Л.Л., Кошелева М.К., Бухало С.И. Общая химическая технология в примерах, задачах, лабораторных работах и тестах: Учеб. пособие. - М.: ИНФРА-М, 2015. - 447 с. - (Высшее образование: Бакалавриат).
2. Кошелева М.К., Щёголев А.А., Кереметина А.П., Бедняшин А.А., Борушко Н.П. Изучение процесса химической очистки волокна в реакторе периодического действия при производстве медицинской гигроскопической ваты. Успехи в химии и химической технологии. 2011.т.25.№ 11 (127). С.78-82.
3. Кошелева М.К., Шацких С.Н., Кереметина А.П., Бильман Г.В., Ямышев А.В. Повышение эффективности процессов раскликовки и выщелачивания хлопчатобумажных тканей после мерсеризации. Успехи в химии и химической технологии. 2011.т.25.№ 11 (127). С.88-92.

УДК: 536.244:266

БЕЗОТХОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВИЭ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕКСТИЛЯ В СИСТЕМЕ РАЗДЕЛЕНИИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ NON-WASTE TECHNOLOGIES USING RENEWABLE ENERGY SOURCES THROUGH THE USE OF TEXTILES IN THE SEPARATION OF THE LIQUID PHASE OF THE GEOTHERMAL FLUID

Вячеслав Васильевич Козляков*, Максим Алексеевич Кипнис**
Viacheslav Vasilevich. Kozlyakov*, Maxim Alekseevich. Kipnis**

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва,
(e-mail: kozlyakov@mail.ru).

**Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва,
(e-mail: maks_k@bk.ru)

Ключевые слова: текстиль; геотермальная энергетика; кремнезем; мембрана; отложения; фильтрование; pH

В настоящее время в труднодоступных и отдаленных регионах России большое распространение получают возобновляемые источники энергии. В первую очередь это связано с транспортными трудностями и высокой стоимостью привозного топлива, а также с необходимостью снижения выбросов CO₂, NO_x и других компонентов.

Так в районе Камчатского п-ва получило распространение использование тепла земли для выработки электроэнергии. На данный момент на Камчатке действует несколько геотермальных электростанций (ГеоЭС) [1].

Используемый геотермальный теплоноситель представляет парожидкую среду, которая нагревается в скважине от тепла земли. Из скважины теплоноситель поступает в сепаратор, где разделяется на жидкую и паровую фазу. Паровая фаза непосредственно поступает на первичную турбину. Жидкая фаза посредством теплообменников нагревает второй контур с низкокипящим теплоносителем направляемым на вторичную турбину.

Основная проблема использования геотермального теплоносителя заключается в его высокой минерализации. При подъеме теплоносителя по скважине его температура и давление падает, что приводит к пересыщению раствора минералами, и в частности кремнеземом. Это в дальнейшем приводит к образованию отложений на внутренних поверхностях теплоэнергетического оборудования. Отложения приводят к увеличению гидравлического сопротивления труб, снижению энергоэффективности оборудования и в конечном итоге к выходу его из строя.

Поэтому, требуется принятия мер для извлечения кремнезёма до поступления его в теплообменники. В настоящее время всё большее распространение получают мембранные способы извлечения кремнезёма. Материалами мембран могут служить полимерные материалы, керамика и т.д.

В качестве материала мембран предложено использовать текстильную ткань. Структура ткани представляет собой перпендикулярно пересекающиеся нити (рис. 1.). Соседние нити расположены на некотором расстоянии друг от друга, образуя поры в материале.

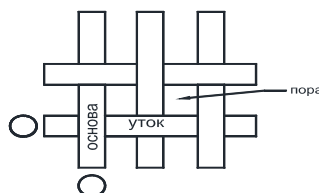


Рис. 1. Пористая структура ткани.

Ткань выгодно отличается от других материалов простотой производства ткани с заданными размерами пор, их одинаковостью и равномерным распределением по поверхности. Также текстильная мембрана имеет меньшую себестоимость по сравнению с другими материалами. Это особенно важно т.к. мембрана является расходным материалом и требует периодической замены.

Текстильная мембрана имеет поры простой геометрической формы и малую толщину, что облегчает ее регенерацию посредством встряхивания или обратной продувки.

Использование текстильной мембраны нашло применение в устройстве для извлечения кремнезема на основе электрокорректора pH, для создания кислой и щелочной среды геотермального теплоносителя [2]. Мембрана делил внутренний объем устройства на две зоны катодную и анодную. В катодной зоне, благодаря электролизу воды, pH геотермального теплоносителя повышалось до 11-12, а в анодной pH снижалось до 1-2. В кислой среде растворимость кремнезема уменьшалась, и он выпадал в осадок. Благодаря электрокорректору pH с текстильной мембранной удалось извлечь из геотермального теплоносителя в периодическом режиме его работы до 98 % кремнезема. При проточном режиме работе удалось осадить из объема воды до 90 % кремнезема. Полученная после очистки жидкая фаза геотермального теплоносителя содержит, такое количество кремнезема, которое не способно вызывает отложения в теплоэнергетическом оборудовании.

Извлеченный кремнезем может быть использован как ценное минеральное сырье в такие отрасли как химическая промышленность, радиоэлектроника, строительство и т.д.

Список литературы

1. Алхазов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с.
2. Козьяков В.В., Кипнис М.А. Повышение эффективности использования геотермальных ресурсов //Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №9. С. 364-367.

УДК 66.011

ПРИМЕНЕНИЕ СВОБОДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕ- И ГАЗООЧИСТКИ APPLICATION OF FREE SOFTWARE FOR DUST AND GAS CLEANING SIMULATION

Олег И. Седяров*, Надежда С. Тихонова**,
Иван Н. Курицин***, Вячеслав В. Куранов****
Oleg I. Sedlyarov*, Nadezhda S. Tikhonova**,
Ivan N. Kuritsin ***, Vyacheslav V. Kuranov****

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
(e-mail: Oleg.Sedlyarov@gmail.com)

**Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
(e-mail: 2233318@mail.ru)

***Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
(e-mail: 7823692@gmail.com)

****Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
(e-mail: slavaumc@yandex.ru)

Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow State University of Design and Technology, Russia, Moscow

Аннотация: Проведен обзор современного программного обеспечения для решения задач механики сплошной среды, и, в частности, моделирования процессов пыле- и газоочистки. Показано, что в настоящее время свободное программное обеспечение по своим возможностям не уступает коммерческому программному обеспечению, а по некоторым параметрам даже его превосходит. Рассмотрен полный цикл моделирования начиная от создания геометрической модели циклона, создания расчетной сетки, проведения расчетов и заканчивая представлением результатов вычислений. Показано, что на всех этапах моделирования возможно использование свободного программного обеспечения.

Abstract: Current freeware addressing flow mechanics, in particular processes of air and dust cleaning was reviewed. The available freeware equals or better to commercial software. In our research we consider the complete modeling process including creating geometrical model of cyclone filter, building computational grid, computation itself and data analysis and presentation. It was shown that at all these steps it is possible to use freeware.

Ключевые слова: Свободное программное обеспечение; программное обеспечение с открытым исходным кодом; вычислительная гидродинамика; многофазные течения; циклон; пылеочистка; численное моделирование.

Keywords: Freeware; open source software; computational fluid dynamics (CFD); multi-phase flow; cyclone separator; dedusting; numerical simulation.

Защита атмосферного воздуха от промышленных загрязнений является важной актуальной задачей. Рост промышленного производства и энергетики сопровождается увеличением объемов выбросов, как жидких и газообразных, так и твердых веществ. К основным мероприятиям защиты атмосферы от негативного антропогенного воздействия относятся экологизация технологических процессов, очистка газовых выбросов, рассеивание выбросов в атмосфере и другие.

Для очистки газовых выбросов от твердых частиц (пыли) широко используются сухие механические пылеуловители – аппараты, в которых отделение твердых частиц от воздушного потока происходит за счет различных сил (центробежных, инерции, гравитации и других). Наиболее распространенным типом механического пылеуловителя яв-

ляются аппараты циклонного типа, за счет простоты устройства и эксплуатации, сравнительно небольшой стоимости и высокой производительности.

Принцип действия циклона основан на смещении твердых частиц к стенке корпуса аппарата под воздействием центробежных сил, возникающих вследствие вращения потока, и их дальнейшему осаждению под действием гравитации. Однако, несмотря на простую внешнюю конструкцию, в циклонном аппарате происходят сложные аэродинамические процессы, которые исследованы еще не в полной мере. Отсутствует стройная теоретическая база, позволяющая связать конструктивные характеристики циклонов с эффективностью очистки, гидравлическим сопротивлением аппарата и другими параметрами.

На рисунке 1 представлено схематическое изображение циклонного пылеуловителя и варианты сочетаний параметров для ряда зарубежных стандартных конструкций, оказавшихся практичными и эффективными [1].

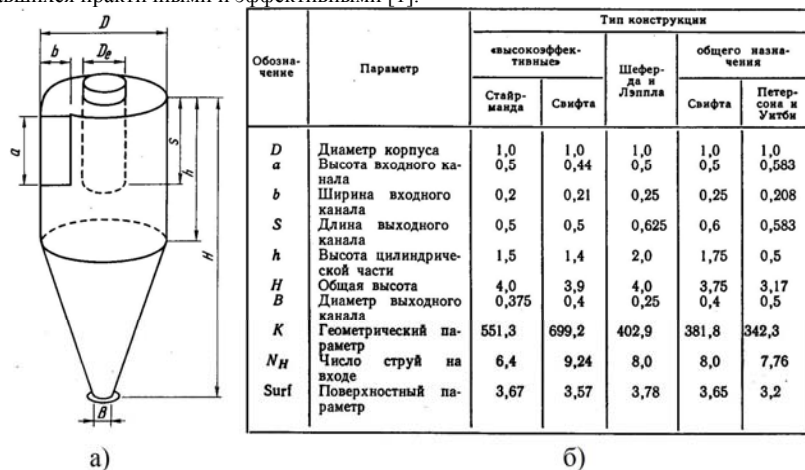


Рисунок 1. Циклон. а) – размеры и геометрия; б) – геометрические параметры конструкции циклона

Сравнительный анализ технических характеристик отечественных циклонных пылеуловителей представлен в [2].

Определяющими характеристиками циклонных пылеуловителей являются эффективность пылеулавливания и гидравлическое сопротивление. Потери давления в циклоне определяют, в основном, экспериментально и представляют в виде регрессионной зависимости от геометрических параметров циклона и критерия Рейнольдса [3].

Известные методы расчета эффективности циклонов, основанные на аппроксимации фракционной эффективности циклонных пылеуловителей и дисперсного состава пыли эмпирико-вероятностными функциями, также не отвечают требуемой точности для широкого круга конструктивных и технологических параметров. При этом наиболее важными факторами, нуждающимися в детальном исследовании и уточнении, являются масштабный переход к другому типоразмеру циклона и влияние на процесс пылеулавливания технологических параметров, таких как размер частиц пыли, ее концентрация и плотность, скорость запыленного потока [3].

Одной из современных тенденций в проектировании циклонных пылеуловителей становится использование численного моделирования. Рассматриваемые вопросы относятся к области вычислительной гидродинамики CFD (Computational fluid dynamics) и реализованы в коммерческих программных продуктах. Характерной особенностью

современных коммерческих систем моделирования является высокая стоимость базового программного обеспечения и необходимость дополнительных затрат для расчетов на многопроцессорных системах.

Цель данной статьи рассмотреть возможность использования некоммерческого программного обеспечения для моделирования процессов пыле- и газоочистки. Процесс численного моделирования в вычислительной гидродинамике состоит, как правило, из трех стадий: подготовки геометрии расчетной области и создания расчетной сетки; собственно расчетов и обработки и визуализации результатов расчетов.

Первый этап - подготовки геометрии расчетной области и создания расчетной сетки часто называют preprocessing. На этом этапе применяются системы автоматизированного проектирования - CAD-системы (computer-aided design/drafting). В настоящее время существует достаточное количество некоммерческих CAD-систем, позволяющих подготовить геометрию расчетной области. В качестве примера рассмотрим SALOME [4]. SALOME — открытая интегрируемая платформа для численного моделирования. Представляет собой набор пре- и постпроцессинга. Первоначально задуманная как связующее CAD-система, она объединяет в себе различные модули, применяемые в приложениях численного моделирования — от моделирования в САПР до параллельных вычислений. САПР-средства в SALOME имеют достаточно тесную связь с платформой Open CASCADE Technology. Продукты марки SALOME распространяются на условиях GNU Lesser General Public License. В основе SALOME прежде всего лежит концепция объектно-ориентированного программирования. SALOME представляет собой набор модулей, которые позволяют выполнять задачи, перечисленные выше [5].

Одним из основных достоинств SALOME является возможность создания параметрических моделей, что позволяет изменяя один или несколько параметров получать модели различных циклонов, а учитывая возможности SALOME по созданию расчетных сеток автоматически получать и сеточное разбиение для этих моделей. На рисунке 2 показаны этапы создания геометрии расчетной области циклона в модуле Geom программы SALOME.

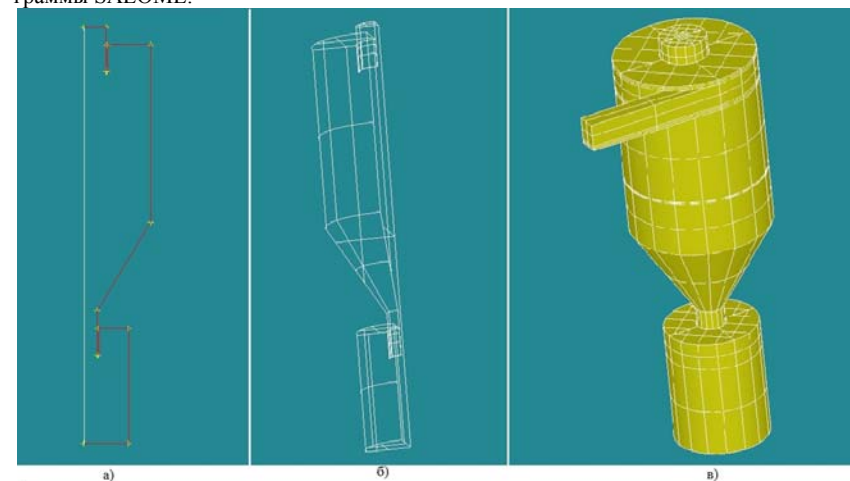


Рисунок 2. Создание геометрии расчетной области в SALOME
а) - задание точек и линий; б) - создание объемной части; в) - результат моделирования

Следующий шаг первого этапа моделирования - создание расчетной сетки (Mesh). Расчет и построение сетки возможно как в SALOME, так и в специальных программах генерирующих сетки. На рисунке 3 показаны исходная геометрическая модель и рас-

четная сетка сгенерированная в модуле Mesh программы SALOME. На этом же шаге происходит определение и задание поверхностей с различными видами граничных условий, в данном случае это области входа загрязненного газового потока и выхода очищенного газа.

Завершающей частью первого этапа является сохранение расчетной сетки в формате необходимом для дальнейших расчетов.

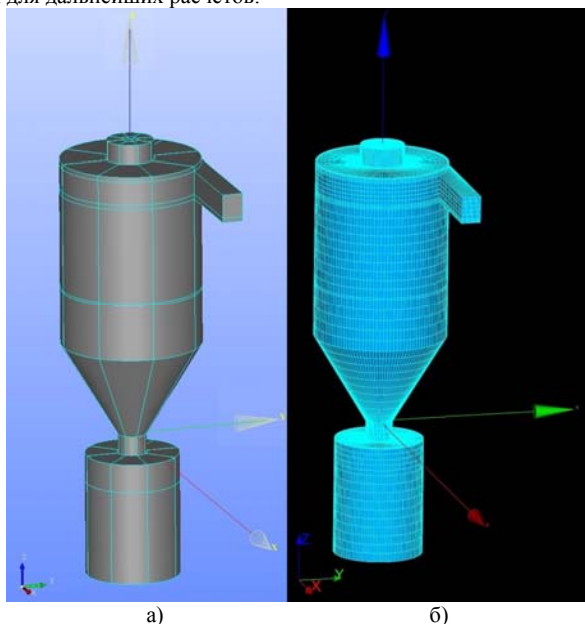


Рисунок 3. Генерация расчетной сетки
а) - геометрическая модель; б) - расчетная сетка

Второй этап - проведение расчетов (Solving). Для проведения расчетов воспользуемся платформой OpenFOAM [6] (Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox) — открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред [7]. OpenFOAM имеет широкий спектр возможностей для решения сложных задач движения потоков жидкости, связанных с химическими реакциями, турбулентностью и теплообменом. Он включает в себя библиотеки теплофизических свойств материалов, моделей турбулентности, кинетики химических реакций и отслеживания движения Лагранжевых частиц, и более 80 решателей (Solver) для моделирования определенных проблем вычислительной гидродинамики, таких как, несжимаемые течения, сжимаемые течения, многофазные потоки, сопряженный тепло- и массообмен, горение, прямое численное моделирование и метод крупных вихрей и многие другие.

OpenFOAM это платформа с открытым исходным кодом, что делает ее гибким инструментом, позволяющим включать дополнительные решатели, библиотеки и граничные условия написанные пользователями для анализа конкретных задач.

В результате расчетов OpenFOAM формирует файлы полей расчетных параметров (температура, давление, компоненты скорости, концентрации и другие, в зависимости от решаемой задачи) в директориях, соответствующих расчетному времени.

Современные расчеты проводятся на расчетных сетках с количеством расчетных ячеек составляющем от сотен тысяч до десятков миллионов и более, а для нестационарных течений учитывается временная динамика. Обработка больших объемов информации, ее анализ и визуализация являются отдельной сложной проблемой.

Для анализа и визуализации результатов расчетов также существует некоммерческое программное обеспечение, например ParaView [8]. ParaView это мультиплатформенное программное обеспечение с открытым исходным кодом, предназначенное для анализа данных и их визуализации. ParaView было разработано для анализа очень больших наборов данных, используя распределенные вычислительные ресурсы памяти. ParaView может быть запущено как на суперкомпьютерах для анализа больших наборов данных, так и на ноутбуках для небольших данных [8].

На рисунке 4 представлена динамика изменения полей скорости движения воздуха в циклонном пылеуловителе в различные моменты времени (10, 30 и 60 с).

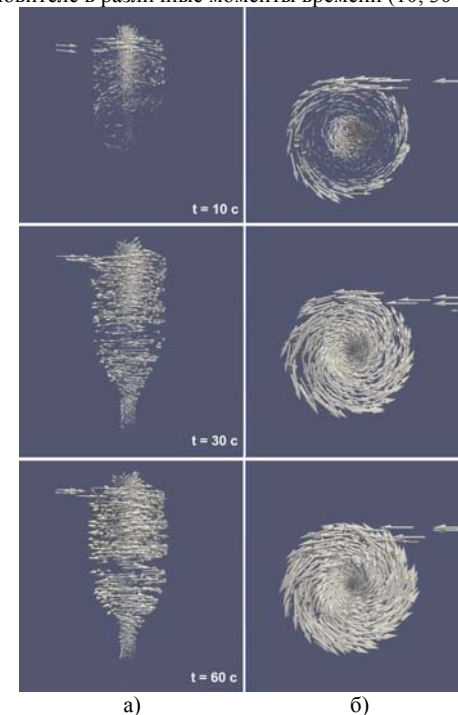


Рисунок 4. Визуализация поля скорости течения внутри циклона
а) - вид сбоку; б) - вид сверху

В настоящей статье представлен один из возможных наборов некоммерческого программного обеспечения для моделирования процессов пыле- и газоочистки, а именно Salome-OpenFOAM-ParaView. По своим возможностям он не уступает, а в ряде случаев и превосходит коммерческое программное обеспечение.

В заключении хотелось бы отметить еще одно перспективное направление в моделировании с использованием некоммерческого программного обеспечения — это оптимизация. В решении задач вычислительной гидродинамики оптимизация всегда представлялась отдельной сложной задачей, требующей в некоторых случаях изменения геометрии расчетной области. Использование параметрических моделей в Salome и расширение набора некоммерческого программного обеспечения программой Dakota

[9] позволяет отчасти решить и эту задачу, что будет являться предметом дальнейших исследований.

