



**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ,
ПОСВЯЩЁННАЯ 105-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
А. Н. ПЛАНОВСКОГО
(МНТК ПЛАНОВСКИЙ - 2016)**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ
И АППАРАТОВ В ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЯХ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

(ТОМ 2)

МОСКВА

8-9 СЕНТЯБРЯ 2016 ГОДА

УДК 66.02
П 42

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

Учёный секретарь Оргкомитета
учёный секретарь Комитета РосСНИО по проблемам сушки и
термовлажностной обработки материалов,
профессор **Кошелева Мария Константиновна**

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ В ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
[Текст]: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского (8-9 сентября 2016 года). Т. 2 / М.: ФГБОУ ВО МГУДТ, 2016. – 350 с.

ISBN 978-5-87055-402-0
ISBN 978-5-87055-404-4

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

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

ISBN 978-5-87055-402-0
ISBN 978-5-87055-404-4
УДК 66.02

©Московский государственный
университет дизайна и технологии, 2016
© Авторы статей, 2016
© Обложка. Дизайн. Кононова О.С., 2016

**ОРГАНИЗАТОРЫ
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ,
ПОСВЯЩЁННОЙ 105-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
А.Н. ПЛАНОВСКОГО**

*Министерство образования и науки РФ

*Комитет РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов

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

* Московский государственный университет дизайна и технологии

*Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

*Институт химического машиностроения имени Л. А. Костандова Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ)

*Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева

*Институт технической теплофизики НАН Украины

Рабочие языки конференции: русский и английский.

Материалы публикуются в авторской редакции.

**ОРГКОМИТЕТ
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ,
ПОСВЯЩЁННОЙ 105-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
А.Н. ПЛАНОВСКОГО**

Председатель Оргкомитета

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

Учёный секретарь Оргкомитета

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

Информационное обеспечение конференции на сайте

www.drying-committee.ru

Научный оргкомитет

От России:

проф. Антипов С. Т. (Воронеж); проф. Белуков С. В. (Москва); проф. Блиничев В. Н. (Иваново); доц. Балыхин М. Г. (Москва); проф. Владимиров А. И. (Москва); проф. Волынский В. Ю. (Иваново); проф. Горяев А. Б. (Москва); проф. Гальбрайт Л. С. (Москва); проф. Генералов М. Б. (Москва); член-корр. РАН, проф. Гусев Б. В. (Москва); проф. Дворецкий С. И. (Тамбов); проф. Дмитриев Е. А. (Москва); проф. Долгунин В. Н. (Тамбов); проф. Дорняк О. Р. (Воронеж); проф. Дьяконов С. Г. (Казань); проф. Жмакин Л. И. (Москва); проф. Жуков Н. П. (Тамбов); проф. Захарова А. А. (Москва); проф. Карташов Э. М. (Москва); проф. Кащеев О. В. (Москва); проф. Кобраков К. И. (Москва); проф. Кошелева М. К. (Москва); проф. Кулов Н. Н. (Москва); проф. Лабутин А. Н. (Иваново); проф. Липин А. Г. (Иваново); проф. Лялин В. А. (Москва); проф. Мизонов В. Е. (Иваново); проф. Мищенко С. В. (Тамбов); проф. Носов Г. А. (Москва); проф. Остриков А. Н. (Воронеж); проф. Разумеев К. Э. (Москва); проф. Рудобашта С. П. (Москва); проф. Сажин Б. С. (Москва); проф. Сафин Р. Г. (Казань); проф. Сафин Р. Р. (Казань); доц. Седяров О. И. (Москва); д.т.н. Секанов Ю. П. (Москва); проф. Семенов Ю. П. (Мытищи); член-корр. РАН, проф. Систер В. Г. (Москва); д.т.н. Сорочинский В. Ф. (Москва); проф. Таран А. Л. (Москва); акад. РААСН, проф. Федосов С. В. (Иваново); проф. Флисюк О. М. (С.-Петербург); проф. Фролов В. Ф. (С.-Петербург).

Международный:

prof. A. Akulich (Belarus); prof. P. Akulich (Belarus); prof. O. Alves-Filho (Norway); prof. O. Burdo (Ukraine); prof. P. Ditzl (Czechia); NAS of Ukraine academician A. Dolinsky (Ukraine); Ph.D. D. Gehrman (Germany); prof. T. Jirout (Czechia); prof. Ja. Krawczyk (Poland); prof. T. Kudra (Canada); prof. N. Mihailov (Bulgaria); prof. L. Mörl (Germany); prof. A. Mudjumdar (Singapore); prof. F. Rieger (Czechia); prof. G.D. Saravacos (Greece); NAS of Ukraine corresponding member Yu. Snezhkin (Ukraine); prof. G. Stankevich (Ukraine); prof. C. Strumillo (Poland); prof. Li Zhanyong (China).

ОГЛАВЛЕНИЕ

СЕКЦИЯ 4. «СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ»....	11
Ю. Ф. Снежкин, Н. В. Дмитриенко, С. А. Иванов, Л. И. Воробьев ОСОБЕННОСТИ ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ ТКАНЕЙ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ	11
О. Г. Бурдо, В. Н. Бандура, И. И. Яровой НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ	15
П. В. Акулич РАСЧЕТ КИНЕТИКИ СУШКИ ПОРИСТЫХ ТЕЛ С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПАРАМЕТРОВ НА УГЛУБЛЯЮЩЕЙСЯ ГРАНИЦЕ ИСПАРЕНИЯ	20
В. Е. Мизонов, Н. Н. Елин, А. А. Котков О РЕВЕРСИВНОЙ СУШКЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	24
С. П. Рудобашта, М. К. Кошелева ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПО КРИВЫМ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....	27
Г. Н. Станкевич АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБОВ СУШКИ ЗЕРНА	31
А. Н. Остриков, А. Ю. Бачевский РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СУШКИ ФЕЙХОА ПРИ СТУПЕНЧАТОМ ЭНЕРГОПОДВОДЕ.....	35
Н. Н. Сороковая, Ю. Ф. Снежкин МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СУШКИ ТОРФА В УСЛОВИЯХ КИПЯЩЕГО СЛОЯ	38
В. А. Резчиков, С. В. Савченко, Л. А. Савченко ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕНА ПРИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СУШКЕ ЗЕРНА	43
Ю. Ф. Снежкин, Р. А. Шапарь, Е. В. Гусарова ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ КОНВЕКТИВНО-КОНДЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД СУШКИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ЧИПСОВ	45
Д. С. Кашменский, С. П. Рудобашта ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ СЕМЯН НА ЭФФЕКТ СТИМУЛЯЦИИ	48
А. А. Шевцов, Л. И. Лыткина, Б. А. Гуме ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЗЕРНА АРАХИСА	52
А. М. Воробьев, Г. С. Кормильцин ИНТЕНСИФИКАЦИЯ И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ СУСПЕНЗИЙ	55
Л. И. Жмакин, Н. М. Шарпар ТЕПЛОМАССОБМЕН В ПРОЦЕССЕ КОНТАКТНОЙ СУШКИ ТКАНЕЙ.....	57
Ю. А. Максименко, Э. Р. Теличкина, Н. Э. Пшеничная КИНЕТИКА И ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	62
А. А. Захарова, В. С. Салтыкова, О. С. Моргун, В. П. Комолов ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО - И МАССОПЕРЕНОСА В МАТЕРИАЛАХ И ПАКЕТАХ ОДЕЖДЫ И ОБУВИ	65
А. В. Митрофанов, А. Ф. Камело РАСЧЕТ СУШКИ ЧАСТИЦ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ ПО ЛОКАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ СОСТОЯНИЯ	69
И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева, Т. Ю. Дементьева КОМБИНИРОВАННАЯ МИКРОВОЛНОВАЯ СУШКА ЗЕРНА.....	72