Список литературы:

1. Защита атмосферы от промышленных загрязнений. Справ. изд.: В 2-х ч. Ч. 1: Пер. с англ./ Под ред. Калверта С., Инглунда Г.М. М.: «Металлургия», 1988. 760 с.
2. Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков, Сравнительный анализ технических характеристик циклонных пылеуловителей Труды БГТУ. 2012. № 3. Химия и технология неорганических веществ, с. 154-163
3. Асламова В.С. Процесс сепарации в высокопроизводительных прямоточных циклонах и методы их расчета. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Томск, 2009 г. 40 с.
4. <http://www.salome-platform.org>
5. <http://fsweb.info/caecad/salome.html>
6. <http://www.openfoam.com/>
7. <https://ru.wikipedia.org/wiki/OpenFOAM>
8. <http://www.paraview.org/>
9. <https://dakota.sandia.gov/>

УДК 665.6

**ГЛУБОКОЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЕ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОФИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ОТХОДОВ КОЖЕВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА
DEEP DEHYDRATION OF LIQUID HYDROCARBONS USING
THE HYDROPHILIC COMPOSITIONS DERIVED FROM TANNERY WASTES**

**Л.В. Моисеева, А.В. Сухарев
Moiseeva L.V., Sucharev A.V.**

*Московский государственный университет дизайна и технологии.
Moscow State University of Design and Technology*

Аннотация: В представленной работе рассмотрена перспектива использования волокнисто-пористых фильтрующих материалов, полученных на основе коллагенсодержащих отходов кожевенного производства, для глубокого обезвоживания жидких углеводородов. Получена частично структурированная биополимерная композиция, содержащая разветвленную внутреннюю поверхность. Коллагеновые фрагменты, составляющие основу композиции, сохраняют способность к набуханию в воде, обеспечивая поглощение остаточной эмульсионной влаги из обрабатываемой системы.

Abstract: The prospect of using the fiber-porous filter material derived from collagen tannery wastes for deep dehydration of liquid hydrocarbons was considered in present paper. The partially-structured biopolymer composition containing a branched inner surface was obtained. Collagen fragments constituting the basis of the composition, retain the ability to swell in water, ensuring the absorption of the residual emulsive moisture from the treated system.

Ключевые слова: волокнисто-пористый фильтрующий материал; коллагеновые фрагменты; обезвоживание органических жидкостей.

Keywords: fiber-porous filter material; collagen fragments; dehydration of organic liquids.

Использование водяного пара для разделения и очистки углеводородов приводит к образованию в системе микрокапель размером до 30 мкм. Для удаления растворенной и

эмульсионной воды используют длительное отстаивание или электроразделители. Электрическое поле обеспечивает быструю коалесценцию мелких капель в более крупные, которые достаточно быстро оседают. Остаточное содержание эмульсионной воды составляет 500-1000 мг/кг. Более глубокую осушку органических жидкостей обеспечивают различные адсорбенты. Например, цеолиты снижают содержание воды до 10-30 мг/кг.

Для обеспечения глубокой осушки жидких углеводородов в представленной работе использовали волокнисто-пористую композицию, полученную на основе коллагенсодержащих отходов кожевенного производства.

Широкие возможности для получения волокнистых фильтрующих материалов с заданными свойствами может дать использование производных коллагена - природного биополимера животного происхождения. Традиционно вопросы создания волокнисто-пористых материалов решаются путем совмещения волокнистых и полимерных материалов. Значительное количество коллагенсодержащих отходов кожевенного производства является ценным вторичным сырьем. Коллаген имеет уникальную многоуровневую структурную организацию и целенаправленная деградация этой структуры позволяет получать белковые фрагменты, отвечающие всем уровням организации: свободные аминокислоты, фрагменты молекул, способные к фибриллообразованию, и ультратонкие волокна. Образующиеся на разных стадиях технологического цикла коллагенсодержащие отходы, сохранившие волокнистую макроструктуру, подвергают специальной механической (разволокнение) или химической (частичная деградация) модификации, что позволяет получить необходимые компоненты волокнистых композиций: и волокна, и биополимерную матрицу. В композиционных материалах на основе коллагенсодержащих составляющих матрица из волокнообразующего биополимера и волокнистый наполнитель выступают в качестве равноправных составляющих, имеющих высокое сродство друг к другу.

Для получения волокнистого фильтрующего материала в представленной работе использовали продукты принудительного растворения коллагенсодержащего сырья (ПРК) и гольевой порошок. ПРК представляет собой полидисперсную систему в 1М растворе уксусной кислоты с содержанием сухого остатка 3%, содержащую агрегаты коллагеновых частиц, ПРК выполняет роль связующего или биополимерной матрицы, а гольевой порошок - препарат, сохранивший волокнистую надмолекулярную структуру коллагена, роль активного наполнителя. Важно отметить, что обладая способностью к волокнообразованию, в ПРК при криоструктурировании могут возникать волокна субмикронного и наноскопического диаметра, обладающие большой удельной поверхностью и сверхмалым размером пор.

Волокнисто-пористую композицию получали путем смешения коллагеновой дисперсии, продуктов размола коллагена в виде гольевого порошка и последующего криоструктурирования в присутствии структурирующего агента. После размораживания и высушивания на воздухе полученный материал использовали для осушки органической жидкости - бензиновой фракции нефти.

Электронная микроскопия образцов материала позволила подтвердить наличие развитой волокнистой структуры с размером волокон от 25 мкм до 100 нм. Фото образцов представлено на рисунке 1

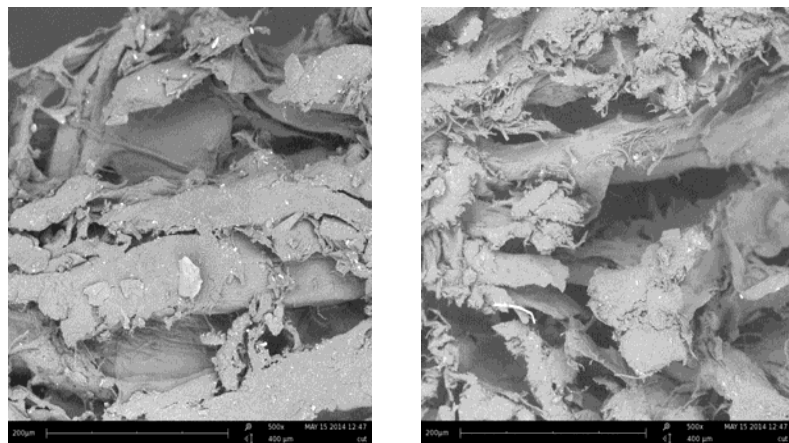


Рис.1 Электронная микро фотография волокнистого материала.

Внутренняя удельная поверхность полученного материала составляет $6-8 \text{ м}^2/\text{г}$. Пористость исследуемых образцов волокнисто-пористого материала определяли на порометре - анализаторе Gemini VII. Анализ результатов позволил отметить, что эффективный диаметр микропор характеризуется величинами от 3 до 40 нм, а удельная площадь их поверхности составляет $0,9-1,0 \text{ м}^2/\text{г}$.

Использование полученного волокнисто пористого фильтрующего материала для осушки бензиновой фракции нефти с исходным содержанием эмульсионной воды 300мг/кг позволяет обеспечить, практически полное обезвоживание. В исследованных образцах обнаруживалось лишь следовое количество воды.

УДК 675.02; 628.85

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ВОЗДУХА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ СУШИЛЬНЫХ ЦЕХОВ КОЖЕВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА
NUMERICAL SIMULATION OF AIR TEMPERATURE AND HUMIDITY IN THE WORKING AREA OF DRYING COMPARTMENTS ON LEATHER MANUFACTURING

Олег И. Седяров*, Вячеслав В. Куранов, Надежда С. Тихонова***, Геннадий А. Свищев******
Oleg I. Sedlyarov*, Vyacheslav V. Kuranov, Nadezhda S. Tikhonova***, Gennadiy A. Svishchev******

**Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва (e-mail: Oleg.Sedlyarov@gmail.com)*

***Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва (e-mail: slavaumc@yandex.ru)*

****Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва (e-mail: 2233318@mail.ru)*

*****Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва (e-mail: ole-svi@yandex.ru)*

Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва Moscow State University of Design and Technology, Russia, Moscow

Аннотация: Проведено моделирование динамики изменения температуры, влажности и подвижности воздуха в цехах предприятий по производству кожи. Анализ результатов численного моделирования показал, что температура, влажность и подвижность воздуха в цехах кожевенных предприятий может отличаться от нормативных значений, что может негативно сказаться на здоровье работающих. Проведено сравнение результатов численного моделирования состояния воздуха в рабочей зоне сушильных цехов предприятий по производству кожи с результатами натурных измерений. Представлены рекомендации по улучшению условий труда.

Abstract: The kinetics of temperature variation, humidity variation and air motion in the compartments of leather manufacture was modelled. The analysis showed that temperature, humidity and air motion can differ from guideline values. This could affect the health of the stuff. We have also compared the modelling results with the observational data for the working area of the drying compartment on leather manufacturing. We suggest recommendations to improve the working conditions.

Ключевые слова: Свободное программное обеспечение; программное обеспечение с открытым исходным кодом; вычислительная гидродинамика; численное моделирование; микроклимат; условия труда; промышленная безопасность.

Keywords: Freeware; open source software; computational fluid dynamics (CFD); numerical simulation; microclimate; working conditions; industrial safety.

Микроклиматические параметры, такие как, температура, влажность и подвижность воздуха, оказывает существенное влияние на самочувствие и работоспособность производственного персонала. Состояние микроклимата зависит от различных факторов таких, как особенности технологического процесса, виды используемого технологического оборудования, климат, сезон или период года, число работников, условий отопления и вентиляции и многих других. Эти параметры могут быть различными на отдельных рабочих местах одного и того же участка или цеха.

Санитарные правила и нормы [1] устанавливают оптимальные и допустимые микроклиматические условия, в зависимости от степени влияния на тепловое состояние организма человека для рабочей зоны производственных помещений с учетом тяжести выполняемой работы и периода года.

Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах. Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Они не вызывают повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности. Допустимые величины показателей микроклимата устанавливаются в случаях, когда по технологическим требованиям, техническим и экономическим обоснованным причинам не могут быть обеспечены оптимальные величины [1].

Моделирование температурно-влажностного режима в производственных помещениях является актуальной задачей, решение которой позволяет, с одной стороны, еще на стадии проектирования определять зоны возможного отклонения микроклиматических параметров от нормативных значений, и, с другой стороны, оценивать эффективность планируемых мероприятий. Наиболее сложным является моделирование производственных участков с технологическим оборудованием или технологическими процессами, при которых происходит выделение в воздух рабочей зоны тепла и влаги. К таким предприятиям относятся кожевенные предприятия, и прежде всего их отмоочно-зольные-дубильные и сушильные цехи. На рисунке 1 представлен функционирующий отмоочно-зольный цех, который принят за основу дальнейших исследований и проведения верификации данных инструментального контроля с результатами численного моделирования.



Рисунок 1. Отмоочно-зольный цех кожевенного завода [2]

Для описания процессов тепломассопереноса принята система трехмерных нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, включающая уравнения сохранения массы (уравнение неразрывности), сохранения импульса, сохранения энергии вязкой ньютоновской жидкости. Математическая модель тепломассопереноса в отмоочно-зольных и сушильных цехах кожевенных предприятий основана на исследованиях подробно изложенных в [3, 4]. Компьютерная реализация численного решения описанной выше системы уравнений относится к области вычислительной гидродинамики CFD (Computational fluid dynamics). В настоящее время существует три основных метода моделирования тепломассопереноса: прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation, DNS), метод крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) и третий базируется на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS).

При моделировании микроклимата в цехе использовалась компьютерная программа FDS (Fire Dynamics Simulator) [4, 5, 6, 7], которая реализует вычислительную гидродинамическую модель и численно решает уравнения Навье-Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков. FDS вычисляет температуру, плотность, давление, скорость и химический состав внутри каждой ячейки расчетной сетки на каждом отдельном временном шаге. Программа Smokeview [7, 8] используется для представления результатов расчетов и отображения динамика тепломассопереноса. Подготовка исходных данных для работы программы FDS осуществляется в текстовом файле, который содержит информацию о размерах и геометрии расчетной области, характеристике расчетной сетки, начальных и граничных условиях, шаге по временному и общему времени расчета и других параметрах. Общий вид геометрической модели отмоочно-зольного цеха в программе SmokeView представлен на рисунке 2.



Рисунок 2. Геометрическая модель отмоочно-зольного цеха кожевенного завода

На основе численного моделирования процессов тепломассопереноса была получена динамика изменения полей температуры, скорости и влагосодержания в воздухе рабочей зоны отмоочно-зольного цеха (рис. 3).

В результате проведенных численных расчетов тепломассопереноса в отмоочно-зольном цехе было установлено, что в процессе выполнения технологических операций по обработке кожи, в непосредственной близости от технологического оборудования возможно образование локальных зон, в которых параметры микроклимата (прежде

всего температура и влажность воздуха) могут отличаться от оптимальных и допустимых.

Оценка адекватности предложенного метода расчета и использованного программного обеспечения было проведено сравнение результатов расчетов с результатами натурных измерений, проведенных в отмочно-зольном цехе действующего кожевенного завода. Замеры проводились в рабочей зоне около всех барабанов для отмоки и зольения (четыре точки), двоильно-ленточной машины, щетинодергательной машины, в центре производственного помещения и у входа в цех. Разница между расчетной и измеренной температурой составила от 0,6 до 1,0 градуса, отклонение по влажности не превысило для холодного периода года 7%, а для теплого периода года 15%.

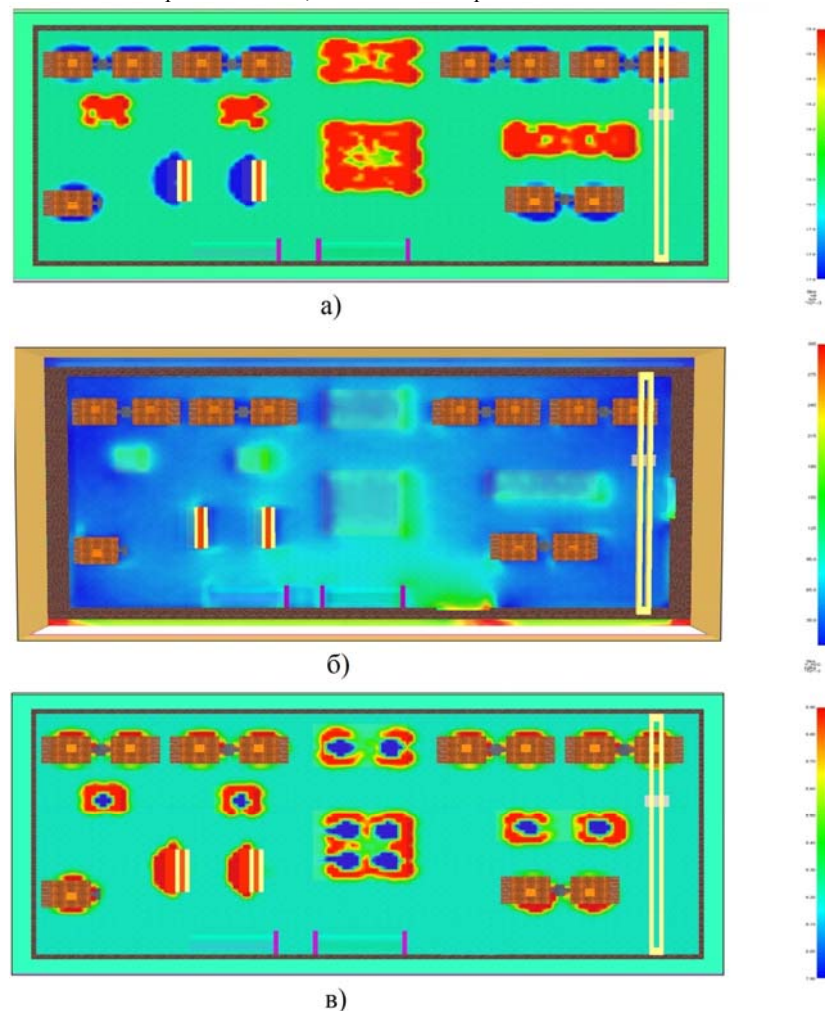


Рисунок 3. Расчетные поля параметров микроклимата в отмочно-зольном цехе кожевенного завода на уровне 1,5 м от пола:
а) температура; б) подвижность воздуха; в) влагосодержание

Для обеспечения нормативных параметров микроклимата необходимо уже на стадии разработки технологического процесса и подбора технологического оборудования необходимо предусматривать исключение поступлений тепла и влаги в воздушный бассейн цехов, обеспечивать теплоизоляцию поверхностей и герметизацию оборудования, проектировать встроенные местные вентиляционные отсасывающие устройства, подачу свежего воздуха и др.

Разработанная модель тепломассопереноса позволяет оценить условия труда по факторам производственной среды на стадии проектирования, реконструкции и технического перевооружения кожевенных предприятий, не проводя громоздких натурных измерений учесть особенности технологических процессов и используемого оборудования и предусмотреть необходимые меры по обеспечению требуемых параметров тепло-влажностного режима внутри цехов.

Список литературы:

1. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений». Санитарные правила и нормы. Минздрав России., Москва, 1997 г.
2. <http://inserpuhov.ru/multimedia/novosti/novosti/31-07-2014-10-03-06-3-avgusta-zaoserpukhovskiy-kozhevennyy-zavod-trud/>
3. Пузач С.В. Математическое моделирование газодинамики и тепломассообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.
4. McGrattan K. B., Hostikka S., Floyd J. E., Baum H. R., and Rehm R. G. Fire Dynamics Simulator (Version 5) [Text]//Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology. Maryland – Gaithersburg, October, 2007.
5. Bruer M. A challenging test case for large eddy simulation: high Reynolds number circular cylinder Flow // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1998. V. 21, №. 9. P. 1281 – 1302.
6. K.B. McGrattan, B.W. Klein, S. Hostikka, and J.E. Floyd. Fire Dynamics Simulator (Version 6), User's Guide. NIST Special Publication 1019 Sixth Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, October 2013.
7. <https://code.google.com/p/fds-smv/>
8. Glenn P. Forney. Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. Volume I: User's Guide. National Institute of Standards and Technology Special Publication 1017-1. Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Publ. 1017-1, 184 pages (July 2014)

Секция 9. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 389.14:543.812.08

О ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗАКОНА «ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ» В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ (на примере производства зерна)

Ю.П.Секанов,
U.Sekanov

ОАО «РНИИ «Агроприбор», г. Москва
Russian research institute of agricultural instruments, Moscow, Russian
(E-mail: u.sekanov@gmail.com)

Аннотация: В работе дается оценка состояния и влияния метрологического обеспечения производственных процессов растениеводства на конкурентоспособность производимой продукции. Несовершенство управления рассматривается как определяющий фактор многоплановых рисков при производстве зерна.

Summary: In work the assessment of a state and influence of metrological ensuring productions of plant growing on competitiveness of the made production is given. Imperfection of management is considered as the defining factor of multidimensional risks by production of grain.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, технологии, зерно, качество, риски, средства измерений, конкурентоспособность.

Keywords: metrological providing, technologies, grain, quality, risks, measuring instruments, competitiveness

Преодоление технологического отставания отечественного сельского хозяйства, как фактора риска обеспечения продовольственной безопасности от основных конкурентов внешнего рынка (США, ЕС и др.), зависит от эффективности использования достижений научно-технического прогресса в технологиях производства продукции.