И. Ю. Алексанян, Ю. А. Максименко, Ю. С. Феклунова, Н. Э. Пшеничная КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШИЛКА ДЛЯ ЖИДКИХ И ПАСТООБРАЗНЫХ ПИЩЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	76
А. Н. Поперечный, Н. А. Миронова МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК	79
И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА ПРИ СУШКЕ ЗЕРНА В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ.....	83
А. Я. Папченко, Н. А. Попова, М. К. Болога СУШКА СОЧНОГО ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ ПРИ ЭЛЕКТРОПЛАЗМОЛИЗЕ БИПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	87
Е. В. Шувалов, Л. И. Жмакин, Н. М. Шарпар МЕХАНИЗМ ДВИЖЕНИЯ КАПЛИ КОНДЕНСАТА В КАНАЛЕ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КАНАЛЬНОГО МЕТОДА НАГРЕВА ПАРОМ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	90
И. В. Безбах, А. В. Зыков, Е. В. Воскресенская МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В АППАРАТЕ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ТЕРМОСИФОНОМ	94
А. А. Надеев, А. В. Бараков, В. Ю. Дубанин ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ	97
М. А. Остапенко, Д. М. Солохин СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГО- И МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ПАСТООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ	99
А. Н. Поперечный, В. Г. Корнийчук, С. А. Боровков ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ДИКОРАСТУЩЕГО ПЛОДОВОГО СЫРЬЯ ДОНЕЦКОГО РЕГИОНА.....	102
И. А. Попов АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ КАК ОБЪЕКТОВ СУШКИ В АКТИВНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ	106
М. В. Копылов, В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова АНАЛИЗ ХРАНИМОСПОСОБНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОГО МАСЛИЧНОГО СЫРЬЯ, ВЫСУШЕННОГО НА ЛЕНТОЧНЫХ СУШИЛКАХ	110
СЕКЦИЯ 5. «ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ»	113
Л. Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П. А. Капустенко, С. И. Бухкало, О. П. Арсеньева, А. Ю. Перевертайленко АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОНВЕРСИИ ФОСФОГИПСА	113
А. А. Долинский, Н. А. Шаркова, Э. К. Жукотский, А. В. Декуша, Т. Я. Турчина БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОБЕЛКОВОГО ГИДРОЛИЗОВАННОГО ПРОДУКТА И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ	117
К. И. Кобраков, Д. Н. Кузнецов, Е. Б. Караваева, В. И. Родионов ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ ОТДЕЛОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА	122
А. А. Липин, А. Г. Липин ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕЩЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ И СУШКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ СИНТЕЗА ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИМЕРОВ.....	124

О. Р. Дорняк, В. М. Попов, Н. А. Анашкина МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОКОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ОБРАЗЦОВ	127
И. В. Постникова, С. В. Воробьев, В. Н. Блиничев РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРОЦЕССА СУШКИ ПАСТООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ СТОЧНЫХ ВОД	130
Т. В. Гладышева, Н. Ф. Гладышев, С. И. Дворецкий, Р. В. Дорохов, Е. А. Рябова, В. П. Беляев ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРОДУКТА НА СТЕКЛОВОЛОКНИСТОЙ МАТРИЦЕ ДЛЯ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ.....	135
В. Е. Румянцева, И. В. Караваев, В. С. Коновалова, С. А. Логинова КОРРОЗИЯ БЕТОНА С ГИДРОФОБИЗИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ	138
В. М. Баранцев, Т. Е. Платова, Н. В. Богданов МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ОКСИДАМИ В УСЛОВИЯХ МИКРОВОЛНОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ	141
В. М. Попов, А. Н. Внуков, О. Р. Дорняк УПРОЧНЯЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	145
В. Е. Румянцева, В. С. Коновалова ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ФОСФАТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ	147
В. М. Попов, Е. Н. Лушникова, И. Ю. Кондратенко МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БЛОЧНЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ПОСТОЯННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.....	151
С. И. Бухкало, О. В. Белоус, И. Н. Демидов НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ АНТИОКСИДАНТОВ	153
Г. И. Хазанов, М. А. Апарушкина ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ АППРЕТИРОВАНИЯ СУКОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ КНИТЕКС	156
С. И. Бухкало, Н. Н. Зипунников, О. И. Ольховская АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ МАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСАДОК ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ ЭТИЛОВОГО СПИРТА.....	160
М. С. Муллакаев, Г. Б. Векслер, А. П. Храмцов, А. Р. Вахитов ГАЛЬВАНОХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ХРОМСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД	163
С. И. Бухкало, О. И. Ольховская АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНОЙ ЧАСТИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ	168
В. А. Кириченко, С. В. Громов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛИВОЧНОГО МАСЛА, ОБРАБОТАННОГО ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ.....	171
С. И. Бухкало, В. Н. Соловей, С. П. Иглин ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ В СТАТИЧЕСКИХ АППАРАТАХ.....	175
С. И. Лазарев, А. А. Лавренченко, Д. С. Лазарев ЭЛЕКТРОУЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННАЯ ОЧИСТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ БИОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ	178
Л. К. Овсянникова ОСОБЕННОСТИ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ МЕЛКОСЕМЕННЫХ КУЛЬТУР	181

Л. Л. Руднева, С. И. Бухкало ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ УТИЛИЗАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОСКОВ.....	185
П. В. Толмачев, О. М. Градов ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАВИТАЦИИ И РЕАГЕНТОВ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ	188
А. В. Маринин ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КОЖУХОТРУБНОМ РЕАКТОРЕ	192
М. М. Сафаров, С. С. Абдуназаров КОЭФФИЦИЕНТ МАССООТДАЧИ ИРИДИЕВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ГРАНУЛИРОВАННОЙ ПОРИСТОЙ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ	196
С. А. Соколов, Н. Н. Севаторов СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧЕНОЧНОГО ПАШТЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАРОСТАТИЧЕСКОЙ И БАРОЦИКЛИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИЙ	201
Г. И. Хазанов, М. А. Апарушкина УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АПРЕТИРОВАНИЯ ПРЕССОВЫХ СУКОН ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ В СОСТАВ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ПОЛИУРЕТАНОВОГО ЛАТЕКСА.....	205
СЕКЦИЯ 6. «УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ».....	208
В. А. Акатьев, Е. В. Метелкин, С. П. Суцев ВНУТРИТРУБНАЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ.....	208
Н. Ф. Майникова, Н. П. Жуков, О. Н. Попов, И. В. Рогов МЕТОД И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ	211
Н. М. Андрианов, М. Шуньчи, С. Юн РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕРНА В ШАХТНЫХ СУШИЛКАХ.....	216
В. А. Акатьев, Е. В. Метелкин, С. П. Суцев СТАБИЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ АВТОНОМНОГО АППАРАТА В ВОСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ ГАЗОВ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ.....	220
Ю. П. Секанов, М. А. Степанов, А. С. Колесникова ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗЕРНА И СЕМЯН	223
К. В. Соснин, В. В. Ткачев, Н. И. Школа АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ СУШКОЙ ЗЕРНА В СУШИЛКАХ ШАХТНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ.....	227
Н. И. Малин ШАХТНАЯ ЗЕРНОСУШИЛКА С ДВУМЯ КОНТУРАМИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ, КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ.....	231
А. В. Зыков, С. С. Орлова ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА	236
С. В. Гужов ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ С РАЗВИТЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ.....	240
А. А. Лукаш, Н. П. Лукутцова УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ОЦИЛИНДРОВАННЫХ БРЕВЕН	244
А. А. Шевцов, А. В. Дранников, Е. А. Шабунина УПРАВЛЕНИЕ АВТОТРОФНЫМ БИОСИНТЕЗОМ СВЕТОЗАВИСИМЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ.....	247

И. И. Вуткарева ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОЛИЗА НА МЕХАНИЗМ РЕАКЦИЙ ОКИСЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРООБРАБОТКЕ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ.....	252
СЕКЦИЯ 7. «ПРОЦЕССЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ТЕХНОСФЕРЫ».....	256
В. А. Волков, Н. И. Миташова, К. Д. Слабова ИСТОЧНИКИ И ПУТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ ФИТОТОКСИЧНЫМИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ.....	256
Н. Ф. Гладышев, С. И. Дворецкий, Е. И. Акулинин, М. Ю. Плотников РЕГЕНЕРАЦИЯ ВОЗДУХА МЕТОДОМ ХЕМОСОРБЦИИ В ГЕРМЕТИЧНОМ ОБИТАЕМОМ ОБЪЕКТЕ.....	261
А. Д. Платонов, Т. К. Курьянова, Ю. С. Михайлова ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ НА ВЫДЕЛЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ.....	264
В. О. Абрамов, М. С. Муллакаев УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АКТИВАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОД.....	267
М. П. Тюрин, Е. С. Бородина, М. А. Апарушкина ЭФФЕКТИВНЫЕ ТИПОВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ НАГРЕТЫХ ВЛАЖНЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	272
А. С. Белоусов, В. Г. Казачек СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ В ВИХРЕВЫХ И ЦИКЛОННЫХ АППАРАТАХ.....	274
Ю. А. Таран, Ю. И. Смирнова ЭКОЛОГИЧЕСКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЙ, РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЙ ПРОЦЕСС ПРИЛЛИРОВАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ.....	279
С. И. Лазарев, О. А. Ковалева, Д. С. Лазарев ЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОБАРОМЕМБРАННОЙ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РАСТВОРОВ КРАХМАЛЬНО-ПАТОЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВ.....	284
А. А. Захарова, В. С. Салтыкова, Л. В. Моисеева, И. Н. Бычкова СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ.....	287
Н. И. Миташова, Е. С. Кольцова, В. А. Волков УДАЛЕНИЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД АВТОПАРКОВОК СОРБЦИЕЙ НА НЕТКАНОМ МАТЕРИАЛЕ.....	289
Р. В. Брюшков, М. В. Дёмин, К. А. Ржесик О ВЛИЯНИИ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ КОМПРЕССОРНО-КОНДЕНСАТОРНОГО ОТДЕЛЕНИЯ БЫТОВОГО ХОЛОДИЛЬНИКА НА ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ ЕГО ХОЛОДИЛЬНОГО АГРЕГАТА.....	294
М. В. Дюбанов, О. И. Седяров, А. В. Артёмов РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО- АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	297
А. С. Скичко, А. А. Досаев АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ И ПОЧВЫ.....	300
А. А. Захарова, А. В. Артемов, Д. Ю. Арсеньева ПРЕИМУЩЕСТВА ПОЛУЧЕНИЯ БЕЛЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПЕРОКСИДНО-АЦЕТАТНЫМ СПОСОБОМ.....	302
И. Н. Курицин, О. И. Седяров, Н. В. Гуторова ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПЭТФ-ВОЛОКНА МЕТОДОМ КРЕЙЗИНГА.....	305
В. С. Салтыкова, А. А. Захарова, А. В. Юркова ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНОГО СОРБЕНТА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ...	308

Л. В. Моисеева, А. В. Сухарев, С. А. Иванов СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА.....	311
М. С. Муллакаев, А. В. Киселева, А. Р. Вахитов ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД КОНДИТЕРСКИХ ПРОИЗВОДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	313
В. С. Салтыкова, А. А. Захарова, А. В. Юркова СОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ОТ КИСЛОТНЫХ КРАСИТЕЛЕЙ.....	318
Ю. С. Мирошниченко, Т. Н. Мясоедова, Ю. Е. Зеленко ПРИМЕНЕНИЕ ГУМАТОВ В КАЧЕСТВЕ ПРИРОДНЫХ ДЕТОКСИКАНТОВ.....	320
В. П. Титов, З. Н. Османов ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО АУДИТА В СИСТЕМЕ МАРКЕТИНГА.....	323
Д. И. Емельянова КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	325
М. С. Муллакаев, Г. Б. Векслер ОЧИСТКА КИСЛЫХ РУДНИЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	330
М. И. Филимонов, А. Е. Новиков, М. И. Ламскова ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД.....	335
И. Н. Заплетников, И. С. Севаторова ТРАНСФОРМАЦИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПИТАНИЯ	337
Л. В. Гурьева, Т. А. Новикова, М. С. Апалькова ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ СУШКИ ЛЕГКИХ ХЛОПЧАТОБУМАЖНЫХ ТКАНЕЙ.....	341
А. К. Пильненко, И. Н. Заплетников ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВУКА ПРИ РЕЗАНИИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ	344

**СЕКЦИЯ 4.
«СУШКА И ТЕРМОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ»**

УДК 664.8.047

**ОСОБЕННОСТИ ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ ТКАНЕЙ В
ПРОЦЕССЕ СУШКИ
FEATURES OF WATER EVAPORATION OF FROM PLANT TISSUES DURING THE
DRYING PROCESS**

Юрий Федорович Снежкин*, Наталья Витальевна Дмитренко,
Сергей Александрович Иванов***, Леонид Иосифович Воробьев***
Yury F. Snezhkin *, Nataliya V. Dmytrenko**
Sergey A. Ivanov *** Leonid I. Vorobyov *****

*Институт технической теплофизики НАН Украины, Украина, Киев,
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Ukraine, Kyiv,
(e-mail: *ittf_ntps@ukr.net,** natatal@ukr.net,*** teplomer@ukr.net)*

Аннотация: В статье представлены результаты экспериментального определения теплоты испарения воды из различных растительных тканей и композиций растительных тканей в процессе их конвективно-кондуктивной сушки внутри калориметрической камеры дифференциального микрокалориметра испарения ДМКИ-01.