Опыт развитых стран и отечественный опыт показывают, что направление улучшения качества технологических процессов и, как следствие, качества и себестоимости конечной продукции, является одним из важных составляющих успешного развития сельскохозяйственных предприятий в конкурентной среде. Согласно технического регламента Таможенного Союза «О безопасности зерна» (ТР ТС 015/2011) производственный контроль качества зерна является обязательным. Гарантия качества кормов в соответствии с ТР ТС 201/00/ТС «О безопасности кормов и кормовых добавок» (проект) также должна обеспечиваться проведением производственного контроля за их изготовлением. Поскольку качество и безопасность пищевых продуктов зависят от загрязнения агроэкосистем и применяемых технологий Международная организация по стандартизации (ИСО) ввела в действие систему стандартов, где наряду с анализом качества потребляемой продукции предусматривается мониторинг качества технологий возделывания сельскохозяйственных культур. Таким образом, роль непосредственных товаропроизводителей отнесена к определяющему фактору конкурентоспособности произведенной продукции.

Сегодня много пишется и говорится о прорывных, информационных, креативных технологиях, однако, примеров, отражающих реальность этих определений, мало прослеживается. Оценкой, составляющей суть данных определений, является изменение

экономических результатов хозяйственной деятельности предприятий, выражающейся в росте урожайности, энергоресурсосбережении, в повышении качества и безопасности продукции, а также процессов ее производства, уборки, обработки и хранения. К сожалению, в комплексе мер преодоления технологического отставания не уделяется должного внимания такому направлению научно-технического прогресса как метрологическое обеспечение. Метрологическое обеспечение (МО) производства относится к одному из определяющих и инновационных для нашего сельского хозяйства факторов, влияющих практически на все поименованные результаты работы предприятий посредством обеспечения необходимого уровня информационной поддержки применяемых управленческих решений. Почти 40 лет назад президент академии наук СССР А.П.Александров отмечал, что метрология является важнейшей стороной сложного процесса усовершенствования технологий и качества продукции.

Накопленный в стране опыт, в том числе многолетний (более 30 лет) опыт работы коллектива лаборатории, возглавляемой автором, в хозяйствах разных регионов страны (элитно-семеноводческий колхоз «Борец» Раменского района Московской области; о.х. ВИМ «Каменка»; рисосовхоз «Красноармейский» Краснодарского края и др.) показал, что введение приборов в систему управления технологическими процессами производства зерна и заготовки кормов, позволяет привести в действие большую группу интенсивных внутрихозяйственных факторов, обеспечивающих повышение качества, снижения потерь, экономию энергоресурсов. Применение приборов стимулирует поиск прогрессивных форм и методов организации и технологии использования сельскохозяйственной техники, позволяющих принимать упреждающие мероприятия от механического, теплового и биологического видов воздействий на продукцию. Подтверждением отмеченного являются многочисленные отзывы хозяйств и предприятий, применяющих приборы.

Проблема метрологического обеспечения требует комплексного подхода к решению организационно-правовых, финансовых, кадровых и научно-технических задач. В технической части метрологическое обеспечение предусматривает комплексное научно-обоснованное оснащение производства средствами измерений и автоматизации. Они должны стать составной частью технологий и технических средств, используемых в сельскохозяйственном производстве. Такой подход позволяет на уровне предприятия принимать взаимосвязанные по всем этапам производственного процесса управленческие решения. Метрологическое обеспечение нельзя отделить от технического регулирования, предусматривающего объективную количественную оценку параметров качества, безопасности, экологичности выполняемых процессов, что может быть достигнуто с использованием соответствующих средств измерений.

По мере насыщения сельскохозяйственного производства средствами измерений и автоматизации (такая тенденция в настоящее время имеет место, главным образом, на использовании средств зарубежных производителей) обостряется проблема обеспечения их правильной эксплуатации, своевременной поверки, калибровки и ремонта.

На основании анализа научных, научно-производственных, информационных, коммерческих журналов; материалов симпозиумов, конференций, семинаров; трудов научно-исследовательских институтов и университетов сельскохозяйственного профиля, а также концепций по ряду направлений развития отрасли нами дана оценка состояния метрологического обеспечения в сельском хозяйстве. Основные составляющие оценки следующие:

- ликвидация ведомственной метрологической службы привела к ее дезинтеграции;
- в ведомстве нет структуры, отвечающей за состояние используемой в хозяйствах измерительной техники;
- формирование технической базы для контроля управления технологическими процессами осуществляется стихийно и определяется компетенцией и финансовым со-

стоянием предприятий, что приводит к применению средств измерений, не утвержденных типов, не поверенных и с просроченными поверочными интервалами;

- на отечественном рынке преобладают приборы и лабораторное оборудование зарубежных производителей при большой конкуренции приборов одного назначения;

- зарубежная измерительная техника технологического назначения практически не обеспечена сервисными услугами и не адаптирована к российским условиям;

- не отлажены нормативно-правовые отношения пользователей средств измерений и обслуживающих структур, а используемые нормативно-справочные материалы не отвечают настоящему организационно-техническому уровню;

- структуры, имеющие в той или иной мере отношение к МО, фактически не оказывают услуги товаропроизводителям в освоении современных приборов и средств автоматизации и в их эффективном использовании в технологических процессах;

- в программах позитивно работающих центров обучения не получают отражения проблемы метрологического обеспечения систем технологий;

- в отсутствие прослеживаемости проверок, поверок, калибровок приборов не обеспечивается доверие к полученным результатам измерений;

- сельский товаропроизводитель не защищен от недостоверных оценок показателей качества и количества его продукции по причине отсутствия независимых служб и средств измерений с требуемой метрологией.

В этих условиях не представляется возможным обеспечить на уровне сельских производителей практическую реализацию Ф.З. «Об обеспечении единства измерений». Следствием такого состояния с метрологическим обеспечением является обострение с проявлением технико-технологических, социальных, экологических и техногенных рисков при производстве, уборке, обработке, хранении и реализации продукции сельского хозяйства, снижающих ее конкурентоспособность.

Состояние зернового производства определяет продовольственную безопасность, а ориентация на экспорт предъявляет высокие требования к качеству зерна. Отражением многоплановых рисков при производстве зерна являются сведения, приведенные в таблице

Данные таблицы 1 не располагают к оптимистическому выводу об устойчивости достигнутых в последние годы позитивных изменений в сельском хозяйстве. Согласно [1] эти изменения достигнуты за счет использования импортных технологий, машин и сельскохозяйственных достижений, что создает риски для продовольственной безопасности. Вместе с тем, к 2020 году Министерство сельского хозяйства намерено довести объем экспорта зерна до 30 млн. т [2]. Одним из определяющих и наиболее динамичных направлений реализации этих задач является изменение существующего состояния управления производством зерна, которое в своей основе еще базируется на опыте, традициях и интуиции сельхозпроизводителей.

Достоверная и оперативная информация, позволяющая принимать объективные управляющие решения на каждой из технологических операций процесса производства, минимизирует риски снижения качества и безопасности продукции, роста потерь и энергозатрат на ее производство. Оценки рисков, сопровождающих процессы производства зерна и заготовки травяных кормов, приведены в работах [3,4].

В настоящее время принят целый ряд Федеральных законов и постановлений Правительства России, направленных на усиление государственного контроля за производством, рациональным использованием и безопасностью сельскохозяйственной и пищевой продукции. Особая роль при этом отводится средствам измерений. В настоящее время рынок средств измерений предлагает производителям зерна необходимый перечень технологических приборов, позволяющих получать оперативную информацию для принятия решений на любом этапе производственного процесса. Эффективность их практического применения зависит от достоверности получаемой информации. Поскольку на отечественном рынке доминируют приборы и лабораторное оборудование

зарубежных производителей, то проблема оценки их адаптированности к российским культурам и условиям производства приобрела исключительную актуальность.

Таблица 1 Оценки эффективности системы управления производством зерна.

№	Фактор оценки	Источник
1	Низкое качество хлеба из-за отсутствия комплексной системы оценки качества зерна	Хлебное место. Материалы информации-онных агентств.- Агромакс.-№9(25).-2011. Интервью зам. министра Шестакова И.В.
2	Низкое качество зерна: 2/3 урожая пригодны на фуражные цели	Чекмарев П.А. Производство качественного зерна- важнейшая задача АПК России. //Земледелие. -№4-2009.
3	Хлебопекарный рынок наполняется не качественной и не безопасной для здоровья продукцией.	Рыбаков А. Из какой муки социальный хлеб?// Сельская жизнь.- №76.-2008.
4	Из 92 млн. т зерна (2013) только 58 млн. т является товарным.	Хайруллин А. Есть ли у государства перспективная стратегия?// Крестьянская Русь.-№4.-2014.
5	Плохое качество зерна: низкое содержание белка, зараженность возбудителями болезней, повышенное содержание микотоксинов. (несоответствие требованиям ВТО).	Межведомственная комиссия по безопасности в экономической и социальной сфере Совета безопасности РФ.-Романенко Г.А.// Сельскохозяйственные машины и технологии.-№2.-2013.
6	Из-за плохого качества семян страна не добывает 10...15 млн. т	Аграрные известия-№4(45). -2010
7	Себестоимость зерна в 2012 году выросла в сравнении с 2000г в 4,5 раза.	Драгайцев В.И. Об эффективности научно-технического прогресса при производстве зерновых. //Техника и оборудование для села.-№6.-2013
8	Снижение урожайности по причине поражения растений болезнями и вредителями достигает 20...25%.	Поздняков Ю.В. Механизация защиты семенного материала от болезней и вредителей.- Екатеринбург: УрГСХА.-2001.
9	Приведен факт порчи зерна пшеницы Государственного интервенционного фонда по причине ненадлежащего хранения и отсутствия должного контроля со стороны ОАО «Объединенная зерновая компания».	Шемелина Н. Кто ответит за качество и безопасность зерна?// Земля и люди.-№6(13).-2011.
10	Грамотное применение химических и биологических средств защиты растений позволяет сохранить от 15 до 40% урожая.	Болотникова С. Мертвая и живая вода агротехнологий.//Аграрная Кубань-№4.-2015.

Известно, что средства измерений влажности являются наиболее востребованными в растениеводстве (зерно, корма, лен) средствами измерений. Испытания ряда зерновых влагомеров ведущих зарубежных производителей с использованием отечественных культур и сортов показали, что они нуждаются в проведении калибровки [5]. В отсутствие отраслевой метрологической инфраструктуры на практике применяют приборы с характеристиками, заявленными производителями. Отечественный приобретатель

прибора доверяет фактически рекламным характеристикам и эксплуатирует его без оценки метрологии до выхода из строя чаще всего каких-либо физических свойств (поломок), что создает риски от использования недостоверной информации.

Создание отвечающих рыночной экономике организационно-правовых условий и использование прогрессивной измерительной техники, обеспечивающих единство и достоверность измерений на национальном и признаваемых на международном уровне, одна из важных и сложных задач метрологии. Для ее решения необходима национальная система метрологического обеспечения сельского хозяйства, призванная определять целенаправленную научно-техническую и образовательную деятельность в области метрологического обеспечения отрасли.

Организация в ведении Министерства сельского хозяйства инновационного научно-методического образовательного центра «Метрологическое обеспечение систем технологий (ИНМОЦ «МОСТ»))» должно стать одним из первых шагов в этом направлении. Главными задачами центра являются анализ состояния и разработка основных направлений в деятельности МО отрасли. Это даст возможность оценить соответствие метрологического обеспечения достигнутому мировому уровню прогресса в этой области, а также станет исходным материалом для обоснования необходимости решения проблемы на уровне Министерства, Правительства и законодательной власти.

Список литературы

1. Инновационное развитие АПК.// Информационный бюллетень МСХ РФ.-2014. - №12.- с.1
2. Леонова Л. Поставлена задача по твердым сортам зерна//Защита растений.-2013.- №9.-с.2.
3. Секанов Ю.П., Колесников Д.С. Производство зерна: риски на уровне производителя. //Труды IV Междн. науч.-техн. конференции «Современные тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов СЭТТ-2011)»-т.2.-М.: ФГБОУ ВПО МГАУ им. Горячкина В.П.-2011.-с.342-352
4. Секанов Ю. Влажность травяных кормов.// Lambert Academic Publishing.-Германия.-2015.-с.59
5. Секанов Ю.П. Влияние качества зерна на метрологические и эксплуатационные характеристики электрических влагомеров.// Труды 9-ой Междн. научн.-техн. конф. «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве»-ч.2.-М.:ГНУ ВИЭСХ РАН.-2014.- с.185-190.

УДК 631.371:631.365.22

УПРАВЛЕНИЕ СУШКОЙ ЗЕРНА: ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА CONTROL OF GRAIN DRYING: THEORY, PRACTICE

Юрий Секанов*, Анна Колесникова **

Yuriy Sekanov*, Anna Kolesnikova**

* Российский научно-исследовательский институт сельскохозяйственных приборов,
Россия, Москва

Russian Research Institute of agricultural instruments, Russia, Moscow
(E-mail: u.sekanov@gmail.com)

**Национальный исследовательский университет «Высшая Школа Экономики»,
Россия, Москва

National Research University Higher School of Economics, Russia, Moscow
(E-mail: kolesnikova.hse@gmail.com)

Аннотация: Рассмотрено состояние с управлением современными зерносушилками, проведен анализ применяемых в настоящее время систем автоматического регулирования конечных параметров зерна.

Abstract: the state with the management of a modern grain drying installations, the analysis of currently used systems of automatic control of the final characteristics of the grain.

Ключевые слова: зерносушилки, зерно, влажность, управление, параметры, качество.

Keywords: grain dryer, grain, moisture, management, options, quality.

Обеспечение конкурентоспособности сельского хозяйства поставило в число первоочередных задач товаропроизводителей снижение производственных расходов при одновременном выполнении требований к качеству и безопасности продукции, процессов ее производства, хранения и реализации.

Сушка зерна в системе послеуборочной обработки является наиболее дорогостоящей энергоемкой операций в большой степени влияющей на его конкурентоспособность. В себестоимости зерна доля энергозатрат растет [1].

Для сушки используют шахтные, карусельные, конвейерные, напольные и др. зерносушилки, а также бункера активного вентилирования и аэрируемые хранилища. Значительный сектор отечественного рынка занимают зарубежные сушилки мало изученные как объект управления в российских условиях применения. Зерносушилки шахтного типа преобладают в ряду применяемой техники. Как объект управления эти сушилки изучены наиболее полно.

Многообразие конструкций и технологических особенностей сушильных установок, применяемых в сельском хозяйстве, осложняют разработку универсальных методов и средств управления режимами сушки. Однако, независимо от технологических схем задача оптимизации процесса сушки сводится к обеспечению максимума производительности и минимума отклонений конечной влажности от кондиционного значения при строгих ограничениях температуры нагрева зерна. Иными словами, оптимизация процесса сушки по параметрам качества может быть достигнута на базе достоверной информации о влажности и температуре зерна. Качественно выполненная сушка зерна ускоряет процесс его послеуборочного дозревания, обеспечивает стойкость при хранении, улучшает технологические и семенные свойства. Отклонения влажности на выходе сушилки в любую сторону от номинальной величины влияет на экономику предприятия. Так, по данным [2] пересушка зерна кукурузы от установленной влажности 15,5% до 14% приводит к дополнительным затратам 260\$ на тонну, а до 13% - 429\$. При недосушке зерна создаются риски в процессе его хранения. Для продовольственной пшеницы содержание влаги, наряду с содержанием белка и клейковины, является одним из обязательных параметров экспортных зерновых контрактов.

Значительным количеством работ отечественных и зарубежных исследователей обоснована целесообразность автоматизации зерносушилок. Предложены принципы построения и структуры автоматических систем, разработаны и испытаны опытные образцы, получены оценки их экономической эффективности. Наиболее продуктивным периодом исследований по автоматизации установок для сушки зерна, травяных кормов, хлопка и т.д. приходится на 60-80-ые годы прошлого столетия. Этому способствовало внедрение в сельскохозяйственное производство поточных технологий обработки зерна, заготовки травяных кормов. Многолетние исследования ВИМ, ВИЭСХ, ВИСХОМ, ЧИМЭСХ, ЛСХИ и др. зерноочистительно-сушильных комплексов показали, что их фактическая производительность была на 25-30% ниже потенциально возможной, значительная часть обрабатываемого зерна не соответствовала требованиям кондиций при затратах энергоресурсов, превышающих расчетные значения. Одним из основных лимитирующих звеньев в работе комплексов, как показали результаты исследований, являлись зерносушильные отделения. На их долю приходилось до 85% всех контрольно-регулирующих операций поточных линий [3,4]. В этот период были заложены научные основы и созданы автоматические устройства, стабилизирующие основные параметры агента сушки и высушиваемого материала. Их разработчики Берлинер М.А., Жидко В.И., Гержой А.П., Растринин В.Н., Краусп В.Р., Мильман И.Э., Черепанов П.А., Гуляев Г.А., Секанов Ю.П., Опишанский В.Н., Колесов Л.В. и др. внесли заметный вклад в решение задач автоматизации зерносушилок. Широкое внедрение в систему послеуборочной обработки зерна, бункеров активного вентилирования способствовало развитию исследований по их автоматизации. Исследованиями и разработками систем автоматического регулирования вентилируемыми бункерами посвящены работы Крауспа В.Р., Муругова В.П., Кучинскаса В.Ю., Гуляева Г.А., Степанова А.И., Черевикова В.Д., и др.

Длительное время развитие автоматизации шло спонтанно путём накопления решений частных задач. Отставание с разработкой специализированных измерительных средств (датчиков), исполнительных механизмов и неподготовленность сушилок к автоматизации сдерживали практическую реализацию разработок.

Разработка систем автоматического регулирования влажности зерна при строгих ограничениях его температуры велась по двум направлениям: созданию систем регулирования по параметрам агента сушки и систем, основанных на непосредственном измерении конечной влажности зерна. Сложность измерения влажности зерна в потоках определила развитие первого направления. В таких системах регулирование осуществляется чаще всего по температуре отработанного теплоносителя или по падению температуры теплоносителя, прошедшего через зерно. Известно, что при постоянной входной температуре и скорости теплоносителя температура прошедшего слой зерна теплоносителя будет определять среднюю влажность слоя.

Управление процессом сушки по параметрам сушильного агента не всегда обеспечивает требуемую влажность зерна на выходе сушилки. Это объясняется тем, что в реальных условиях имеют место возмущения, которые нельзя компенсировать поддержанием только параметров теплоносителя. Структуру таких систем значительно усложняет необходимость компенсации зависимости температуры от влажности и температуры поступающей на сушку зерновой массы. Таким образом, данный способ регулирования не освобождает от необходимости иметь средства для измерения влажности зерна. В системах автоматического контроля и управления процессом сушки по температуре зерна так же необходимы приборы для контроля влажности. Дело в том, что зерносушилки являются объектами с распределенными параметрами. Это выражается в неравномерном нагреве и сушке зерна. Неравномерность полей распределения влажности зерна до 4% и температуры его нагрева до 5°C и более в горизонтальном сечении шахта и непостоянство этих полей во времени усложняют определение мест расположения и количество датчиков [6,7,8]. На распределение полей оказывают влияние качест-

во очистки зерновой массы и конструкция выгрузного аппарата. Так, в зерносушилках фирмы LAW (Франция) контроль температуры отработанного теплоносителя осуществляется по среднему значению измерений четырех датчиков, устанавливаемых в нижней зоне сушки. По полученной таким образом температуре теплоносителя определяют качество ведения процесса сушки. В системах контроля и управления по температуре зерна датчики должны исключать влияние на результаты измерения агента сушки. В противном случае показания температуры зерна будут существенно завышены [6].

В конструкциях современных отечественных и зарубежных зерносушилок, представленных на отечественном рынке, не предусмотрено оснащение средствами измерений влажности зерна в потоке, что снижает их технический уровень и не позволяет реализовать повышение производительности (в среднем на 15%) и качество выполнения технологического процесса. Основная причина лежит в финансовых возможностях производителей зерна. В этих условиях, а так же острой конкуренции, производительность зерносушилок стремятся снизить их цены путем упрощения. Поэтому остаются невостребованными поточные влагомеры, представленные на российском рынке только зарубежными фирмами. Они находят применение в системах управления переработкой зерна на промышленных предприятиях. В системах управления процессами сушки в сельском хозяйстве задачи измерений влажности зерна решают с помощью дискретных быстродействующих влагомеров.

Большое количество разномарочных зарубежных приборов, преобладающих на отечественном рынке и не всегда адаптированных к российским условиям эксплуатации и материалам [9,10], создают большую вероятность рисков, проявляющихся в снижении качества зерна и росте энергозатрат на сушку.