Abstract: The article presents the results of the experimental determination of the heat of evaporation of water from plant tissues and composition of plant tissues during the convective-conductive drying in calorimetric cell of differential microcalorimeter of evaporation DMKI-01.

Ключевые слова: сушка, теплота испарения, растительные ткани.

Keywords: drying, heat of evaporation, plant tissues.

Выход Украины на мировой рынок как страны-производителя сельскохозяйственной продукции и продуктов питания выдвигает новые требования к их качеству и ассортименту. Поскольку одним из наиболее распространенных и энергоемких в перерабатывающей сельхозсырье промышленности является процесс сушки растений, то особо актуальной стала задача дальнейшего развития и совершенствования ее технологий.

Растительное сырье традиционно относят к коллоидным капиллярно-пористым телам (ККПТ). Современные научные представления о механизме их обезвоживания базируются на работах Ребиндера П.О., Лыкова А. В., Гинзбурга А.С., Казанского В.М., S.Brunauer, R.V.Duckworth, M.Karel и др. При рассмотрении возможных механизмов удерживания влаги ККПТ, классиками теории сушки основательному анализу была подвергнута адсорбционно, осмотически и капиллярно связанная влага. Но растительные ткани – это и богатство химического состава, и наличие веществ, которые могут изменять свое состояние под влиянием технологических факторов, и существование клеточных и внутриклеточных мембран с избирательной проницаемостью. Влияние таких факторов на процесс обезвоживания ККПТ осталось вне рассмотрения в работах классиков, потому данная работа посвящена исследованию влияния на энергетику обезвоживания растительных тканей их состава и предварительного смешивания различных по составу растительных материалов.

Для расчетов тепловых затрат на сушку растительного сырья обычно используют табличные данные по теплоте парообразования чистой воды. Их уточняют на основании анализа кривых сорбции лишь для области гигроскопической влажности материала. При этом допускают, что существенный рост удельной теплоты испарения, обусловленный окончанием удаления свободной воды и началом удаления связанной, начинается с момента высушивания сырья до этой влажности. Однако, литературные данные [1, 2] и результаты

наших предыдущих исследований [3, 4] свидетельствуют о более раннем начале удаления связанной воды из растительных тканей. Т.к. для удаления связанной воды нужно больше энергии, чем для удаления свободной, встал вопрос о необходимости определения удельных затрат теплоты на испарение воды из растительных тканей на протяжении всего процесса сушки.

Для сложных гетерогенных веществ, каким является растительное сырье, определять тепловые характеристики аналитическими методами крайне сложно, поэтому в ИТТФ НАН Украины была разработана установка синхронного теплового анализа ДМКИ-01 [5]. Она позволяет определять удельную теплоту испарения чистых жидкостей, растворителей из растворов и влаги из материалов в процессе их изотермической сушки в диапазоне 40...105 °С. В основу ее работы положен метод непрерывного одновременного измерения количества теплоты, затрачиваемой на испарение влаги, и соответственной убыли массы образца.

С помощью ДМКИ-01 были определены значения удельной теплоты испарения воды из нативных паренхимных тканей яблока и картофеля, а также древесных тканей однолетних побегов ивы во время их конвективно-кондуктивной сушки внутри рабочей камеры калориметра (рис. 1). Для опытов использовались срезы толщиной 1...1,5 мм и площадью до 120 мм². Сушка производилась до момента достижения образцами равновесной влажности.

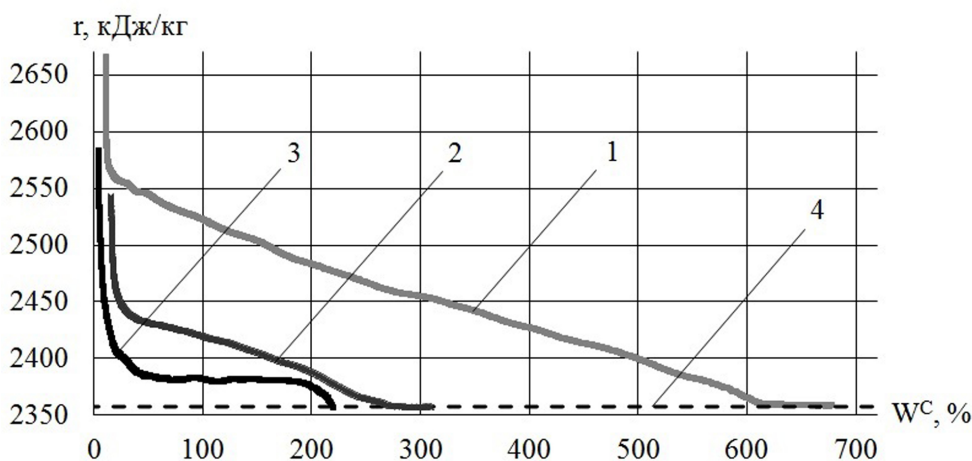


Рис. 1. Зависимость удельной теплоты испарения воды из тканей яблока (1), картофеля (2) и ивы (3) от их влажности во время конвективно-кондуктивной сушки при 60 °С, скорости продувки воздуха 0,8 см/с, его влагосодержания 3 г/кг сух. для яблока и картофеля и 11 г/кг сух. для ивы (4 – теплота парообразования чистой воды).

Величина теплоты испарения воды из разных растений (рис. 1) оказалась близкой к табличному значению теплоты парообразования чистой воды при 60 °С (2357,7 кДж/кг) лишь в самом начале сушки. Потом начинается ее возрастание. Для тканей яблока и картофеля прирост теплоты испарения подобен по характеру и достигает 8...10% превышения над табличным значением задолго до достижения ими предела гигроскопичности (47,7 и 32,8 % абс.). Для тканей ивы, после некоторого возрастания, значение теплоты испарения стабилизируется на величине, которая отличается от табличной на 1,5 % (при ошибке эксперимента ~ 1%), до момента достижения ими предела гигроскопичности (24,8 % абс.). Общий характер изменения теплоты испарения (рис. 1) свидетельствует о разной водоудерживающей способности различных растительных тканей и разном количестве связанной воды, которое удаляется из них в каждый момент сушки [3, 4].

Основными водоудерживающими веществами в тканях яблока являются растворенные фруктоза, глюкоза и сахароза (66 % сухого вещества). Связанная вода из гидратных оболочек их молекул начинает удаляться задолго до достижения тканями яблока

предела гигроскопичности и в больших количествах [1, 6]. Потому происходит значительное увеличение затрат теплоты на испарение уже на первых этапах сушки тканей яблока.

Основным водоудерживающим веществом в нативных тканях картофеля является нативный крахмал (73,8 % сухого вещества), который вплоть до предела гигроскопичности картофеля практически не отдает воду [7]. Возрастание же теплоты испарения на начальных этапах сушки, которое сходно с таковым для яблока, можно связать с наличием в картофеле небольшого количества растворимых сахаров (7,3 % сухого вещества). Т.к. их сравнительно мало, количество удерживаемой ими воды меньше, чем у яблока при той же влажности тканей, потому и возрастание затрат теплоты на испарение меньше, чем у яблока.

Основным водоудерживающим веществом в древесных тканях ивы являются целлюлоза и гемицеллюлоза (39 и 35 % сухого вещества), которые вместе с лигнином образуют жесткий каркас клеточных стенок. Поскольку молекулы воды удерживаются между молекулами целлюлозы на двух водородных связях, удаление их требует больших энергозатрат и происходит в последнюю очередь, после обезвоживания межклеточного пространства и полости клетки. Потому, некоторое, отличное от яблока и картофеля, возрастание теплоты испарения воды задолго до достижения тканями побегов ивы предела гигроскопичности можно объяснить удалением молекул воды из гидратных оболочек молекул растворенных веществ, состав и количество которых сильно отличается от таковых в яблоке и картофеле.

После достижения предела гигроскопичности всеми исследованными тканями, наблюдаем резкое возрастание затрат теплоты на испарение, обусловленное удалением исключительно связанной воды из все более глубоких гидратных слоев (рис. 1).

Необходимость расширения ассортимента пищевой продукции, достижения ее полноценной биологической активности и экономии энергии на ее изготовление привели к идее отказа от предварительной гидротермической обработки тканей корнеплода столовой свеклы в подкисленной среде и к созданию пищевых порошков из композиции тканей столовой свеклы с другими, кислотосодержащими растительными тканями [8].

Для исследования влияния смешивания разнородных по химическому составу растительных тканей на энергетику их обезвоживания были использованы корнеплод столовой свеклы и плоды лимона и помидора. Для создания композиций срезы тканей толщиной 1...2 мм были дополнительно измельчены и перемешаны в пропорциях, позволяющих достичь кислотности, необходимой для стабилизации бетанина в свекле ($pH=3,2...4,0$). Результаты данных исследований, проведенных с помощью ДМКИ-01, представлены на рис. 2 и 3. Сушка производилась до момента достижения образцами равновесной влажности.

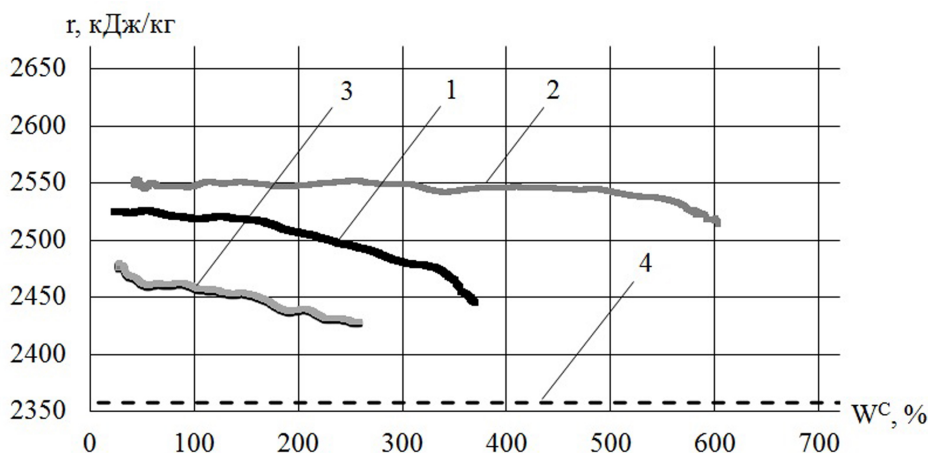


Рис. 2. Зависимость удельной теплоты испарения воды из тканей свеклы (1), лимона (2) и композиции тканей свекла-лимон 3:1 (3) от их влажности во время конвективно-кондуктивной сушки при 60 °С, скорости продувки воздуха 0,4 см/с, его влагосодержании 6,5 г/кг сух. (4 – теплота парообразования чистой воды).

Из результатов исследования (рис. 2) видим, что, при наличии значительного превышения теплоты испарения воды из всех рассмотренных растительных тканей над теплотой парообразования чистой воды уже на начальных этапах сушки, затраты теплоты на обезвоживание свекольно-лимонной композиции приблизительно на 4...5% меньше, чем затраты на обезвоживание тканей свеклы и лимона по отдельности. Т.е., в данном случае, простое смешивание разнородных растительных тканей перед сушкой не привело к усреднению затрат теплоты на испарение, как можно было бы ожидать, но вызвало синергетический эффект. Смешивание измельченных тканей сахаросодержащей свеклы и богатого на кислоты лимона должно приводить к некоторым химическим реакциям и изменениям в тканях. В данном случае эти изменения, очевидно, привели к уменьшению водоудерживающей способности растительных тканей в смеси и, как следствие, к уменьшению удельной теплоты испарения воды из них.

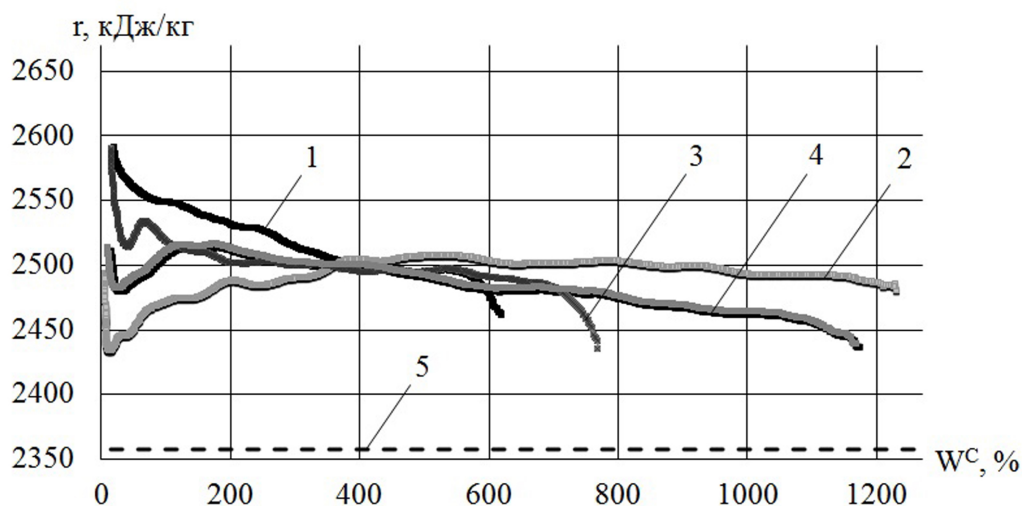


Рис. 3. Зависимость удельной теплоты испарения воды из тканей свеклы (1), помидора (2) и композиции свекла-помидор 3:1 (3) и 1:3 (4) от их влажности во время конвективно-кондуктивной сушки при 60 °С, скорости продувки воздуха 0,8 см/с, его влагосодержании 5 г/кг сух. (5 – теплота парообразования чистой воды).