Направление повышения качества каждой из технологических операций, включая и сушку, является одной из важнейших задач успешного развития зернового производства в конкурентной среде. Следствием дефицита исследовательской деятельности в последние 15-20 лет стало ослабление внимания к формализации термовлажностных процессов при сушке зерна, необходимых для построения моделей управления зерносушилками.

Изложенное выше позволяет сделать вывод о том, что задачи по автоматизации зерносушилок, обеспечивающих оптимизацию процессов сушки, требует решения. Современные достижения в области электроники и вычислительной техники позволяют реализовать весьма сложные законы и алгоритмы оптимального управления процессами сушки, которые нельзя было реализовать с помощью классических регуляторов. В этой связи, создание систем, основанных на компьютерном прогнозировании продолжительности сушки по исходным параметрам материала и теплоносителя, является перспективным направлением исследований.

Список литературы

1. Стребков Д.С., Тихомиров А.В. Перспективные направления развития энергетической базы села и повышение энергоэффективности сельхозпроизводства//Достижения науки и техники АПК. №10.2009.
2. Регулятор состояния зерна// Э.И. Хранение и переработка зерна. (Серия «Элеваторная промышленность за рубежом»)-вып.8.-1989.- с.17.
3. Кутовой В.В. Исследование системы контроля поточной линии послеуборочной обработки семян // Автор. канд. дис. – Челябинск: 1975
4. Гуляев Г.А. Автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна. М.: Агропромиздат. 1990. с.240
5. Секанов Ю.П. Контроль влажности зерна в колхозах и совхозах. М.: «Знание». 1977. с.64
6. Цыдендоржиев Б.Д. Система управления термовлажностными режимами в шахтных зерносушилках с коробами // Автор. канд. дис. – М.: 2003

7. Андрианов Н.М., Карташов С.В., Лебедев И.С. Методы перераспределения потоков газов и теплоты в шахтных зерносушилках // Труды Межд.науч.-практ.конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)-СЭТТ-2011». -ч.2.-Иваново:ФГБОУ ВПО «ИХТУ»-2011.-с.71-76.

8.Секанов Ю.П. Влагометрия сельскохозяйственных материалов. М.: Агропромиздат. 1985. с.160

9. Секанов Ю.П. Влияние качества зерна на метрологические и эксплуатационные характеристики электрических влагомеров // Труды 9-ой Межд. Научно-техн. конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». -ч.2.-М.: ГНУ ВИЭСХ РАН.-2014. с.185-190

10. Секанов Ю.П., Степанов М.А. Результаты исследований электрических влагомеров с разрушением и сжатием зерна в измерительной ячейке. // Сб. трудов межд. науч.техн. конференции «Проблемы ресурса и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК». -т.1.-Иваново: ФГБОУ ВПО «ИХТУ».-2014.-с.84-90.

УДК 674.047

МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СУШИЛЬНЫМИ КАМЕРАМИ ДЛЯ ДРЕВЕСИНЫ MULTI-CHANNEL CONTROL SYSTEM FOR WOOD DRYING KILNS

И.В. Сапожников, Н.В. Скуратов*,
И.И. Алексеева***, Д.А. Самойленко****, А.В. Протасова*****
I.V. Sapozhnikov**, N.V. Skuratov*,
I. I. Alexeeva***, D. A. Samoilenko****, A, V, Protasova*******

**Московский государственный университет леса, Россия, Мытищи,
(e-mail: skuratov@mgul.ac.ru).*

***Московский государственный университет леса, Россия, Мытищи,
(e-mail: gosha@mgul.ac.ru).*

****Московский государственный университет леса, Россия, Мытищи,
(e-mail: alexseeva@mgul.ac.ru).*

*****Московский государственный университет леса, Россия, Мытищи,
(e-mail: samoilenko@mgul.ac.ru).*

******Московский государственный университет леса, Россия, Мытищи,
(e-mail: protasova@mgul.ac.ru)*

Moscow State Forest University, Russia, Mytishi

Аннотация: Представлена многоканальная система управления конвективными сушильными камерами для древесины. Система управления построена на базе двухканального регулятора 2TRM0 и многоканального аналого-цифрового преобразователя. Описаны основные возможности системы и команды управления.

Ключевые слова: сушильная камера; древесина; система управления; интерфейс; влажность.

Abstract: The multi-channel control system for convective wood drying kilns is presented. The control system is based on the two-channel controller 2TRM0 and multi-channel analog-to-digital converter. Main features of the system and control commands are described.

Keywords: drying kiln; wood; control system; interface; moisture content.

Современные лесосушильные камеры, оснащенные системами автоматического управления процессом, позволяют при надлежащей эксплуатации обеспечивать высокое качество сушки древесины. Однако далеко не каждое предприятие в состоянии

приобрести новые сушильные камеры. Многие из них пытаются реконструировать имеющиеся устаревшие камеры или построить сушилки, не всегда оснащая их даже простейшей автоматикой. Такие камеры не в состоянии обеспечить качественную сушку древесины. Качество сушки можно значительно повысить, лишь при использовании современных систем управления, применяя надежную автоматику и программное обеспечение.

В настоящее время ряд зарубежных и отечественных фирм производят программируемые контроллеры управления автоматикой сушильных камер. Среди них такие известные фирмы, как NARDI с программным обеспечением LEONARDO, MUHLBOCK/VANICEK с процессором MB8000, SECAL PLUS 3000. В большинстве случаев производственные фирмы предлагают свою автоматику для своих же сушильных камер. Как правило, глубокая модернизация уже существующих камер требует значительных затрат. Для небольших и средних предприятий такая модернизация может оказаться слишком дорогой.

Разработанная система контроля и управления 16 камерами конвективной сушки древесины на основе двухканального регулятора 2TRM0 российской фирмы ОВЕН и платы АЦП L – 761 фирмы Л – КАРД является недорогим решением для сушильных предприятий. Регуляторы 2TRM0 измеряют и поддерживают заданные температуру и относительную влажность воздуха в камере, а плата АЦП осуществляет преобразование аналоговых сигналов, поступающих с регулятора 2TRM0, по 32 каналам. Выбор платы АЦП L – 761 был обусловлен ещё и тем, что она осуществляет гальваническую развязку входных линий и сигналов, поступающих в персональный компьютер. Плата устанавливается в PCI слот персонального компьютера и поставляется с библиотекой программ обращения к внутренним адресам и регистрам на языке программирования C и Pascal. На плате имеется 16 цифровых каналов выхода и 2 аналоговых сигнала с встроенного ЦАП. Это позволяет создавать программный комплекс не только регистрации данных, но и управления для конвективных камер сушки. Два цифровых канала платы L – 761 выделяются для релейного управления устройствами, регулирующими температуру и влажность воздуха в камерах, а из оставшихся 16 каналов четыре – для их коммутации.

Программный комплекс регистрации данных и управления 16 камерами сушки древесины был написан на языке программирования Object Pascal. Программа носит название Auto Dry. Интерфейс пользователя программного комплекса представляют шесть форм, среди которых на главной форме представлены все основные элементы управления процессом регистрации данных. После загрузки программы при правильной её установке на экране появляется главная форма комплекса Auto Dry, рисунок 1. Если на компьютере не установлены библиотеки доступа к плате L – 761 и драйвера, то первым появится предупреждение в виде модальной формы. Комплекс в этом случае также может работать, но в ограниченном режиме. В частности, не будет доступа к командам начала регистрации данных и управлению камерами. Возможен только просмотр ранее записанной информации.

При нормальном запуске программы оператор может выбрать камеру, изменяя численное значение её номера, устанавливать вид материала: Хвойный или Лиственный, основные характеристики материала (порода и размеры), изменять влажность материала и устанавливать на панели температуру и влажность воздуха. При нажатии на кнопку Start начинается регистрация параметров температуры и влажности, которые поступают с выбранной камеры. Нажатие кнопки Save приводит к автоматической записи данных, которые хранятся в памяти компьютера на жесткий диск. При нажатии кнопки Stop происходит действие аналогичное нажатию кнопки Save и прекращается опрос буфера памяти платы АЦП по выбранному каналу.

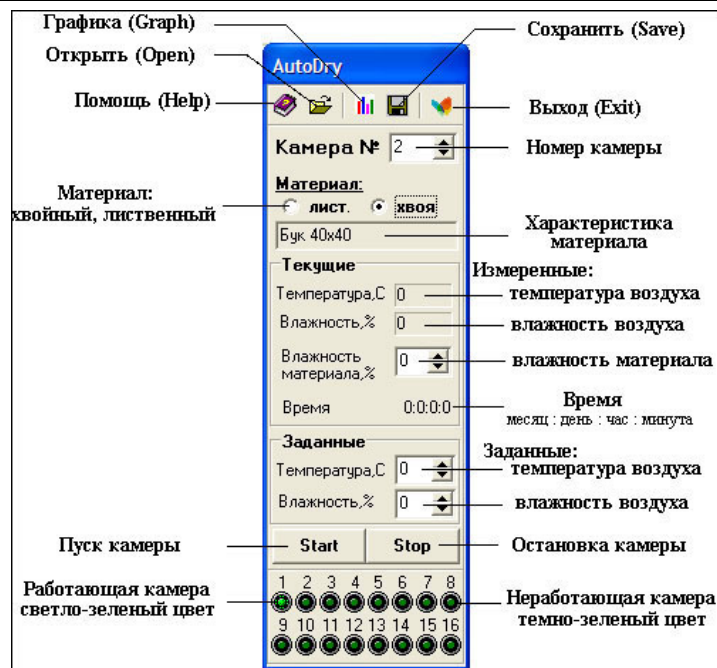


Рис. 1. Главная форма управления программным комплексом Auto Dry

При нажатии кнопки Graph можно в графическом режиме просмотреть записанные данные параметров сушки, распечатать их на принтере или сохранить графики в выбранном графическом формате. Данные на график выводятся посуточно. Нажатие кнопки Help выводит на экран монитора форму помощи с развернутой инструкцией по работе с комплексом управления Auto Dry. В программе предусмотрена возможность настройки собственных параметров, в частности, запрет на включение отдельных камер, установка на входе аналоговых каналов цифрового фильтра промышленной частоты, восстановление работы программы при аварийном отключении питания, установление интервала времени опроса каналов, ввод пароля оператора и многое другое.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ METHODS OF WOOD DRYING QUALITY CONTROL

Н.В. Скуратов*, И.В. Сапожников**,
И.И. Алексеева***, Д.А. Самойленко****, А.В. Протасова*****
N. V. Skuratov*, I. V. Sapozhnikov**,
I. I. Alexeeva***, D. A. Samoilenko****, A. V. Protasova*****

*Московский государственный университет леса, Россия, Мытищи,
(e-mail: skuratov@mgul.ac.ru).

**Московский государственный университет леса, Россия, Мытищи,
(e-mail: gosha@mgul.ac.ru).

***Московский государственный университет леса, Россия, Мытищи,
(e-mail: alexseeva@mgul.ac.ru).

****Московский государственный университет леса, Россия, Мытищи,
(e-mail: samoilenko@mgul.ac.ru).

*****Московский государственный университет леса, Россия, Мытищи,
(e-mail: protasova@mgul.ac.ru).

Moscow State Forest University, Russia, Mytishi

Аннотация: Описаны отечественный и зарубежные методы контроля качества сушки древесины. Показано, что результаты оценки качества сушки существенно зависят от используемой методики.

Abstract: Domestic and foreign methods of wood drying quality control are described. It is shown that the results of evaluation of drying quality depend essentially on the method used.

Ключевые слова: сушка древесины; качество сушки; влажность; влагомер; напряжения.

Keywords: wood drying; drying quality; moisture content; moisture meter; stresses.

Продукция высокого качества может быть изготовлена только из хорошо высушенной древесины. Как правило, требования к качеству сушки определяются назначением высушенной древесины. Необходимо различать понятия качество древесины и качество сушки. Качество древесины определяется только ее индивидуальными свойствами и наличием пороков. Качество сушки в значительной мере зависит от выбора режима и соблюдения технологии.

В разных странах приняты свои правила (рекомендации или стандарты) для оценки качества сушки пиломатериалов. При оценке качества сушки, как правило, определяют среднюю конечную влажность, перепад влажности по толщине досок, разброс средней влажности досок в партии. При наличии ограничений по уровню напряженного состояния, дополнительно измеряют остаточные сушильные напряжения. Различные дефекты, связанные со специфическими свойствами пиломатериалов или неправильным проведением процесса сушки также принимаются во внимание. Чем меньше отклонение конечной влажностью древесины от заданной величины, разброс конечной влажности досок в партии, перепад влажности по толщине пиломатериалов и остаточные напряжения, тем выше качество сушки.

В настоящее время для измерения влажности древесины в основном используются резистивные и диэлектрические влагомеры. Классический весовой метод используется лишь как справочный или в специальных случаях. Современные влагомеры, выпускаемые ведущими производителями, позволяют измерять влажность древесины с достаточно высокой точностью. Однако отечественные руководящие технические материалы (РТМ) по технологии камерной сушки древесины [1] предлагает использовать влагоме-

ры для измерения влажности пиломатериалов толщиной менее 40 мм. В то же время европейский стандарт EN 13183-2 [2] позволяет измерять влагомерами влажность пиломатериалов любой толщины. Аналогичные рекомендации имеются в технической литературе США [3].

Для оценки уровня остаточных напряжений в высушенной древесине в разных странах используется метод силовых секций или метод половинок. Оба метода базируются на измерении деформаций, зависящих от напряженно-деформированного состояния древесины после сушки. В России величину сушильных напряжений принято оценивать по относительному изгибу зубцов силовой секции, имеющих фиксированную толщину [1]. В аналогичной процедуре, используемой в США, оценивается изгиб зубцов, толщина которых зависит от толщины пиломатериала [3]. В то время как в странах ЕС сушильные напряжения измеряются с помощью метода половинок [4]. Очевидно, что разные методики оценки остаточных сушильных напряжений могут давать разные результаты.

Цель данной работы состоит в оценке качества сушки пиломатериалов различных размеров и пород различными методами и сравнении полученных результатов.

Для экспериментов были использованы 40x100 мм березовая, 30x100 мм дубовая, 30x140 ольховая и 40x140 мм сосновая доски длиной 3-4 метра, высушенные в промышленных сушильных камерах до влажности 8%. Влажность древесины измерялась игольчатым влагомером фирмы GANN. Для измерения остаточных напряжений из всех досок было выпилено 240 силовых секций.

В соответствие с отечественным методом [1] остаточные сушильные напряжения оценивались по относительному изгибу зубцов. Для 1 и 2 категории качества сушки их изгиб не должен превышать 1,5% и 2% соответственно. Третья категория качества сушки напряжения не ограничивает. Метод силовых секций используется и в США. Однако их силовые секции имеют другие размеры [3]. В странах Евросоюза для оценки уровня остаточных напряжений используется метод половинок. Уровень напряжений определяют по величине зазора между половинками силовой секции, обрезанной до 100 мм и расколотой пополам [4].

Измерения показали, что отклонение средней влажности всех образцов от заданного значения 8% не превышало $\pm 1.5\%$. Максимальный перепад влажности по толщине досок составил 1,8%. Полученные значения соответствовали высшей категории качества сушки, определенного как по отечественной, так и по зарубежным методикам.

Как и ожидалось, результаты определения уровня остаточных напряжений, а, следовательно, и категории качества сушки зависят от метода оценки напряжений (Рис. 1). Только ольховая доска получила 3 самые высокие оценки качества сушки, что объясняется очень низким уровнем напряжений. Самую высокую оценку качества сушки дает европейская методика, немного ниже – отечественная методика, а самую низкую – американская методика.

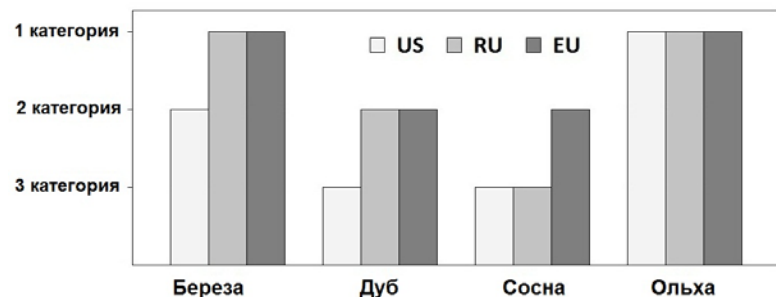


Рис. 1. Качество сушки древесины, определенное по российской (RU), американской (US) и европейской (EU) методикам

Эксперименты показали, что использованные методы оценки остаточных напряжений имеют разную чувствительность, что влияет на оценку качества сушки древесины. Представляется, что результаты исследований могут представлять практический интерес при оценке качества сушки пиломатериалов и в том числе экспортируемых.

Список литературы

1. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушке древесины. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. 143 с.
2. EN13183-2. Moisture content of a piece of sawn timber. Estimation by electrical resistance method.
3. Denig, Joseph; Wengert, Eugene M.; Simpson, William T. 2000. Drying hardwood lumber. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–118. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 138 p.
4. CEN standard ENV 14464:2002 Sawn timber - Method for assessment of case-hardening.

УДК 66.063.2.011

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФфуЗИИ РАСТВОРИТЕЛЕЙ В МАССИВНЫХ ТЕЛАХ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО ИСТОЧНИКА

В.П. Беляев*, С.В. Мищенко**, П.С. Беляев***

*Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов, (e-mail: belvp8@rambler.ru).

**Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов, (e-mail: msv@tstu.ru).

***Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов, (e-mail: bps@asp.tstu.ru).

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

Аннотация: В докладе рассматриваются вопросы применения математического моделирования для получения теоретической оценки погрешности измерения момента достижения максимума концентрации растворителя в массивном капиллярно-пористом теле при реализации метода неразрушающего контроля коэффициента диффузии.

Abstract: The report considers the issues of mathematical modeling for obtaining a theoretical error evaluation of the moment when the maximum solvent concentration is achieved in massive capillary-porous body during diffusion coefficient control for the non-destructive method.

Ключевые слова: капиллярно-пористый материал; массивное изделие; коэффициент диффузии; неразрушающий контроль.

Keywords: capillary porous material; massive product; diffusion coefficient; non-destructive testing.

При необходимости исследований коэффициента диффузии растворителей в массивных изделиях из капиллярно-пористых материалов (КПИМ) можно использовать метод неразрушающего контроля, основанный на импульсном линейном воздействии дозой растворителя на плоский участок контролируемого изделия [1]. Анализ показывает, что основной доминантой суммарной погрешности определения искомого коэффициента является погрешность $\delta\tau_{\max}$ определения момента достижения максимума концен-

трации растворителя на заданном расстоянии от линии нанесения импульсного воздействия [2].

Целью данной работы является получение теоретической оценки зависимости погрешности $\delta\tau_{\max}$ от точности измерения локальной концентрации растворителя в контролируемом изделии из капиллярно-пористых материалов [2].

При осуществлении метода [1] наносят импульсное линейное воздействие на плоскую поверхность массивного изделия в виде импульса объемом Q диффузанта и измеряют изменение во времени электродвижущей силы (ЭДС) гальванического преобразователя на заданном расстоянии r_0 от точки нанесения импульса. Коэффициент диффузии D определяют по формуле:

$$D = r_0^2 / (4\tau_{\max}), \quad (1)$$

где τ_{\max} – время, соответствующее максимуму на кривой $U(r_0, \tau)$ изменения концентрации на расстоянии r_0 от источника. Причем в силу монотонности статической характеристики ГП [3] максимумы на кривых изменения концентрации и ЭДС достигаются в один и тот же момент времени τ_{\max} .

Процесс распространения диффузанта в массивном изделии после нанесения импульса дозой растворителя описывается краевой задачей массопереноса в неограниченной среде при нанесении импульсного воздействия от линейного источника массы [1]. При этом изменение концентрации растворителя в зоне действия источника после нанесения импульса описывается функцией [1]:

$$U(r, \tau) - U_0 = Q / (4\pi D r_0 \tau \exp[r^2 / 4D\tau]), \quad (2)$$

где $U(r, \tau)$ – концентрация растворителя на расстоянии r относительно линии импульсного подвода дозы растворителя к изделию в момент времени τ ; ρ – плотность абсолютно сухого исследуемого материала; U_0 – начальная концентрация растворителя в материале в момент времени $\tau = 0$.