Сравнительное исследование затрат теплоты на испарение воды из тканей свеклы и помидора и их композиций (рис. 3) показало, что значения удельной теплоты испарения воды из композиций тканей находятся между значениями удельной теплоты испарения воды из тканей свеклы и помидора по отдельности. Т.е., при обезвоживании композиций данных растительных тканей произошло простое сложение затрат теплоты на испарение воды из отдельных компонентов композиции в соответствии с правилом аддитивности. Общего уменьшения затрат теплоты на испарение, как при обезвоживании свекольно-лимонной композиции здесь получить не удалось, но удалось достичь эффекта максимального сохранения цвета и свеклы, и помидора после сушки композиций. Их цвет даже усилился и стал более ярким. Можно допустить, что химические изменения, которые произошли в растительных тканях при смешении, были достаточными для возникновения условий сохранения бетанина свеклы и ликопина помидора во время сушки, но явно недостаточными для изменения их водоудерживающей способности. Некоторый провал на зависимостях (рис. 3), наблюдаемый в конце сушки образцов, содержащих ткани помидора, мы связали с накладкой на эндотермический процесс испарения воды экзотермического эффекта от образования нерастворимых конгломератов коагулированный белок-сахара в измельченных тканях помидора при достижении ими 60 °С – процесса, широко применяемого при купажировании соков.

Таким образом, в заключении следует отметить, что химические вещества растительных тканей оказывают характерное, специфическое влияние на энергетику и

кинетику их обезвоживания. Растворимые вещества, удерживающие воду в своих гидратных оболочках, – на начальных этапах сушки, нерастворимые, удерживающие воду силами осмоса и адсорбции, – в ее конце. Смешение различных по химическому составу растительных тканей может привести как к усреднению энергозатрат на их обезвоживание в соответствии с правилом аддитивности, так и к существенному отклонению от этого правила из-за произошедших при смешении химических реакций.

Список литературы

1. *Давыдова Е. О.* Воздействие низких температур на состояние свекловичной ткани и ее основных компонентов при хранении сахарной свеклы. Дис. ... канд. техн. наук. Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 1992. 172 с.
2. *Гришин М.А., Погужих Н.И., Потапов В.А.* Эффект динамического структурирования влаги в процессе сушки // Промышленная теплотехника. 2001. Т. 23, № 4-5. С. 100-105.
3. *Снежкін Ю.Ф., Михайлик В.А., Дмитренко Н.В.* Динаміка зміни стану води в паренхімних тканинах рослин при сушінні // Промышленная теплотехника. 2011. Т.33, №2. С. 35-40.
4. *Михайлик В.А., Дмитренко Н.В.* Исследование состояния воды в молодых побегах тополя, ивы и ольхи в процессе сушки // Труды IV междунар. науч.-практ. конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии. СЭТТ-2011». Иваново: ИГХТУ, 2011. Т. 2. С. 270–273.
5. *Снежкін Ю.Ф., Декуша Л.В., Дубовікова Н.С., Грищенко Т.Г., Воробйов Л.Й., Боряк Л.А.* Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів. Патент України № 84075. Кл. МПК G01 N25/26, N25/28. 15.12.2006.
6. *Михайлик В.А.* Калориметрические исследования сахаров и сахаросодержащих материалов // Промышленная теплотехника. 1998. Т. 20, № 1. С. 25-31.
7. *Грабовська О.В., Парняков О.С., Михайлик В.А.* Дослідження стану води в крохмальних суспензіях та клейстерах // Наукові праці ОНАХТ. 2007. Вип. 31, т.1. С. 76-79.
8. *Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Гетманюк К.М., Самойленко О.П.* Спосіб одержання буряково-лимонного антиоксидантного барвника. Патент України № 102358. Кл. МПК A23 L1/27, A23 L1/212, C09 B61/00. 11.03.2013.

УДК 66.047

НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ NANOTECHNOLOGY INNOVATION IN THE DRYING PROCESS

Олег Григорьевич Бурдо, Валентина Николаевна Бандура, Игорь Иванович Яровой
Oleg G. Burdo, Valentina N. Bandura, Igor I. Jarovoj

Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса
Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine, Odessa
(e-mail: terma_onaft@rambler.ru)

Аннотация: В работе рассмотрены проблемы моделирования процессов сушки при электромагнитном подводе энергии. Анализируются энергетические балансы, показаны возможности адресной доставки энергии к элементам сырья. Учитываются бародиффузионные процессы переноса влаги из объема продукта. Рассматриваются режимы ламинарной и турбулентной бародиффузии при сушке. Приведены результаты экспериментального моделирования сушки в электромагнитном поле.

Annotation: Problems of drying processes modeling during electromagnetic energy supply are addressed. Energy balances are analyzing, possibilities of address energy delivery to the raw

material elements are shown. Processes of barodiffusion moisture transfer from product scope are considered. Laminar and turbulent regimes of barodiffusion during drying are studied. The results of experimental drying simulation in electromagnetic field are presented.

Ключевые слова: Сушка, энергетические балансы, электромагнитный подвод энергии, бародиффузия.

Keywords: Drying, energy balances, the electromagnetic energy supply, barodiffusion.

Введение. В энергетическом балансе экономики агропромышленный сектор занимает лидирующие позиции при крайне низкой эффективности использования ресурсов. Наиболее энергоемкими в пищевой и перерабатывающей индустрии являются технологии сушки. Используются в основном конвективные способы сушки [1]. Именно сушка в значительной степени определяет и качество готового продукта, и затраты на расходы энергии.

Вместе с тем, традиционные технологии конвективной сушки столкнулись с серьезными противоречиями. Задача достижения высоких значений коэффициентов массопереноса решается путем увеличения скорости (расхода) сушильного агента. Однако повышение расхода приводит к пропорциональному росту потерь теплоты в окружающую среду. Именно с отработавшим сушильным агентом в окружающую среду теряется 25% энергии топлива [2].

Удаление влаги – одна из основных задач в пищевых технологиях. Применяются два принципа: выпаривание и сушка. Казалось бы, у этих процессов одинаковые задачи - перевести в пар влагу. Но затраты энергии на удаление единицы влаги оказываются существенно разными. Если энергетический КПД самого несовершенного процесса выпарки 85%, то лучшие сушильные технологии не превышают 40% .

Причины в том, что в конвективных сушилках задача достижения высоких значений коэффициентов массопереноса решается путем увеличения скорости (расхода) сушильного агента. Однако повышение расхода приводит к пропорциональному росту потерь теплоты в окружающую среду. Эти противоречия не имеют практического решения, и резервы энергоэффективности в конвективных сушилках исчерпаны [2].

Пути решения научно-технических противоречий при сушке. Представляется, что следует искать новые принципы организации теплопередачи. Классификация инновационных подходов включает два направления: градиентные и безградиентные. В основе новых подходов лежат следующие гипотезы.

Гипотеза 1. Современные технические средства (высокоэффективные теплопроводы – тепловые трубы и термосифоны (ТС)) позволяют организовать адресную доставку энергии к поверхности сырья во всем объеме и воздействовать на пограничный слой вязкого и дисперсного продукта самим теплопередающим модулем.

Комплексные исследования таких систем проведены в работах [3]. Конструкции ТС, их автономность позволяют обеспечивать равномерный подвод теплоты к движущемуся слою продукта за счет соотношения площадей теплопередачи зон испарения и конденсации.

Гипотеза 2. Использование электромагнитных источников энергии позволит организовать адресную доставку энергии непосредственно к влаге в продукте, что может инициировать мощный бародиффузионный поток влаги из твердой фазы продукта.