Пусть ΔU – абсолютная погрешность измерения концентрации U_{\max} . Тогда факт достижения максимума может быть ошибочно зафиксирован на восходящей ветви кривой изменения концентрации в точке 1 в момент времени τ_1 или на нисходящей ветви кривой в точке 2 в момент времени τ_2 . При этом абсолютная погрешность определения времени достижения максимума будет соответственно $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$.

Без ограничения общности примем $U_0 = 0$. Достижимое значение концентрации $U(r_0, \tau_1)$ в точке 1 слева от действительного значения максимума равно $U_{\max}(1 - \delta)$ и может быть получено из (2) с учетом (1):

$$U(r_0, \tau_1) = Q / (4\pi D r_0 \tau_1 \exp[\tau_{\max} / \tau_1]), \quad (3)$$

где $\delta = \Delta U \cdot (U_{\max})^{-1}$ – относительная погрешность измерения концентрации в точке максимума.

Разделив (3) на выражение для действительного значения максимума концентрации в момент τ_{\max} , которое несложно получить из (2) с учетом (1), имеем:

$$1 - \delta = \exp(1 - \tau_{\max} / \tau_1) \tau_{\max} / \tau_1 \quad (4)$$

Обозначим относительную погрешность определения времени достижения максимума в точке 1: $y = \Delta\tau_1 \cdot (\tau_{\max})^{-1}$, где $\Delta\tau_1 = \tau_{\max} - \tau_1$ – абсолютная погрешность определения момента достижения максимума в точке 1.

После несложных преобразований можно получить уравнение для определения зависимости относительной погрешности определения момента времени достижения максимума на восходящей ветви кривой в точке 1:

$$1 - \delta = (1 - y)^{-1} \exp[1 + 1 / (y - 1)]. \quad (5)$$

Аналогичным образом можно получить уравнение для расчета относительной погрешности $z = \Delta\tau_2 \cdot (\tau_{\max})^{-1}$ определения времени достижения максимума в точке 2:

$$1 - \delta = (1 + z)^{-1} \exp[1 - 1 / (z + 1)], \quad (6)$$

где $\Delta\tau_2 = \tau_2 - \tau_{\max}$ – абсолютная погрешность определения момента достижения максимума в точке 2.

В таблице 1 представлены рассчитанные по уравнениям (5) и (6) зависимости относительной погрешности определения времени достижения максимума на восходящей 1 и нисходящей 2 ветвях кривой изменения концентрации на окружности радиуса r_0 от погрешности измерения локальной концентрации растворителя δ .

Таблица 1. Зависимость погрешностей y и z определения τ_{\max}

$\delta \cdot 103$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
y-102	4,3	6,1	7,4	8,5	9,4	10,2	11,0	11,7	12,3	12,9
z-102	4,6	6,6	8,2	9,5	10,7	11,8	12,9	13,8	14,7	15,6

Выводы: полученные зависимости (5), (6) позволяют рассчитать значения погрешности $\delta\tau_{\max}$ для выбранной аппаратуры, характеризующейся конкретной точностью измерений.

Список литературы

1. Патент на изобретение РФ №2532763, МПК G 01N 13/00. Способ определения коэффициента диффузии влаги / Беляев В.П., Беляев П.С.; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2013135857/28; заявл. 30.07.2013; опублик. 10.11.2014, Бюл. № 31 – 7с.: ил.
2. Belyaev, V.P. The Design of a Measuring Instrument for Determining the Diffusion Coefficient of Solvents in Thin Articles Made of Capillary-Porous Materials / V.P. Belyaev, M.P. Belyaev, S.V. Mishchenko, P.S. Belyaev // Measurement Techniques.- January 2014, Volume 56, Issue 10, pp 1190-1196.
3. Mishchenko, S.V. Effective Diffusion Coefficient of Active Solvents in Composite Polymeric Materials/ S.V. Mishchenko, P.S. Belyaev, V.A. Gladkikh, E.N. Safronova // Drying Technology.-1999.- V. 17, № 10.-P. 2151-2167.УДК 664.8.047:536.24

КАЛОРИМЕТР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ ПАСТООБРАЗНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Нугманов А.Х.-Х.*, Краснов В.А.***, Максименко Ю.А.***

*, **, *** ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет», Россия, Астрахань, (amxsl@yandex.ru).
"Astrakhan state technical University", Russia, Astrakhan.

Аннотация. Предложен оригинальный метод определения теплоемкости пастообразных пищевых материалов. Метод апробирован для ряда плодовоовощных пастообразных продуктов. Реализация метода осуществляется на разработанной экспериментальной установке – калориметре, которая позволяет в течение нескольких минут получить результат высокой точности. Представлены результаты комплекса экспериментальных исследований по определению удельной теплоемкости пищевых материалов.

Abstract: We proposed an original method of determining the heat capacity of the paste-like food material. The method was tested for a number of fruit and vegetable pasty products. The implementation of the method is carried out on the developed experimental setup calorimeter, which allows for a few minutes to get the result of high accuracy. Presents the results of complex experimental studies to determine the specific heat capacity of food materials.

Ключевые слова: теплоемкость, метод определения теплоемкости, теплоемкость пищевых материалов, калориметр.

Keywords: heat, method for determination of heat capacity, heat capacity of food materials, the calorimeter.

Введение

В настоящее время перспективны исследования по разработке инновационных технологий переработки растительного сырья [1 и др.], для развития которых необходим значительный объем исследований, в том числе по определению свойств сырья/полуфабрикатов и продуктов. Исследованию теплофизических свойств растительных материалов посвящен ряд работ [2,3,4,5 и др.]. Известны [6 и др.] методы определения удельной теплоемкости дисперсных материалов, том числе пищевых продуктов. В практике теплофизических измерений используют, как правило, оценку удельной теплоемкости материала при постоянном давлении. Для определения теплоемкости материал должен быть подвержен тепловому воздействию, в результате которого он поглотит определенное количество теплоты. Принимая во внимание, что метод адиабатического калориметра, позволяющий получить наибольшую точность результата, неприемлем для пищевых продуктов, предложен оригинальный метод определения теплоемкости пастообразных пищевых материалов.

Объекты и методы исследований

В основу метода положено определение за счет высокочувствительной измерительной схемы постоянной калориметра – К, учитывающей с высокой точностью потери вводимой тепловой энергии при изменении температуры исследуемого образца (порядка 2 К).

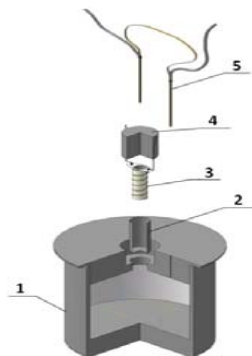


Рисунок 1 - Тепловая часть калориметра

1 – корпус, 2 – стакан для образца, 3 – нагреватель, 4 – крышка, 5 – дифференциальная термопара медь-константан

Реализация метода осуществляется на разработанной экспериментальной установке – калориметре. Экспериментальная установка включает тепловую и измерительную части. Тепловая часть (рисунок 1) представляет собой теплоизолированный сосуд термостат – термос в состав которого входит корпус, стакан для образца, нагреватель, крышка и дифференциальная термопара медь-константан. Измерительная часть (рисунок 2) состоит из двух частей: 1 – схемы питания и измерения напряжения и тока в на-

гревателе и 2 – схемы измерения и регистрации термоэдс измерительной дифференциальной термопары.

Согласно схеме установки (рисунок 2) образец 1 и нагреватель 2 помещены в стакан 3 из пищевой нержавеющей стали. В объеме образца помещен «горячий» спай 4 дифференциальной термопары, а «холодный» спай 5 находится в свободном пространстве термостата, заполненного ватой для ослабления конвекции воздуха. Термостат – термос 6 с названными элементами схемы представляют тепловую часть установки. Разъём 7 соединяет тепловую и измерительную части. Стабилизированный источник питания 8 через выключатель 9 подключен по 4-х проводной схеме к амперметру 10 и вольтметру 11. Термоэдс термопары подается на вход фотокомпенсационного усилителя 12 типа Ф116/2, где происходит её предварительное усиление. Магазин 13 сопротивлений служит для согласования выхода Ф116/2 с входом самописца 14 типа КСП-4. Устройство 15 для смещения «нуля», то есть пишущего узла – стрелки самописца, включено в схему последовательно.

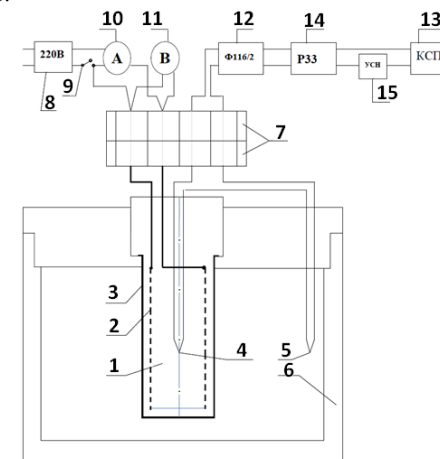


Рисунок 2 – Схема установки для определения удельной теплоёмкости
1 – образец, 2 – нагреватель, 3 – стакан, 4 – спай дифференциальной термопары, 5 – спай дифференциальной термопары, 6 – термостат – термос, 7 – разъём, 8 – стабилизированный источник питания, 9 – выключатель, 10 – амперметр, 11 – вольтметр, 12 – фотокомпенсационный усилитель типа Ф116/2, 13 – магазин сопротивлений, 14 – самописец типа КСП-4, 15 – устройство смещения «нуля»

Удельная теплоёмкость c , Дж/(кг·К) определяется по формуле:

$$c = \frac{Q_{\text{пол}}}{m \cdot \Delta t} = \frac{Q - K}{m \cdot \Delta t} = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t - K}{m \cdot \Delta t},$$

где; $Q_{\text{пол}}$ – полезное количество введённой в исследуемый образец тепловой энергии, Дж; m – масса образца, кг; Δt – изменение температуры образца, К; Q – количество введённой в исследуемый образец тепловой энергии, Дж; U – напряжение на нагревателе образца, В; I – сила тока через нагреватель, А; Δt – отрезок времени, в течение которого пропускается ток через нагреватель, с; K – постоянная калориметра, Дж.

Результаты исследований

Разработанный метод апробирован для ряда плодовоовощных пастообразных продуктов и проведен комплекс экспериментальных исследований по определению удельной теплоемкости (таблица 1).

Таблица 1 – Удельная теплоемкость плодовоовощных пастообразных продуктов

Продукт	Влажность образца, %	с, Дж/кг К
Пюре из отварной моркови	87,5	3457
Пюре из отварной капусты	88,7	3230
Пюре из кабачка	93,6	3662
Пюре из лука репчатого	86,2	3170

Полученные значения сопоставимы с литературными данными [7]. Относительная ошибка при определении удельной теплоемкости не превышала 4,93%. Метод позволяет в течение нескольких минут получить результат высокой точности.

Выводы

Дальнейшее развитие получают исследования по определению теплоемкости пищевых материалов с использованием разработанной методики и экспериментальной установки с целью применения полученных результатов в инженерной практике при расчете и проектировании процессов и аппаратов. Кроме того, результаты исследований теплоемкости могут быть использованы для научного анализа кинетики и динамики тепло- и массообменных процессов, их моделирования и оптимизации.

Список литературы

1. Алексанян, И.Ю. Инновационные технологии переработки сырья растительного происхождения [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Л.М. Титова // Инновационные технологии АПК России – 2014: материалы II конференции в рамках Международного научно-технологического форума «Биоиндустрия – основа зеленой экономики, качества жизни и активного долголетия». – М., 2014. – 84 с. С. 12–18.
2. Алексанян, И.Ю. Анализ основных термодинамических закономерностей взаимодействия с водой и теплофизических характеристик растительных экстрактов и продуктов микробиологического синтеза [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Р.А. Хайбулов // Материалы Международной конференции «Современные проблемы производства продуктов питания». Барнаул: АлтГТУ, 2004. С. 22–27.
3. Синяк, С.В. Физико-химические и теплофизические свойства кормовых продуктов [Текст] / С.В. Синяк, Ю.А. Максименко // Вестник АГТУ. 2005. № 2(25). С. 272 – 277.
4. Хайбулов, Р.А. Теплофизические характеристики пектина [Текст] / Р.А. Хайбулов, О.А. Петровичев, Ю.А. Максименко, Е.Д. Кромский // Вестник АГТУ. 2006. № 6. С. 150–153.
5. Краснов, В.А. Зонд для определения коэффициента теплопроводности сыпучих материалов [Текст] / В.А. Краснов, Н.А. Подледнева, Ю.А. Максименко // Вестник АГТУ. Научный журнал. 2012. № 1(53). Астрахань: АГТУ, 2012. С. 34 – 36.
6. Чудновский, А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов [Текст] / Чудновский А.Ф. – М.: Физматгиз, 1992. – 455 с.
7. Гинзбург, А.С. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов [Текст] / А.С. Гинзбург, М.А. Громов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 272 с.

УДК 677.054.825.3

МНОГОВИГАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОТОЧНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ MULTIMOTOR ELECTRIC DRIVE PRODUCTION LINES FOR WET THERMAL TREATMENT OF TEXTILE MATERIALS

А.А. Щёголев
A.A. Shchegolev

Московский государственный университет технологий и управления
имени К.Г. Рazuмoвского, Россия, Москва,
(Ash1950@yandex.ru)

Moscow State University of Technology and Management

Аннотация: Поточные линии текстильной промышленности, предназначенные для обработки ткани расправленным полотном, оснащаются многодвигательными электроприводами постоянного тока. Для согласования скоростей машин линии между ними установлены компенсаторы, связанные с регуляторами скорости систем управления электроприводами ведомых машин линии. Систему управления электроприводом поточной линии можно упростить, если взять за основу схему с последовательным соединением якорных обмоток двух электродвигателей постоянного тока.

Abstract: the Production line of textile industry, designed for processing tissue with the expanded canvas, equipped with the multi-Elektropribor-DAMI DC. For matching the speeds of cars line between them the compensators associated with the speed controller of the drive control system of the slave machines. The electric drive control system of the production line can be simplified to shift the if to base circuit with a series connection of armature windings of the two DC motors.

Ключевые слова: привод поточных линий, двухдвигательный привод, дифференциальный электропривод, регулирование натяжения текстильного материала, согласование скоростей двигателей поточной линии.

Keywords: actuator production lines, twin-engine drive, the differential actuator, and control tension of textile material, matching the speeds of the engines of the production line.

Ячейка двухдвигательного электропривода показана на рис. 1 [1]. Двигатели M1 и M2 приводят машины PM1 и PM2 поточной линии. Якорные цепи двигателей M1 и M2 соединены последовательно и питаются от тиристорного преобразователя ТП1 с напряжением U. Благодаря последовательному соединению якорных цепей двигателей, напряжение U распределяется между двигателями M1 и M2 пропорционально скоростям их вращения ω_1 и ω_2 . Скорость V1 обработки текстильного материала внутри двухдвигательной ячейки и натяжения материала F1, F3 в зоне между соседними ячейками определяются средней скоростью ω_{CP} двигателей ячейки, определяемой напряжением U источника питания обоих двигателей.

Поскольку скорости двигателей ω_1 и ω_2 взаимосвязаны, то для согласования скоростей двигателей M1 и M2 достаточно стабилизировать скорость только одного - наиболее нагруженного двигателя M2 к которому подключён источник ТП2 подпитки ПП. Особенность согласования скоростей заключается в том, что при постоянном значении ω_{CP} соотношение скоростей ω_1 и ω_2 может изменяться, например, при изменении моментов сопротивления на валах двигателей M1 и M2 или при изменении параметров обрабатываемого материала.

1. Щёголев А.А. Чувствительность дифференциального электропривода постоянного тока к изменению натяжения обрабатываемого материала. Современные проблемы развития текстильной и лёгкой пром: Сб. материалов Межд. науч.-техн. конф. В 5 кн. /ФГБОУ ВПО МГТУ им. К.Г. Разумовского. Институт текстильной и лёгкой промышленности. М., 2012. Книга 3, с. 153.

УДК 62-932.2

**ВЫБОР МЕСТА КРЕПЛЕНИЯ ДАТЧИКА ВИБРОДИАГНОСТИКИ
КОМПРЕССОРА КИСЛОРОДАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ
SELECTING THE FIXING POINT FOR VIBRODIAGNOSTICS SENSOR OF
OXYGEN-NITROGEN-MINING STATION COMPRESSOR BASED ON THE WAVE
PROPAGATION MODEL**

Виктор И. Рязских*, Анатолий А. Хвостов,
Алексей В. Иванов***, Николай А. Дегтярев*****

**Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж
(e-mail: ryazhskihav@bk.ru)*

Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh

***Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Россия, Воронеж
(e-mail: khvtol1974@yandex.ru)*

Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh

****Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,
Россия, Воронеж*

(e-mail: kolyator1662@yandex.ru)

*Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin,
Russia, Voronezh*

Аннотация: В представленной статье рассмотрен подход к построению математической модели процесса распространения акустических колебаний в оборудовании, представляющим собой систему связанных тел. Предлагаемая структура математической модели распространения акустических колебаний реализована в виде графа, ребрами которого являются информационные связи между элементами системы связанных тел, формализованные неоднородными волновыми уравнениями с учетом диссипативных потерь. Полученная математическая модель при введении источников внешнего возмущения в любом узле графа позволяет описать изменение вибросигнала в точке контроля, оценить его свойства и обоснованно выбрать место крепления датчика вибросигнала.

Abstract: In the article the approach to the construction of a mathematical model of the process of propagation of acoustic vibrations in the equipment is a system of connected bodies is considered. The proposed structure of the mathematical model of acoustic oscillation is realized in the form of a graph whose edges are links between elements of information systems related bodies formalized inhomogeneous wave equation with the dissipative losses. The resulting mathematical model with the sources of external disturbances in any node of the graph allows to describe the change in the vibration signal at the control point, to evaluate its properties and reasonably choose the mounting location of the wave sensor.

Ключевые слова: математическое моделирование, вибродиагностика, волновое уравнение, анализ колебаний, разделение воздуха.

Keywords: mathematical modeling, wave equation, oscillation analysis, air separation.

В ходе процесса разработки систем вибродиагностики оборудования возникает задача разработки математической модели распространения колебаний в системе связанных тел, имитирующих диагностируемое оборудование и акустический тракт от источника колебаний до датчика, которая позволяет обоснованно выбирать место снятия вибросигнала, гарантированно сохраняя при этом информативность вибропризнаков. Поскольку составление такой математической модели для количественного соответствия

объекту моделирования крайне затруднительно ввиду сложности структуры зависимостей, сложной реологии среды, влияние ряда дополнительных внешних факторов, температуры внешних акустических возмущений, нестационарности и пространственной распределённости параметров объекта, основной задачей моделирования зачастую является получение качественного соответствия модели объекту.

Поскольку современное оборудование для вибродиагностики используют датчики, оценивающие виброперемещение, виброскорость или виброускорение в одном направлении, то в общем случае за основу берется одномерное неоднородное уравнение волны, с учетом диссипативных потерь в среде [1]

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \beta \frac{\partial y}{\partial t} - F(x, t),$$

$$y(x, 0) = \varphi(x), \frac{\partial y(x, 0)}{\partial t} = \phi(x), y(0, t) = y_{\text{вх}}(t), y(L, t) = y^*(t),$$

Где x – координата, v – скорость, β – коэффициент затухания, характеризующий диссипативные потери в среде, $F(x, t)$ – эквивалент внешней возмущающей силы.

В общем случае весь тракт представлен системой связанных тел, через которые проходит вибросигнал. Каждый элемент подсистемы соединен с соседним элементом. Причем обеспечивается возможность как последовательного, так и параллельного соединения. Для удобства дальнейшего анализа и простоты преобразований вся система разбивается на подсистемы по принципу слоев (индекс j), которые отражают пространственное расположение элементов, а также секций отражающих источник возмущающих колебаний вследствие диагностируемой неисправности (индекс k).