Если в традиционных схемах градиенты температур и влагосодержаний не совпадают, то при объемном, селективном электромагнитном подводе энергии максимальные значения температур и влагосодержаний находятся в глубине продукта. Именно этот фактор позволяет в условиях электромагнитного поля инициировать из капиллярной структуры мощный гидродинамический поток, механизм которого изложен в [4].

Ламинарная бародиффузия доставляет влагу на поверхность продукта, а турбулентная – непосредственно в объем воздушной среды [4]. Механизм комбинированного нано- и макропереноса влаги из волокнистой структуры в воздух поясняется электродиффузионной моделью (рис.1).

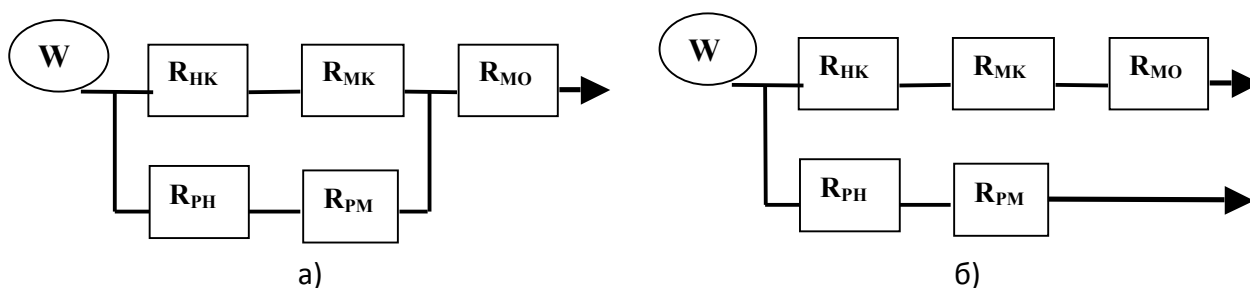


Рис.1. Схемы тепломассопереноса в режиме ламинарной (а) и турбулентной (б) бародиффузии.

Последовательная цепочка диффузионных сопротивлений состоит из суммы: $\Sigma R = R_{НК} + R_{МК} + R_{МО}$. Процесс конвективной массоотдачи от поверхности продукта в поток воздуха имеет наименьшее диффузионное сопротивление ($R_{МО}$). Влага перемещается по микрокапиллярам к поверхности продукта, преодолевая диффузионное сопротивление ($R_{МК}$). Это конвективная диффузия в стесненных условиях (поток j_1). Диффузионное сопротивление нанокapилляров обозначено ($R_{НК}$). Это наибольшее диффузионное сопротивление, поскольку, стесненность диффузионных процессов в нанокapиллярах максимальна.

При воздействии импульсного электромагнитного поля инициируется поток влаги из капилляров (j_2). Это и есть бародиффузия, которая определяется растущим в капиллярах давлением P_k (рис.1). Отдельные капилляры, где достигнуты условия для генерации паровой фазы, начинают периодически выбрасывать в воздух жидкость из капилляров.

Специфичный бародиффузионный поток в виде парожидкостной смеси и в виде тумана фиксировался авторами визуально в процессе экспериментального моделирования.

Специфично выглядят и линии сушки. Если в традиционных схемах сушки выражены периоды постоянной и падающей скоростей, то в инновационных сушилках микроволновая энергии обеспечивает постоянную подпитку влагой поверхность продукта за счет ламинарной бародиффузии (рис.1,а). Если реализуется режим турбулентной бародиффузии, то влага в виде тумана выбрасывается непосредственно в поток воздуха (рис.1,б). Парадоксально, но процесс обезвоживания протекает с нарастающей скоростью обезвоживания. Такие картины получены экспериментально [4]. Наиболее низкие значения скорости сушки в первый период работы объясняется тем, что поверхностная влага блокирует процесс бародиффузии, которая начинает развиваться по мере удаления части поверхностной влаги.

Важную роль играет и вид самой электромагнитной энергии. В традиционной конвективной схеме сушильный агент отдает энергию сначала поверхностной влаге, затем сухой части продукта, которая передает энергию влаги в капиллярах. Так протекает традиционная конвективная сушка, результатом которой считается поток влажного пара. В ИК – сушке капиллярная влага удаляется частично непосредственно электромагнитной энергией, а частично так, как и конвективной сушке.

В случае микроволновой (МВ) сушки из капилляров за счет бародиффузии может наблюдаться поток смеси влажного пара и капель воды. Состав такой смеси и характеризует удельные затраты энергии на процесс обезвоживания. Чем больше доля капель – тем меньше затрат энергии.

В конвективной сушилке конверсия энергии выглядит так. Преобразование энергии в схеме «топливо – водяной пар» проходит при КПД 50%, а при КПД сушки в 40% полезная энергия составляет 8 МДж. Это эквивалентно 3 кг удаленной из продукта влаги. В предлагаемой сушилке с электромагнитным подводом энергии полученный результат (приведенный к первичному ресурсу, топливу) вдвое выше (табл.1), а технически возможный уровень составляет 50 кг влаги.

Таблица 1.

Схема	Энергия 1 кг топлива	Полезная энергия	Количество удаленной влаги
Традиционная	40 МДж	8 МДж	3 кг
Микроволновая	40 МДж	12-16 МДж	6 кг

В ходе серии экспериментов изучались зависимости скорости обезвоживания сырья от величины загрузки продукта в камере микроволнового подвода энергии и от мощности излучения магнетрона.

В качестве растительного сырья исследовалось зерно пшеницы, размещенное плотным слоем, на подвесе весов в центре микроволновой камеры. Экспериментальная часть исследований включала серию опытов с различными нагрузками (весом зерна) и различной мощностью ИЭМП излучения подводимого к камере. Результаты измерения веса и температуры слоя фиксировались программно – аппаратным комплексом стенда [5]. В непрерывном режиме компьютер обрабатывал информацию, которая поступала с весов и от термодатчиков, и выводил на монитор линии трендов массы продукта, линии сушки и скорости сушки продукта, температуры продукта, воздуха в камере, сухого и влажного термометров на выходе воздуха из камеры. В ходе серии экспериментов изучались зависимости скорости обезвоживания сырья от величины загрузки в камере микроволнового нагрева и от мощности излучения.

Получены линии сушки при различных величинах загрузки камеры и максимальной мощности излучателя [5]. При различной, но постоянной в каждой серии опытов мощности микроволнового излучения, изменялась удельная масса зерна в пределах $G=1,32-5,26$ кг/м². Данные о влагосодержании зерна регистрировались по показаниям электронных весов по балансу массы. По полученным в результате серии данным определены зависимости изменения влагосодержания зерна при неизменной мощности микроволнового излучения. При меньших мощностях динамика процесса пропорционально снижается.

Анализируя полученные зависимости можно определить, что на линиях сушки присутствует начальный участок соответствующий прогреву слоя материала, величина которого изменяется от 0,5 до 2,5 мин. длительность участка зависит от величины загрузки. После участка прогрева влагосодержание зернового слоя изменяется практически линейно. Время сушки для наибольшей загрузки составило около 7 минут.

Не менее показательными в плане демонстрации потенциала микроволновых технологий нагрева являются термограммы процесса нагрева. В ходе каждого из серии проведенных экспериментов, одновременно с изменением массы (лагоудалением) регистрировалась температура зернового слоя. По полученным данным построены термограммы зернового слоя в процессе его обработки.