Для j -го элемента системы

$$\frac{\partial^2 y_j}{\partial x^2} = \frac{1}{v_j^2} \frac{\partial^2 y_j}{\partial t^2} + \beta_j \frac{\partial y_j}{\partial t} - F_j(x, t), j = 1..J$$

$$F_j(x, t) = \sum_k F_{k,j-1}$$

Где $\sum_k F_{k,j-1}$ – сумма всех внешних сил до слоя j ; $y_j(x, 0) = \varphi_j(x)$, $\frac{\partial y_j(x, 0)}{\partial t} = \psi_j(x)$; $y_j(0, t) = \varphi_j^{(0)}(t)$, $y_j(L, t) = \varphi_j^{(L)}(t)$. Для первого элемента $y_1(0, t) = y_{\text{вх}}(t)$, а для последнего $y_J(L, t)$ не задается. Возможно соединение, когда несколько выходов предыдущего слоя оказываются на входе последующего $y_j(0, t) = \sum_k y_{j-1}^{(L)}(t)$.

Таким образом, система уравнений, соответствующая совокупности связанных элементов представлена как (3), причем расстояние задается количеством участков разбиения по i ($i = 1..N_j, i \in \mathbb{N}$) и размером шага по координате x_i . Свойства среды для j -го элемента задаются скоростью распространения v_j и коэффициентом затухания β_j [2]:

$$\begin{aligned}
& \frac{y_1^{(0)} - 2y_1^{(i)} + y_1^{(i+1)}}{\Delta x^2} = \frac{1}{v_1^2} \frac{d^2 y_1^{(i)}}{dt^2} + \beta_1 \frac{dy_1^{(i)}}{dt} - \sum_{k_1=0}^{K_1} F_{k_1,1}(t), i = 0..N, k_1 = 1..K_1; \\
& y_1^{(i)}(0) = \varphi_1^{(i)}; \frac{dy_1^{(i)}(0)}{dt} = \psi_1^{(i)}; y_1^{(0)}(t) = \varphi_1^{(0)}(t), i = 0..N; \\
& \dots \\
& \frac{y_j^{(i-N_{j-1})} - 2y_j^{(i+N_{j-1})} + y_j^{(i+1+N_{j-1})}}{\Delta x^2} = \frac{1}{v_j^2} \frac{d^2 y_j^{(i+N_{j-1})}}{dt^2} + \beta_j \frac{dy_j^{(i+N_{j-1})}}{dt} - \sum_{k_j=0}^{K_j} F_{k_j,j}(t), \\
& y_j^{(i+N_{j-1})}(0) = \varphi_j^{(i+N_{j-1})}; \frac{dy_j^{(i+N_{j-1})}(0)}{dt} = \psi_j^{(i+N_{j-1})}; y_j^{(0+N_{j-1})}(t) = \varphi_j^{(0+N_{j-1})}(t) = \\
& = \sum_{m_j=0}^{M_j} k_{осл\ m_j, j-1}^{(j \circ j-1)} y_{m_j, j-1}^{(L_{j-1})}(t), m_j = 1..M_j, i = N_{j-1}..N_j, j = 1..J; \\
& \dots \\
& \frac{y_j^{(i-N_{j-1})} - 2y_j^{(i+N_{j-1})} + y_j^{(i+1+N_{j-1})}}{\Delta x^2} = \frac{1}{v_j^2} \frac{d^2 y_j^{(i+N_{j-1})}}{dt^2} + \beta_j \frac{dy_j^{(i+N_{j-1})}}{dt} - \sum_{k_j=0}^{K_j} F_{k_j,j}(t), \\
& y_j^{(i+N_{j-1})}(0) = \varphi_j^{(i+N_{j-1})}; \frac{dy_j^{(i+N_{j-1})}(0)}{dt} = \psi_j^{(i+N_{j-1})}; y_j^{(0+N_{j-1})}(t) = \varphi_j^{(0+N_{j-1})}(t) = \\
& = \sum_{m_j=0}^{M_j} k_{осл\ m_j, j-1}^{(j \circ j-1)} y_{m_j, j-1}^{(L_{j-1})}(t), m_j = 1..M_j, i = N_{j-1}..N_j;
\end{aligned} \quad (3)$$

где i – индекс пространственной координаты, всего N_j ; j – индекс элемента акустического тракта, всего J элементов; Δx – шаг интегрирования; $k_j = 1..K_j, k_j \in \mathbb{N}$ – индекс источника внешней силы, K_j – количество источников прилагаемой к j -му элементу внешней силы $F_{k_j}^{(i)}(t)$; $k_{осл\ m_j, j-1}^{(j \circ j-1)}$ – коэффициент ослабления сигнала при передаче с j -1 на j элемент; v_j, β_j – скорость звука и коэффициент поглощения j -го элемента.

Проведенные вычислительные эксперименты показали соответствие предлагаемой математической модели объекту (акустическому тракту прохождения сигнала через систему связанных тел). Разработанная модель позволяет качественно верно описать механизм распространения упругих волн в исследуемой среде, обоснованно выбирать место приема вибросигнала, а также использовать её в качестве имитационной модели при отладке алгоритмов обработки информации в задачах вибродиагностики.

Список литературы

1. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики/ А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: МГУ: Наука, 2004. – 798 С.
2. Михайлов, И.Г. Основы молекулярной акустики/ И.Г. Михайлов, Соловьёв В.А., Сырников Ю.П. – М.: Наука, 1964. – 516 с.

УДК 535.233

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ ПОРИСТОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ НАГРЕВЕ ЕЁ ИЗЛУЧЕНИЕМ DETERMINATION OF THERMAL PROPERTIES OF THE SEMITRANSSPARENT HEATED BY RADIATION POROUS PLATE

В.С. Глазов*, М.В. Горелов**, М.Ю. Юркина***
V.S. Glazov*, M.V. Gorelov**, M.Y. Yurkina***

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва
(e-mail: taturik@bk.ru)

**Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва
(e-mail: gorelov_mikhail@mail.ru)

***Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва
(e-mail: yurkinamy@mpei.ru)
National Research University "MPEI"

Аннотация: Представлена нестационарная модель температурного поля полупрозрачного пористого материала, отражающая начальный этап его нагрева при доминирующем подводе энергии излучением, а также взаимосвязь оптических и терморadiационных характеристик подобных материалов.

Abstract: It has presented the nonstationary temperature field model of the semitransparent porous material, illustrating the initial phase of heating at a dominant thermal radiation energy supply, and the relationship of optical and thermoradiation characteristics of such materials.

Ключевые слова: теплофизические свойства, температурное поле, тепловое излучение

Keywords: thermal properties, temperature field, thermal radiation

Введение. Для придания материалу из древесины таких свойств как водостойкость и устойчивость к биологическим воздействиям его подвергают конвективной или радиационной инфракрасной (ИК) обработке. В последнем случае качество получаемого продукта зависит от режимных параметров процесса, выбор которых определяется знанием теплофизических свойств материалов, участвующих в данном процессе. Ясно, что знание указанных свойств позволяет не только рационально подойти к интенсификации и оптимизации теплотехнологического процесса, например, при ИК обработке пищевых продуктов или текстильных материалов, но также усовершенствовать методы и средства контроля за терморadiационным состоянием тел и их поверхностей.

Одним из известных преимуществ ИК нагрева пористых полупрозрачных тел по сравнению с конвективным нагревом являются более равномерное распределение температур по их толщине, т.е. относительно не большие внутренние градиенты температур. Однако, в связи с не полной информацией об оптических и терморadiационных свойствах рассматриваемых материалов, инженеры-исследователи расчет температурных полей проводят путем сведения одного механизма переноса к другому (например к теплопроводности), который является доминирующим и/или не вызывает проблем в вычислительном плане. Точность расчета в этом случае зависит от эквивалентных теплофизических свойств виртуального (модельного) материала, которые, как правило, привязаны к конкретной структуре реального материала и узкому интервалу температур. Поэтому для повышения точности расчета температурных полей необходимо, там, где это возможно, учитывать отдельно особенности механизмов переноса теплоты в пространстве и во времени.

Задачи работы. Учитывая, что при ИК обработке плоских полупрозрачных пористых материалов имеет место объемный механизм поглощения излучения, исходящего

от внешнего источника, и этот механизм может доминировать на начальном этапе нагрева, имеет смысл

Исследовать влияние толщины пористого полупрозрачного материала на его отражательную способность.

Найти решение, описывающее формирование температурного поля в толще исследуемого материала.

Установить характер связи между теплофизическими свойствами полупрозрачного пористого материала и температурным полем, формирующимся под воздействием внешнего источника излучения.

Решение 1. Теоретический анализ изменения коэффициента отражения тела от его толщины показал, что при её удвоении выполняется равенство.

Обработка экспериментальных данных позволила установить, что для некоторых материалов величина $\tau^2(2\delta)/\tau(\delta)$ изменяется незначительно (см. табл. 1)

Таблица 1 – Изменение параметра $\tau^2(2\delta)/\tau(\delta)$ при удвоении количества слоев плоского материала

Материал				
Древесина бука, W=7.1 %, $\lambda=1.1$ мкм	0,891	0,907	0,9	-
Бумага, 75 г/м ² , W=5.2 %, $\lambda=1.1$ мкм	0,945	0,961	0,96	0,962
Ткань арт.1102, W=6.1 %, $\lambda=0.68$ мкм	0,848	0,833	0,842	0,832

Поэтому, из примерного равенства $A \cong \text{const}$ и учета краевых условий следует рекуррентная формула $\tau(2^{n-1}\delta) = R[\tau(\delta)/R]^m$, где $m = 2^{1-n}$. Её дискретность устраняется путем формальной замены m на δ/x . Проверка полученного выражения проведена путем аппроксимации данных [1, 2] зависимостью $\tau(x) = R \cdot \exp(-B/x)$ и оценкой величины возникающей при этом погрешности. По бумаге, древесины и шелковой ткани она составила 2÷5%. В качестве примера на рисунке представлена графическая иллюстрация зависимости коэффициента отражения от толщины пакета из тканей арт. 1102.

Из выражения, приведенного на рис. 1, видно, что характер зависимости коэффициента отражения от толщины плоского, полупрозрачного пористого материала имеет Аррениусовский тип.

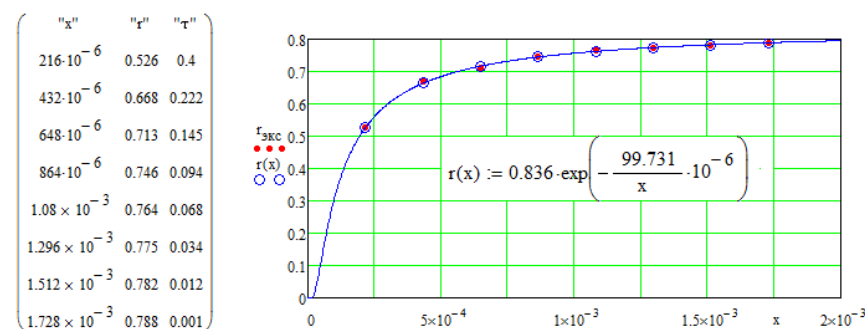


Рисунок 1 – Данные эксперимента [2] и их аппроксимация

Решение 2. Уравнение, описывающее температурное поле полупрозрачной пористой пластины при доминирующем влиянии излучения над теплопроводностью с учетом зависимости отражательной способности материала от его толщины, имеет вид

$$\frac{dT(x, \tau)}{d\tau} = \frac{q \cdot R \cdot b \cdot \exp(-b/x - kx)}{c \cdot x^2} + \frac{q \cdot [1 - R \cdot \exp(-b/x)] \cdot k \cdot \exp(-kx)}{c} \quad (1)$$

При известной начальной температуре θ рассматриваемой пластины уравнения (1) имеет следующее решение:

$$T(x, \tau) = \theta + \frac{q}{c} \cdot \tau \cdot [R \cdot (-k + b/x^2) \cdot \exp(-b/x) + k] \cdot \exp(-kx) \quad (2)$$

Из решения (2) следует линейный характер изменения температуры во времени в каждой точке полупрозрачной пластины при выполнении условия (3)

$$a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \ll -(1/c) \frac{\partial}{\partial x} \{q [1 - R \exp(-b/x)] \exp(-kx)\} \quad (3)$$

Решение 3. В инженерной практике эффективную удельную теплоемкость пористой среды обычно находят по приближенной формуле [3]

$$c_{ef}(T) = (1 - f)c_s(T) + fc_g(T)$$

Что касается других теплофизических свойств полупрозрачных пористых материалов, то при слабой зависимости отражательной способности от толщины материала коэффициент поглощения (k), а также коэффициент температуропроводности (a) могут быть определены по формулам, представленным в работе [3]. Если же влиянием толщины полупрозрачного пористого тела на отражательную способность пренебречь нельзя, искомое значение коэффициента поглощения можно определить итерационно из выражения (4) в соответствии с рис.2.

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{b/x_2^2 - k + k/R}{b/x_1^2 - k + k/R} \cdot \exp[-k(x_2 - x_1)] \quad (4)$$

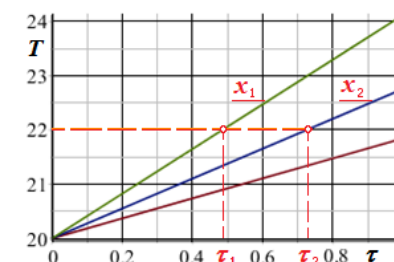


Рисунок 2 – Изменение температуры в разных сечениях модельной пластины

Заключение. В процессе теоретических и экспериментальных исследований установлен характер зависимости отражательной способности полупрозрачного пористого тела от его толщины.

Определены условия, при которых изменение температурного поля полупрозрачной пористой пластины носит линейный характер и соответствует начальному этапу её нагрева, т.е. когда перенос теплоты излучением, исходящим от внешнего источника, доминирует над теплопроводностью и собственным излучением рассматриваемой пластины.

Предложен способ, позволяющий по температурному полю полупрозрачного пористого материала рассчитать коэффициент его поглощения при доминирующе подводе энергии излучения, исходящего от внешнего источника.

Список литературы

1. Ильясов С.Г., Красников В.В. Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов. -М.: Пищевая промышленность, 1978. - 360 с.

2. Полищук Н.С. Разработка методик измерения и определения оптических характеристик тканей в видимой и инфракрасной областях спектра: Дис. ... канд. техн. наук. – Хмельницк., 1984.-241 с.

3. Определение теплофизических свойств пористых полупрозрачных тел / Глазов В.С., Абдулкеримов С.А., Пурдин М.С., Алиев К.Б. // Сборник материалов IX Международной теплофизической школы «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий». – ООО «Ходжи Хасан». Таджикистан-2014. С. 88-96.

УДК 697.112

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗЦОВ НАРУЖНЫХ СТЕНОВЫХ ОГРАЖДЕНИЙ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ
AUTOMATION THERMOPHYSICAL MEASUREMENTS OF SAMPLES OF THE EXTERIOR WALL FENCING IN NATURAL CONDITIONS**

Павел Николаевич Муреев*, Андрей Владимирович Иванов
Mureev Pavel Nicolaevich*, Ivanov Andrew Vladimirovich****

*Поволжский государственный технологический университет, Российская Федерация, г. Йошкар-Ола, (e-mail: pavel.mureev@yandex.ru)

**Поволжский государственный технологический университет, Российская Федерация, г. Йошкар-Ола, (e-mail: IvanovAVL@volgatech.net)

Volga State University of Technology, Russian Federation, Yoshkar-Ola

Аннотация: В статье обсуждается область гражданского строительства и объектом рассмотрения является теплопроводность наружных стен. Ключевая идея заключается в представлении лабораторного комплекса. Это устройство может производить непрерывный контроль температуры наружной стены в течение длительного времени. Материал, представленный в статье, может открыть новые перспективы для дальнейших исследований. Этот материал будет интересен тем, кто работает в области архитектуры и проектирования зданий и сооружений.

Abstract: The paper under discussion covers the area of civil engineering and deals with the object of thermal conductivity of exterior walls. The key idea is to present the laboratory complex. This device can produce continuous monitoring temperature of the exterior wall for a long time. The material presented can open new prospects for further research. It seems to be interesting to those who work in the field of structural engineering and architecture.

Ключевые слова: гражданское строительство; наружные стены; проектирование зданий.

Keywords: civil engineering; exterior walls; structural engineering.

На сегодняшний день при возведении стеновых ограждающих конструкций используют различные материалы. Их спектр на строительном рынке очень велик. Это материалы к которым мы уже привыкли – дерево, кирпич, и новые – пенобетон, газобетон, различные многослойные конструкции, композитные материалы. Производители предоставляют различные сертификаты о хороших теплозащитных свойствах материалов, но на практике это не всегда так.

В связи с повышением требований в области энергоэффективности ограждающих конструкций, возникает много вопросов при проектировании новых объектов и реконструкции уже существующих. Многие постройки не соответствуют современным требованиям по теплозащите. Поэтому необходимо проводить реконструкцию зданий, но без полного анализа существующей ситуации происходящей в стенах очень трудно сделать правильные выводы и провести грамотно и эффективно работу.

Цель работы: исследовать теплозащитные свойства образцов стеновых ограждений при помощи автоматизированного лабораторного комплекса в натурных условиях.

Решаемые задачи: 1) получение наиболее полной и достоверной информации по теплозащитным качествам наружных ограждений, проводя как можно более длительных натурные экспериментальные исследования; 2) разработка методики расчета и рекомендаций по определению распределения температуры в толще ограждения учитывая реальные происходящие процессы, то есть полную картину происходящих процессов внутри ограждения в течении всего осенне-зимнего периода, который для большей части территории России составляет более 6 месяцев; 3) лабораторный комплекс, созданный на базе строительного факультета ПГТУ, позволяет решить проблему, связанную с долговременностью проведения мониторинга изменения температур в толще ограждения.

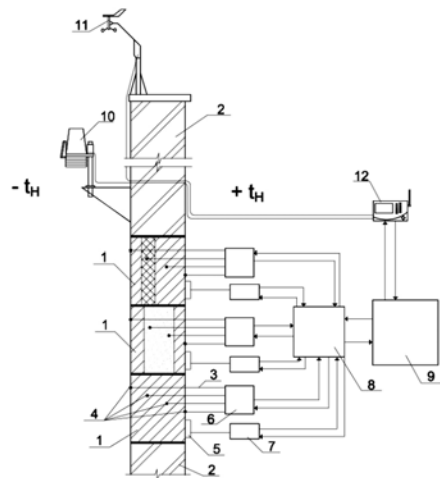
В лаборатории строительной физики установлен стенд с пятью образцами материалов стеновых ограждающих конструкции, которые исследуются с помощью разработанного автоматизированного лабораторного комплекса. В каждый из пяти материалов: деревянный брус, многослойная конструкция производство фирмы «Стезя», многослойная конструкция, газобетон фирмы «Bikton», кирпичная стена толщиной 640 мм., установлены термодатчики по всей толщине материала. С их помощью определяются данные изменения температуры в стене.

При разработке лабораторной установки основной целью ставилось проведение температурного мониторинга исследуемой конструкции наружного ограждения по всей его толщине. Необходимость обеспечения непрерывности эксперимента в течение длительного периода времени потребовала от создателей установки решения ряда технических задач, которые были решены при создании лабораторной установки.

Первые же результаты эксперимента, полученные на лабораторной установке, подтвердили ее работоспособность. Непрерывно поступающая информация с приборов обрабатывается в виде таблиц и графиков. Лабораторная установка в процесс создания прошла несколько модификаций, которые были защищены патентами [1-4].

Первые модификации не учитывали в полном объеме факторы, такие как внешние погодные условия. Это влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра, ультрафиолетовое излучение, что не позволяет корректно производить расчеты по теплофизическим характеристикам исследуемых образцов ограждений – при обработке экспериментальных данных. Например, при проверке на возможность конденсации влаги в толще исследуемого ограждения необходимо знать не только температуру наружного воздуха t_H , но и влажность наружного воздуха ϕ_H , знать влажность внутреннего воздуха в помещении ϕ_B . При расчете теплоустойчивости наружного ограждения в летний период необходимо знать значения солнечной радиации, поступающей на наружную поверхность, максимальные и средние значения I_{max} , I_{cp} .

Данная техническая задача решается тем, что с наружной стороны исследуемого образца устанавливается метеостанция DAVIS instruments Vantage Pro2 (рис. 1). Она включает в себя: датчики внутренней и наружной температуры, датчики относительной влажности воздуха внутри и снаружи, датчики атмосферного давления, датчик осадков, анемометр, датчик солнечной радиации, датчик ультрафиолетового излучения, образцы исследуемых ограждений выполнены размером 1х1 метр и установлены в специальных ячейках, оборудованных в ограждающих конструкциях и допускающих возможность замены, в каждом образце размещены термодатчики, расположенные по всей толщине и термометр, закрепленный на внутренней поверхности, концы проводов от термометра и термодатчиков подсоединены к устройству контроля температуры и через адаптер с помощью разработанной программы соединены с ПК с выходом в Интернет. Лабораторная установка поясняется чертежом (рис.6).



Данная методика проста в применении и не требует сложных вычислительных операций, что делает её удобной для массового использования при реконструкции зданий с однослойными кирпичными стенами.

Список литературы

1. Макаров Р.А., Муреев П.Н., Макаров А.Н. Определение поправки к термическому сопротивлению при квазистационарном режиме теплопередачи в наружных стенах, выполненных из кирпича // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1;
2. Макаров Р.А., Муреев П.Н., Макаров А.Н. Определение фактического сопротивления теплопередаче наружных стен, выполненных из кирпича, зданий постройки 60–80-х годов XX века // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–18. – С. 3960–3965;
3. Патент РФ № 2010142067/28, 14.10.2010. Зуев В. И., Коршунов О.В., Сенновский Д.В., Троицкий-Марков Р.Т. Способ определения термического сопротивления участка элемента конструкции при нестационарном режиме теплопередачи // Патент России № 2457471. Бюл. № 21.

УДК 664.72

СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕРМОВЛАЖНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ ЕГО СУШКЕ И ХРАНЕНИИ STABILIZATION HYDROTHERMAL VEGETATION CHARACTERISTICS RAW MATERIAL WHEN DRYING AND STORAGE

А.В. Дранников*, С.А. Шевцов**, А.А. Дерканосова*
A.V. Drannikov*, S.A. Shevtsov**, O.A. Derkanosova*

* Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Россия, Воронеж
(email: drannikov@list.ru)

Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh
** Воронежский институт государственной противопожарной службы МЧС России,
Россия, Воронеж (email: shevtsov_sa@vigs.ru)
The Voronezh Institute of State Firefighting Service of Ministry Of Russian Federation for
Civil
Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters,
Russia, Voronezh

Аннотация: Представлен способ сушки и хранения зерновых культур, в котором использовано двухэтапное смешивание антиоксиданта с подсушенным материалом. Способ обеспечивает стабилизацию качества растительного сырья с повышенным содержанием жирных кислот.

Abstract: The way of drying and storage of crops in which a two-step mixing the dried material with an antioxidant. The method provides for stabilization of the quality of plant materials with a high content of fatty acids.

Ключевые слова: стабилизация, сушка, хранение, антиоксидант, качество сырья.

Keywords: stabilization, drying, storage, antioxidant, quality of raw materials.

Конкуренция на рынке кормов постоянно требует поиска новых путей повышения качества комбикормов, увеличения производства кормового белка на базе собственных ресурсов и снижения производственных затрат. Большая роль в повышении содержания белка в комбикормах отводится семенам масличных культур. Они представляют собой ценную кормовую добавку с высоким содержанием растительных масел, как источника энергии.

В связи с опережающими темпами теплопереноса в сравнении со скоростью влагоудаления традиционная сушка горячим воздухом не может обеспечить полную сохранность качества масличных культур. Представляется, что за счет совместного применения теплового воздействия в осциллирующем режиме и обработки семян антиоксидантом можно стабилизировать качество готового продукта.

Исходя из этого, был разработан способ стабилизации термовлажностных характеристик растительного сырья с повышенным содержанием жирных кислот при его сушке и хранении (рис. 1) [1].

Влажное растительное сырье подают сначала в теплообменник 6 для предварительного нагрева, а затем в зону нагрева 2 шахтной сушилки 1, где продувается нагретым воздухом. Далее растительное сырье направляют в шнековые смесители 4 для смешивания с антиоксидантом. Ввод антиоксиданта непосредственно после каждой зоны нагрева позволяет предотвратить процессы окисления в сырье с повышенным содержанием жирных кислот и достичь равномерного его смешивания с исходным продуктом.

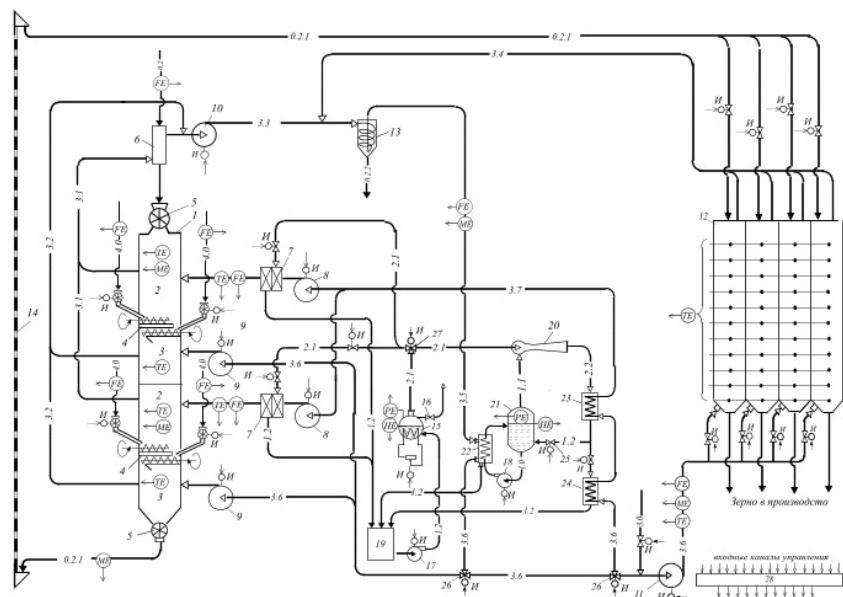


Рисунок 1. Схема управления процессами сушки и хранения семян масличных культур

После смешивания с антиоксидантом растительное сырье попадает в зону охлаждения 3 шахтной сушилки 1, где охлаждается кондиционированным воздухом. Последующее чередование нагревания, смешивания и охлаждения продукта позволяет обеспечить осциллирующие режимы сушки, при которых снижается скорость внутреннего теплопереноса по сравнению со скоростью влагопереноса. Причем режимы нагрева, смешивания и охлаждения, а также количество вносимого антиоксиданта и его вид зависят от исходного продукта.

Высушенный и смешанный с антиоксидантом продукт с помощью нории 14 подают на хранение в силосы 12. Очищенную паровоздушную смесь отработанного воздуха по линии 3.5 подают на кондиционирование в парожektorный тепловой насос, включающий парогенератор с ТЭНами 15 и предохранительным клапаном 16, эжектор 20, испаритель 21, холодоприемник 22, теплообменник-рекуператор 24, конденсатор 23, терморегулирующий вентиль 25, сборник конденсата 19, работающие по замкнутому термодинамическому циклу.

В холодоприемнике 22 паровоздушную смесь охлаждают до температуры точки росы и осуществляют ее осушение путем конденсации содержащейся в ней влаги на охлаждающей поверхности холодоприемника в виде капельной жидкости. Полученный кондиционированный воздух из холодоприемника 22 с помощью распределителя потока воздуха 26 разделяют на три потока: один из которых направляют вентиляторами 9 в зоны охлаждения 3 сушилки 1, второй вентилятором 11 на активное вентилирование в силосы 12, а третий последовательно в теплообменник-рекуператор 24, конденсатор парожektorного теплового насоса 23, калориферы 7 и далее вентиляторами 8 в зоны нагрева 2 сушилки 1.

По текущей информации о расходе растительного сырья с повышенным содержанием жирных кислот в линии 0.2 микропроцессор 28, в соответствии с заложенным в него алгоритмом, устанавливает массовый и тепловой расход воздуха на входе в зоны нагрева 2 шахтной сушилки 1 воздействием на мощность регулируемых приводов венти-

ляторов 8 и на расход рабочего пара в калориферах 7 посредством исполнительных механизмов. По текущим значениям влажности растительного сырья в зонах нагрева 2 микропроцессор 28 устанавливает расход антиоксиданта на этапах смешивания воздействием на исполнительные механизмы шнековых смесителей 4, а по текущей температуре растительного сырья в секциях охлаждения 3 микропроцессор 28 устанавливает расход кондиционированного воздуха на входе в эти секции воздействием на мощность регулируемых приводов вентиляторов 9.

Микропроцессор 28 непрерывно контролирует температуру в различных сечениях материала по высоте силосов 12. При отклонении текущей температуры в любой из точек измерения от заданного значения микропроцессор 28 устанавливает заданный расход смеси кондиционированного и свежего воздуха в линии 3.6 воздействием на мощность регулируемого привода вентилятора 11 с помощью соответствующего исполнительного механизма.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет обеспечить стабилизацию качества растительного сырья с повышенным содержанием жирных кислот, вследствие использования двухэтапного смешивания антиоксиданта с подсушенным материалом после нагрева, а так за счет применения парожektorной холодильной машины, у которой надежность при эксплуатации выше, чем у компрессионной теплонасосной установки.

Список литературы

1. Патент № 2534264 РФ, А 01 F 25/22. Способ управления процессами сушки и хранения растительного сырья с повышенным содержанием жирных кислот [Текст] / С. А. Шевцов, А. В. Дранников (Россия) – № 2013126917/13; заявлено 13.06.2013; опубликовано 27.11.2014; Бюл. № 33.

УДК 624.012.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАРУЖНЫХ СТЕН ЗДАНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ КИРПИЧА DETERMINATION OF THE HEAT-TRANSFER PROPERTIES OF EXTERNAL BRICK WALLS IN THE BUILDINGS

Роман А. Макаров *, Павел Н. Муреев **, Александр Н. Макаров ***
Roman A. Makarov, Pavel N. Mureev, Aleksandr N. Makarov

*Поволжский государственный технологический университет, Россия, Йошкар-Ола
(e-mail: morrich92@gmail.com)

**Поволжский государственный технологический университет, Россия, Йошкар-Ола
(e-mail: Pavel.mureev@yandex.ru)

***Поволжский государственный технологический университет, Россия, Йошкар-Ола
(e-mail: MakarovAN@volgatech.net)

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education
«Volga State University of Technology»

Аннотация: Перечислены основные недостатки существующих способов определения фактического сопротивления теплопередаче наружных стен. Введен параметр отклонения фактического распределения температур от теоретического в толще стенового ограждения. Показана схема лабораторной установки, расположенной в здании постройки 60-х-80-х годов XX века с наружными кирпичными стенами. Введена дополнительная поправка к определению фактического сопротивления теплопередаче, учитывающая нелинейное распределение температур в толще стенового ограждения.

Abstract: The main disadvantages of the methods of determining the actual thermal resistance of external walls are recited. The parameter of the deviation of the actual temperature distribution from the theoretical temperature distribution in the thickness of the wall fence is infused. A diagram of the laboratory setup, which belongs to the brick building of the 60s-80s of the 20th century, is represented. The additional amendment is introduced to determine the actual resistance of heat transfer, which includes the non-linear temperature distribution in the thickness of the wall fence.

Ключевые слова: сопротивление теплопередаче, нестационарный режим теплопередачи, стационарный режим теплопередачи, однослойная кирпичная стена, распределение температуры в толще стены.

Keywords: thermal resistance, non-stationary heat transfer, stationary heat transfer, single-layer brick wall, temperature distribution in the thickness of the wall

После изменений СНиП «Тепловая защита зданий» от 23.02.2003 требуемое сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций вновь строящихся и реконструируемых зданий возросло более чем в 3 раза. При реконструкции зданий, проекты которых были разработаны до 23.02.2003, возникла проблема определения фактического сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций. При длительной эксплуатации зданий (а это относится к большинству реконструируемых зданий) физические характеристики материала могут значительно меняться, что делает невозможным определение коэффициента теплопроводности материала по значениям из таблицы Приложения Т СНиП «Тепловая защита зданий» а, значит, и фактического сопротивления теплопередаче существующей конструкции.

Существуют методики определения фактического сопротивления теплопередаче, основанные на единичных измерениях плотности теплового потока, проходящего через наружную стену, и температур внутренней и наружной поверхностей за небольшой (7-14 дней) относительно продолжительности всего отопительного периода промежуток времени. Недостатком данных методик является большая погрешность измерений, вызванная изменением теплофизических характеристик материала наружной стены за отопительный период, а также нестационарностью режима теплопередачи.

Для исследования теплозащитных характеристик наружных стены была разработана лабораторная установка (рис. 1), которая представляет собой совокупность датчиков температуры и влажности, расположенных в толще стены через равные расстояния, температуры внутренней и наружной стены, температуры и влажности внутреннего и наружного воздуха. Информация с датчиков поступает через адаптер на ПК. Шаг измерений - 1 мин.

В результате работы лабораторной установки выявлено, что за отопительный период 2014-2015 годов влажность кирпичной кладки изменяется от 55% до 98%. Таким образом, теплозащитные свойства материала кирпичной кладки существенно изменяются в осенне-весенний период, поэтому измерения следует проводить на нескольких участках, расположенных по разным сторонам света в течение всего отопительного периода в натуральных условиях.

На основании данных выводов разработана методика определения фактического сопротивления теплопередаче [1-2]. Она основана на учёте нестационарности режима теплопередачи, т.е. его квазистационарности. Использование классической формулы для определения сопротивления теплопередаче (разность температур разделить на тепловой поток) недопустимо, т.к. она подходит только для стационарного режима теплопередачи. Вводится поправка ΔR , учитывающая степень нестационарности режима теплопередачи – квазистационарность.

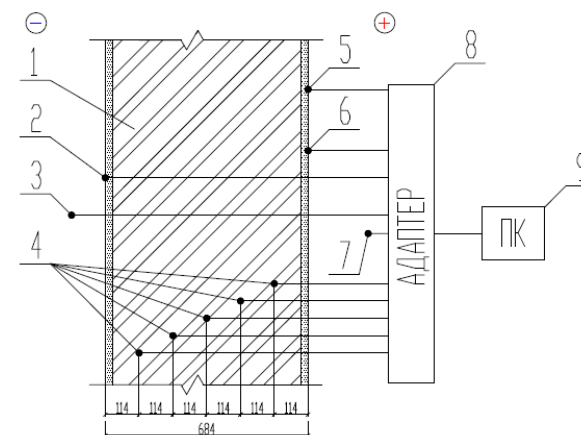


Рис. 1. Схема лабораторной установки для определения сопротивления теплопередаче
1 - Датчики температуры и влажности материала, 5 шт. Расположены в толще ограждающей конструкции через 114 мм; 2 - датчик температуры и влажности воздуха в помещении; 3 - датчик температуры и влажности наружного воздуха; 4 - датчик температуры внутренней поверхности; 5 - датчик температуры наружной поверхности; 6 - датчик теплового потока; 7 - адаптер; 8 - центр управления.

Основным критерием стационарного режима является равенство плотности тепловых потоков снаружи и внутри. Установить наличие стационарного режима, измеряя и сопоставляя их, было бы наиболее просто. Однако измерения плотности теплового потока, особенно наружного, имеют невысокую точность, и такое сопоставление не является надёжным критерием [3]. В качестве основного критерия стационарности режима теплопередачи выбрано линейное распределение температур в толще стены, т.е. если распределение температур линейное, то режим теплопередачи стационарный. Степень квазистационарности режима теплопередачи определяется величиной отклонения фактического распределения температур от линейного.

Описанная методика позволяет определить фактическое сопротивление теплопередаче при квазистационарном режиме теплопередачи. Основным достоинством данной методики является возможность выбора критериев обрабатываемых интервалов и учёт квазистационарности режима теплопередачи при выбранных критериях путём введения поправки ΔR , вызванной квазистационарностью режима теплопередачи. Это позволяет варьировать точность получаемых результатов путём изменения критериев отбора интервалов с целью получения минимального значения величины поправки ΔR . Данная методика проста в применении и не требует сложных вычислительных операций, что делает её удобной для массового использования при реконструкции зданий с однослойными кирпичными стенами.

Список литературы

1. Макаров Р.А., Муреев П.Н., Макаров А.Н. Определение поправки к термическому сопротивлению при квазистационарном режиме теплопередачи в наружных стенах, выполненных из кирпича // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1;
2. Макаров Р.А., Муреев П.Н., Макаров А.Н. Определение фактического сопротивления теплопередаче наружных стен, выполненных из кирпича, зданий постройки 60–80-х годов XX века // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–18. – С. 3960–3965;

3. Патент РФ № 2010142067/28, 14.10.2010. Зуев В. И., Коршунов О.В., Сенновский Д.В., Троицкий-Марков Р.Т. Способ определения термического сопротивления участка элемента конструкции при нестационарном режиме теплопередачи //Патент России № 2457471. Бюл. № 21.

УДК 536.21

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГРАНУЛИРОВАННОЙ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ

Махмадали М. Сафаров*, **Алимамад Г. Мирзомамадов****,
Сунатулло С. Абдуназаров***, **Зафачон Ю. Норов******
Mahmadali M. Safarov*, **Alimamad G. Mirzomamadov ****
Sunatullo S. Abdunazarov *** **Zafachon Yu. Norov ******

*Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ»,
Душанбе, Таджикистан, (e-mail: mahmad1@list.ru),
Branch of National research university "MEI".

***Таджикский государственный педагогический университет имени Садриддина Ай-
ни, Душанбе, Таджикистан, (e-mail: ptuh1985@mail.ru),

The Tajik state pedagogical university named after Sadriddin Ayni, Dushanbe, Tajikistan

***Таджикский энергетический институт, Курган-Тюбе, Таджикистан,
Tajik power institute, Kurgan Tyube, Tajikistan.

****Центр развития одарённых детей, Душанбе, Таджикистан,
(e-mail: zafar_8484n@mail.ru),

Center of development talented of children, Dushanbe, Tajikistan

Аннотация: В работе приводятся результаты экспериментов по определению коэффициентов теплопроводности и адсорбции для гранулированной окиси алюминия различных фракций при комнатной температуре. Получена эмпирическая зависимость коэффициента теплопроводности от коэффициента адсорбции.

Abstract: Results of experiments on determination of coefficients of heat conductivity and adsorption for the granulated oxide of aluminum of various fractions at the room temperature are given. Empirical dependence of coefficient of heat conductivity on adsorption coefficient is received.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, коэффициент адсорбции, гранулированная окись алюминия.

Keywords: heat conductivity coefficient, adsorption coefficient, the granulated aluminum oxide.

Регулируя физические характеристики носителя или катализатора, можно добиться нужных свойств каталитической системы. Все эти характеристики связаны между собой, поэтому при разработке катализатора часто возникает необходимость пренебречь одной из характеристик, чтобы достичь оптимального значения другой. В число важных параметров катализаторов входят пористость, фракционный состав, насыпная и истинная плотности, механическая прочность, удельная поверхность, распределение пор по радиусам, объем пор и теплоемкость. Твердые катализаторы имеют собственный объем и поверхность. Объем твердого катализатора определяет такие физико-химические свойства, как насыпная плотность, истинная плотность, текстура, которые, в свою очередь, зависят от полиэдрического строения решетки, ее упаковки и природы.

Поверхность определяет способность твердых катализаторов осуществлять адсорбцию и хемосорбцию веществ на активных центрах, формирующихся на поверхности в процессе приготовления катализаторов. Твердые адсорбенты и катализаторы готовят,

как правило, в форме цилиндров, шаров, микросфер, частиц в форме звездочек, дужек, лепешек и многих других форм. Металлические катализаторы готовят в форме сеток или свитых проволочек [3,17].

В данной работе исследована теплопроводность катализатора - окиси алюминия различных фракций. Значения коэффициента теплопроводности зависят от коэффициента адсорбции и влажности материала. Величина коэффициента адсорбции требует своего определения. Известно, что за счет поглощения паров воды из воздуха, масса образцов из окиси алюминия изменяется со временем. Экспериментальные значения изменяющейся массы образцов при комнатной температуре приведены в таблице 1, и показаны на рисунке 1 [1,4].

Таблица 1. Зависимость изменение массы Al_2O_3 от время в процессе адсорбции

t, (час) m, (гр.)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
$Al_2O_3(0,85-1,25\text{ мм})$	0,505	0,51	0,516	0,518	0,521	0,523	0,525
$Al_2O_3(2-3\text{ мм})$	0,508	0,514	0,518	0,525	0,531	0,538	0,544
$Al_2O_3(3-4\text{ мм})$	0,513	0,522	0,534	0,542	0,547	0,553	0,558
-	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
$Al_2O_3(0,85-1,25\text{ мм})$	0,528	0,532	0,534	0,536	0,537	0,538	0,538
$Al_2O_3(2-3\text{ мм})$	0,555	0,56	0,566	0,57	0,575	0,58	0,58
$Al_2O_3(3-4\text{ мм})$	0,563	0,574	0,585	0,602	0,602	0,602	0,602

Отметим, что в 80-х годах прошлого века различными авторами были исследованы теплофизические свойства пористой гранулированной окиси алюминия в вакууме и в различных газовых средах [5-15]. Для данного исследования авторами было разработана и собрана экспериментальная установка по методу цилиндрического бикалориметра регулярного теплового режима первого рода [6, 7, 13]. Для расчета теплопроводности зернистых материалов нами под руководством профессора Дульнева Г.Н. был предложен метод [2].

Используя таблицу 1, можно вычислить коэффициент адсорбции по формуле [16]:

$$\Gamma = \frac{m_{\text{вода}}}{m_{Al_2O_3}} \cdot \left(\frac{\text{мол}}{\text{гр}} \right),$$

где М – молярная масса воды. Результаты расчетов приведены в таблице 2 и на рисунке 2.

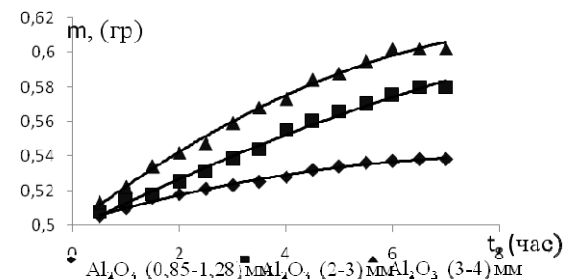


Рисунок 1. Зависимость изменение массы гранулированной окиси алюминия от времени.

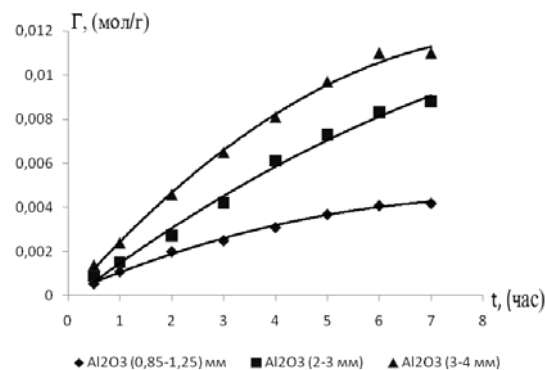


Рисунок 2. Зависимость коэффициента адсорбции гранулированной окиси алюминия от времени.

Таблица 2. Зависимость коэффициента адсорбции пористой гранулированной окиси алюминия с различными фракциями от времени.

t (час)	Г, (мол/г)		
	Al ₂ O ₃ (0,85-1,25) мм	Al ₂ O ₃ (2-3 мм)	Al ₂ O ₃ (3-4 мм)
0,5	0,00055	0,00088	0,0014
1	0,0011	0,0015	0,0024
2	0,0020	0,0027	0,0046
3	0,0025	0,0042	0,0065
4	0,0031	0,0061	0,0081
5	0,0037	0,0073	0,0097
6	0,0041	0,0083	0,011
7	0,0042	0,0088	0,011

Из рисунка 2, видно, что при увеличении исходной массы образца окиси алюминия коэффициент адсорбции растет. Интенсивность прироста массы за счет адсорбции паров воды зависит от суммарного объема пор. Данные по кинетике коэффициента адсорбции для различных фракций окиси алюминия показаны на рисунке 3 и приведены в таблице 3.

Таблица 3. Взаимосвязь между теплопроводностью и коэффициентом адсорбции для пористой гранулированной окиси алюминия с различными фракциями при комнатной температуре и 30, 360 мин

t (час)	Al ₂ O ₃ (0,85-1,25 мм)		Al ₂ O ₃ (2-3 мм)		Al ₂ O ₃ (3-4 мм)	
	Г, (мол/г)	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	Г, (мол/г)	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	Г, (мол/г)	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)
0,5	0,00055	167,5	0,00088	175,5	0,0014	188,8
1	0,0011	181,0	0,0015	190,7	0,0024	212,8
2	0,0020	203,0	0,0027	220,1	0,0046	266,7
3	0,0025	215,2	0,0042	256,9	0,0065	313,2
4	0,0031	229,9	0,0061	303,4	0,0081	352,4
5	0,0037	244,6	0,0073	332,8	0,0097	391,6
6	0,0041	254,4	0,0083	357,3	0,011	423,5

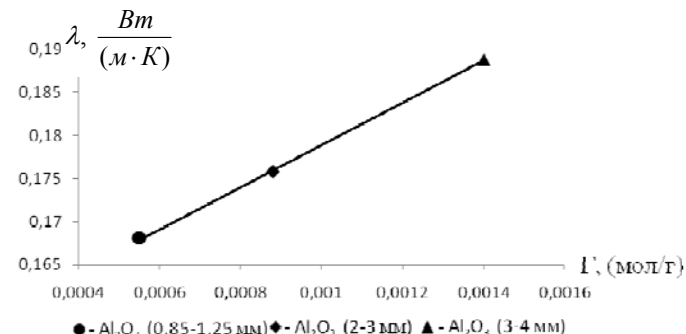


Рисунок 3. Зависимость коэффициента теплопроводности от коэффициента адсорбции пористой гранулированной окиси алюминия с различными фракциями при t = 30 минут и комнатной температуре.

Для выявления взаимосвязи между теплопроводностью и адсорбционными свойствами катализаторов нами было получена функциональная зависимость $\lambda = f(\Gamma)$. Установлено, что при увеличении коэффициента адсорбции, теплопроводность окиси алюминия увеличивается по линейному закону вида

$$\lambda = 24,5\Gamma + 0,154 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}, \quad (1)$$

где, Γ -коэффициент адсорбции.

Влажность зависит как от свойств самого материала (пористости, гигроскопичности), так и от окружающей его среды (влажность воздуха, наличие контакта с водой). Она влияет, также на прочность, теплопроводность, устойчивость к гниению и некоторые другие свойства материалов, в том числе термодинамических параметров.

Таблица 4. Определения влажности пористой гранулированной окиси алюминия в процессе увлажнения при комнатной температуре.

t (час)	Al ₂ O ₃ (0,85-1,25 мм)				Al ₂ O ₃ (2-3 мм)				Al ₂ O ₃ (3-4 мм)			
	m_B	m_c	Wa %	Wo %	m_B	m_c	Wa %	Wo %	m_B	m_c	Wa %	Wo %
0,5	0,505	0,5	1	0,99	0,508	0,5	1,6	1,57	0,513	0,5	2,6	2,5
1	0,51	0,5	2	1,96	0,514	0,5	2,8	2,7	0,522	0,5	4,4	4,2
2	0,518	0,5	3,6	3,47	0,525	0,5	5	4,76	0,542	0,5	8,4	7,7
3	0,523	-	4,6	4,39	0,538	-	7,6	7	0,553	-	10,6	9,6
4	0,528	-	5,6	5,3	0,555	-	11	9,9	0,563	-	12,6	11,2
5	0,534	-	6,8	6,36	0,566	-	13,2	11,6	0,585	-	17	14,5
6	0,537	-	7,4	6,89	0,575	-	15	13	0,602	-	20,4	17

Различают абсолютную (Wa) и относительную влажность (Wo), значения которых определяют по формулам в процентах

$$W_a = \frac{m_B - m_c}{m_c} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$W_o = \frac{m_B - m_c}{m_B} \cdot 100\% \quad (3)$$

где m_v - масса влажности засыпки, г; m_c - масса засыпки, высушенной до постоянной массы, г. В таблице 4 представлены данные по кинетике увлажнения засыпки гранулированной окиси алюминия в течение 6 часов

Таким образом, в результате исследования коэффициентов теплопроводности и адсорбции гранулированной окиси алюминия получено эмпирическое уравнение, позволяющее, не проводя дополнительных экспериментов, рассчитать искомый коэффициент теплопроводности в пределах погрешности опыта.

Список литературы

1. Бурбо П.З. Аппараты и машины кислородных установок. Труды Всесоюзный научно-исследовательский институт кислородного машиностроения. Выпуск 3. М.1960. С. 51-68.
2. Дульнев Г.Н., Муратова Б.Л., Трибель Т.В., Маджидов Х., Сафаров М.М. Метод расчета теплопроводности пористой зернистых материалов с металлическими наполнителями в различных средах. // ИФЖ, Т.51, N2, 1986, Минск, С. 255-259.
3. Курмашева Д.М. Адсорбция и процессы переноса молекул воды в пористых и мелкодисперсных средах. Диссертация на соискание учёной степени к. ф.-м. наук. М. – 2015. 112 с.
4. Карнаухов А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. – Новосибирск: Наука, Сиб. Предприятие РАН, 1999. 420 с.
5. Маджидов Х., Гайдей Т.П., Сафаров М.М. Исследование теплофизических свойств окиси алюминия, содержащей различные количества металла в газовых средах и в вакууме. // Тез. Докл. VII Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ, 1982, Ташкент, С.185-187.
6. Маджидов Х., Гайдей Т.П., Сафаров М.М. Исследование эффективного коэффициента теплопроводности окиси алюминия, содержащей различные количества металла в газовых средах и в вакууме // Журнал физической химии, Т.58, №1, 1984, -М. С 580-592.
7. Маджидов Х., Гусейнов К.Д., Сафаров М.М. Зависимость теплопроводности окиси алюминия от концентрации никеля и температуры // ДАН Тадж. ССР, №2, Т.27, №9, 1984, Душанбе, С.376 –379.
8. Маджидов Х., Зубайдов С., Сафаров М.М. Теплофизические свойства окиси алюминия в зависимости от размеров гранул и температуры в различных газовых средах и вакууме. // Тез. докл. Респуб. научно-практич. конф. молодых ученых и специалистов, посвященной 60-летию Ленинского комсомола Таджикистана, ч.1, Душанбе, 1985. С.79.
9. Маджидов Х., Зубайдов С., Сафаров М.М. Теплофизические свойства гранулированной окиси алюминия с металлическими наполнителями в зависимости от температуры и различных газовых средах. // Тез. Докл. Респуб. научно-практич. конф. молодых ученых и специалистов, посвященной 60-летию Ленинского комсомола Таджикистана, ч.1, Душанбе, 1985. С.57-58.
10. Маджидов Х., Зубайдов С., Раджабов Х., Сафаров М.М. Теплопроводность и тепло-туропроводность пористой гранулированной окиси алюминия в зависимости от размеров гранул и температур // ДАН Тадж. ССР, Т.28, №12, 1985, Душанбе, С.702-706.
11. Маджидов Х., Сафаров М.М. Эффективная теплопроводность окиси алюминия с металлическими наполнителями в различных газовых средах и вакууме // Инженерно-физический журнал, Т.50, №3, 1986, Минск, С.465-472.
12. Маджидов Х., Сафаров М.М. Теплофизические свойства пористой гранулированной окиси алюминия в зависимости от концентрации, температуры в различных средах // ИФЖ, Т.50, №1, Деп. № 4471 -85, 1986, Минск, 11 с.

13. Сафаров М.М. Теплофизические свойства окиси алюминия с металлическими наполнителями в различных газовых средах // Автореферат... к.т.н. – Ленинград, 1986.-24 С.

14. Сафаров М.М. Теплофизические свойства окиси алюминия с металлическими наполнителями в различных газовых средах. Дис. на соиск.... к. т. наук, Душанбе - 1986.-156 с.

15. Сафаров М.М., Мирзомаматов А.Г., Абдуназаров С.С., Зарипова М.А. Адсорбционные свойства катализатора на основе гранулированного оксида алюминия. Сборник тезисов докладов научной конференции «Актуальные проблемы современной науки», МИСиС, Душанбе, 2015.– С.79- 80.

16. Фенелов В.Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры, адсорбентов и катализаторов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002.–С.20-23.

17. Ханова Н.И., Конкина И.В. Основные свойства строительных материалов Нижнего Новгорода. - 2013.- 36 с.

УДК 677+004.891

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ THE PRINCIPLES OF CREATION OF THE EXPERT SYSTEM OF HEAT EXCHANGE NETWORK AUTOMATION SYNTHESIS

Л.В. Гурьева
L.V. Guryeva

Московский государственный университет технологий и управления
имени К.Г. Разумовского, Россия, Москва,
(vburovtsov@mail.ru)
Moscow State University of Technology and Management, Russia, Moscow

Аннотация: Рассмотрены принципы разработки экспертных систем для автоматизированного синтеза оптимальных теплообменных систем как метода искусственного интеллекта и архитектура экспертной системы, включающая базу знаний с различными моделями представления знаний.

Abstract: The principles of creation of the expert system for heat exchange network automation synthesis on base of artificial intelligence technic and the architecture of the expert system included a knowledge base with different knowledge representation models considered.

Ключевые слова: автоматизированный синтез; теплообменная система; экспертная система; эвристика, база знаний; модели представления знаний; фрейм.

Keywords: Automation synthesis; Heat-exchanger Network; Expert system; Heuristic; Knowledge base; Knowledge representation models; Frame.

Автоматизированный синтез теплообменных систем (ТС) - это интеллектуальная операция составления с участием лица, принимающего решение (ЛПР), описания и чертежа технологической схемы еще не существующей ТС, которая обеспечивает теплообмен между технологическими потоками, имеющими заданные начальные и конечные температуры, с учетом различных инженерно-аппаратурных, физико-химических и технологических ограничений на функционирование ТС.

Задача синтеза оптимальных теплообменных систем (ТС) является одной из неформализованных задач химической технологии, для решения которой могут ус-

пешно использоваться методы искусственного интеллекта, одним из направлений которого является разработка и использование экспертных систем [1].

Экспертная система (ЭС) – это интеллектуальная система, способная в диалоге с ЛПР на основе использования специальных знаний и правил проведения рассуждений выполнять экспертизу, давать консультации, генерировать и обосновывать рациональные смысловые решения в некоторой предметной области, в конкретном случае – в области автоматизированного синтеза оптимальных ТС.

Рассмотрим принципы разработки ЭС автоматизированного синтеза ТС:

1. Принцип накопления и переработки разнообразных знаний по термодинамике, теории теплопередачи и тепловых процессов, знаний о типе-конструкциях теплообменных аппаратов для нагрева и охлаждения технологических потоков, знания и данные о физико-химических свойствах участвующих в теплообмене технологических потоков при различных температурах и давлениях.

2. Постановка исходной задачи синтеза в следующей словесной форме: "Для некоторого химического производства известно множество исходных горячих технологических потоков, которые необходимо охладить, и множество холодных технологических потоков, которые необходимо нагреть, требуется синтезировать оптимальную технологическую схему ТС, состоящую из совокупности определенного числа заданного типа теплообменных аппаратов (ТА), а также дополнительных холодильников и (или) нагревателей, использующих вспомогательные тепло- и хладагенты".

3. Принцип составления эвристических правил для выбора пары взаимодействующих горячих и холодных потоков, которые отображают знания из области термодинамического и эксергетического анализа процессов теплообмена, методов автоматизированного синтеза ТС и способов энергосбережения. Эвристическое правило, или эвристика, – это либо некоторое утверждение, являющееся результатом обобщения существующих теоретических и экспериментальных знаний, а также знаний здравого смысла, либо некоторая экспериментальная гипотеза или интуитивное суждение ЛПР, которое обеспечивает поиск рациональных технологических схем ТС при резком сокращении множества генерируемых альтернативных вариантов решений задачи [1].

4. Принцип представления знаний в ЭС. Архитектура ГЭС образована совокупностью автономно работающих функциональных блоков, реализованных в виде программных комплексов: базы знаний (БЗ); редактора БЗ, обеспечивающего организацию, модификацию и поддержку в рабочем состоянии БЗ; системы поиска противоречий, выявляющей внутренние противоречия в системе правил; блока вывода решений, предназначенного для достижения цели – генерации семантического решения – путем применения продукционных правил.

База знаний хранит программно реализованные модели представления знаний: предметные знания, управляющие знания и метазнания. Предметные знания – это совокупность декларативных и процедурных знаний по термодинамике, теории теплопередачи и теории тепловых процессов. Декларативные знания – это основные понятия предметной области: – технологический поток ТС, теплоноситель, теплообменный аппарат и т.п. К ним относятся фреймы и семантические графы.

Фрейм – это минимальное смысловое описание в словесной структурно-классифицированной форме знаний о некотором стереотипном понятии, операции, явлении или событии проблемной области. Нами разработаны следующие фреймы-понятия проблемной области "синтез оптимальных ТС": "Fг – технологический поток ТС", "Fг – теплоноситель", "Fг – процесс теплообмена", "Fг – теплообменный аппарат".

Семантический граф ТС, или семантическая сеть ТС, отображает процедуру поиска решения задачи синтеза оптимальных ТС или собственно семантическое решение задачи синтеза ТС. Вершины графа соответствуют параметрам состояния и свойств технологических потоков, а ветви – технологическим операциям теплообмена и операторам нагрева – охлаждения.

Процедурные знания – это вычислительные операции расчета характеристик состояния потоков ТС, к которым относятся модули расчета теплового баланса, проектного и проверочного расчета ТА, модули расчета физико-химических свойств потоков, стандартные пакеты прикладных программ, специальные программы цифрового моделирования.

Моделями управляющих знаний являются продукционные правила (ПП), соответствующие эвристическим правилам, с помощью которых на каждом этапе процедуры поиска семантического решения исходной задачи синтеза ТС выбираются пары взаимодействующих в одном ТА горячих и холодных потоков. Нами используются при синтезе оптимальных ТС продукционные правила трех основных классов.

Первый класс составляют "уточняющие правила", которые позволяют на основе знаний о типе установки идентифицировать множества участвующих в теплообмене горячих и холодных потоков ТС и определить физико-химические свойства теплообменивающихся потоков. Ко второму классу относятся ПП, отображающие термодинамически рациональные условия теплообмена между парами взаимодействующих потоков. ПП третьего класса отображают конструкционные и технико-экономические ограничения на инженерно-аппаратурное оформление процессов теплообмена.

Метазнания – знания о типах и структуре знаний предметной области, знания о классификации понятий и ПП, используемых при генерации технологических схем ТС.

Принцип реализации ЭС. Программная реализация базы знаний и эвристическо-декомпозиционной процедуры генерации оптимального решения задачи синтеза ТС нами осуществлены с использованием инструментальной экспертной системы «Экран».

Список литературы

1. Мешалкин В.П.. Экспертные системы в химической технологии. Основы теории, опыт разработки и применения. – М.: Химия, 1995.

Научное издание

Первые Международные
Лыковские научные чтения
**«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СУШКИ
И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ
МАТЕРИАЛОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ»**

22 - 23 сентября 2015 года

Технический редактор Есипова В.А.
Компьютерная верстка и макет Есипова В.А.

Подписано в печать 15.09.2015 г.
Формат 60х84 1/16, Бумага офсетная
Уч.-изд. л. 31,0 Усл. печ. л. 28,8 Тираж 200 экз. Заказ № 184

Отпечатано в типографии
Закрытое акционерное общество "Университетская книга"
305018, г. Курск, ул. Монтажников, д.12
ИНН 4632047762 ОГРН 1044637037829 дата регистрации 23.11.2004 г.
Телефон +7-910-730-82-83