Полученные температурные кривые отражают динамику процесса нагрева слоя характерную для всех теплообменных процессов. Максимальная температура слоя для наибольшей загрузки $G = 5,26$ кг/м² составила 55⁰С, параметр достиг данного значения через 2,5 мин. после начала нагрева при полной мощности магнетрона. С уменьшением загрузки микроволновой камеры скорость нагрева слоя увеличивается и при нагрузке в $G=1,32$ кг/м² температура 80⁰С достигается уже на 1-й минуте а при времени 1,5 мин. температура слоя превышает значение в 100⁰С.

По результатам экспериментов построены зависимости скорости сушки от мощности микроволнового излучения в камере нагрева. Мощность изменялась штатными средствами, магнетрон работал в импульсном режиме. Градации шкалы изменения мощности на графике соответствуют значениям потребляемой магнетроном электрической мощности (рис.2).

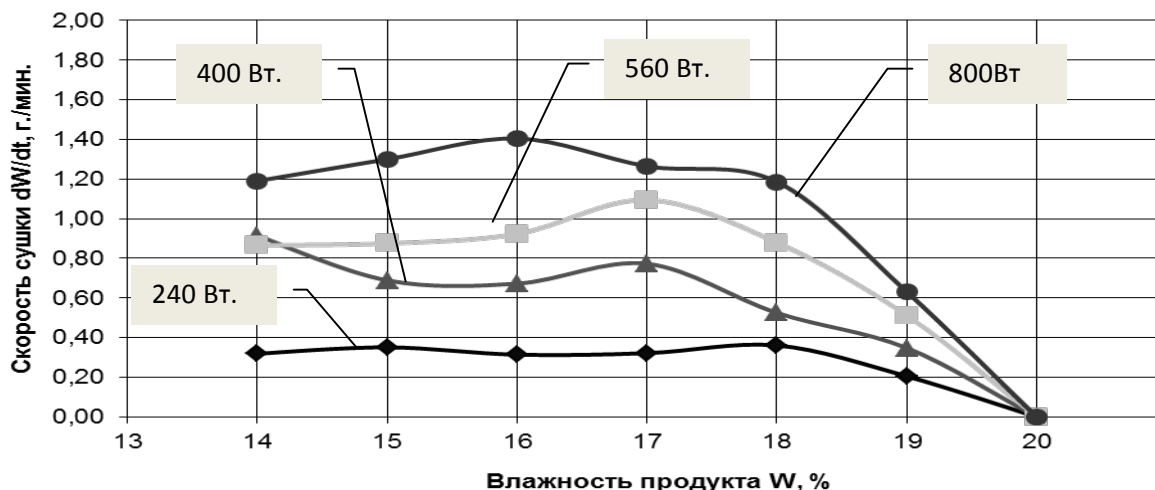
Линии скорости сушки при нагрузке $G=5,26 \text{ кг./м}^2$ 

Рис.2. Линии скорости сушки пшеницы в микроволновом поле.

Полученные зависимости отображают динамику процесса обезвоживания и позволяют оценить изменения скорости сушки. Очевидно, что снижение скорости не наступает до окончания эксперимента. Также прослеживается прямая зависимость между скоростью сушки и мощностью излучения. Более того, в режиме при $N = 400\text{Вт}$ четко наблюдается постоянное повышение скорости сушки. Эти эксперименты подтверждают выдвинутые гипотезы и механизмы обезвоживания (рис.2).

Полученные в результате экспериментального моделирования данные позволили оценить целесообразность построения экспериментальной многофункциональной установки на основе каскада микроволновых излучателей [2].

Микроволновый метод нагрева основан на воздействии на обезвоживаемый продукт интенсивного электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ). Источником энергии СВЧ генераторов является только электроэнергия, что обеспечивает их исключительную экологическую чистоту. Применение импульсного электромагнитного поля (ИЭМП) основано на сложном физическом эффекте, возникающем при воздействии СВЧ излучения на молекулы воды (в т.ч. и влаги связанной в материале), который для краткости называют «молекулярным трением». В результате такого взаимодействия влага в материале поглощает тепловую энергию, в результате которого частички материала нагреваются «изнутри». Образуется паровая фаза, в результате чего повышается давление, возникает градиент давлений, и как следствие движение влаги к поверхности частиц, где она и удаляется.

Выводы. Инновационная ИЭМП - сушка при снижении влажности сырья характеризуется тем, что процесс не замедляется и на заключительных этапах сушки, ИЭМП - технологии по эффективности и производительности в разы превосходят традиционные конвективные технологии. Микроволновая сушка трав, чая, специй, грибов, фруктов, круп, овощей, рыбы и мяса, характеризуется высокой эффективностью, малым временем обработки и относительно низкой температурой процесса, что применительно к пищевым продуктам обуславливает очень высокую сохранность полезных веществ и витаминов.

Список литературы

1. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244с.
2. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368с.
3. Бурдо О.Г., Смирнов Г.Ф., Терзиев С.Г., Зыков А.В. Инновационные теплотехнологии АПК на основе тепловых труб – Одесса, «ИНВАЦ», 2014 – 376с.
4. Бурдо О.Г., Пищевые нанотехнологии – Херсон, 2013 – 294с.
5. 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.

УДК 66.047

**РАСЧЕТ КИНЕТИКИ СУШКИ ПОРИСТЫХ ТЕЛ С УЧЕТОМ
НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПАРАМЕТРОВ НА УГЛУБЛЯЮЩЕЙСЯ
ГРАНИЦЕ ИСПАРЕНИЯ**
**CALCULATION OF THE KINETICS OF POROUS BODIES DRYING WITH
ACCOUNT OF NONSTATIONARITY OF THE PARAMETERS ON THE DEEPENING
EVAPORATION BOUNDARY**

Пётр Васильевич Акулич
Piotr V. Akulich

*Институт тепло- и массообмена имени А.В.Лыкова НАН Беларуси, Беларусь, Минск,
A.V. Luikov Heat and Mass transfer Institute of the National academy of sciences of Belarus,
Belarus, Minsk
(e-mail: akul@hmti.ac.by)*

Аннотация: Предложен приближенный метод расчета тепломассопереноса в пористых телах при углублении границы испарения с учетом переменной температуры и давления пара на ней. Установлены зависимости углубления границы испарения и кинетики процесса сушки от параметров пористой среды и внешнего теплового воздействия.

Abstract: An approximate method is suggested for calculating heat and mass transfer in porous bodies with deepening of the evaporation boundary with due account of the variability of vapor temperature and pressure on it. The dependences of evaporation boundary deepening and kinetics of drying on the parameters of porous medium and external thermal effect have been found.

Ключевые слова: кинетика сушки, тепломассоперенос, сушка

Keywords: the drying kinetics, heat and mass transfer, drying

Процесс тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах нередко сопровождается углублением зоны испарения. Это происходит, если отвод пара настолько интенсивен, что капиллярный механизм переноса не обеспечивает подпитку жидкостью осушаемых пор. Математическое описание такого процесса основывается на задаче типа Стефана. Следует отметить, что в общем случае испарение происходит не только на движущемся фронте, но и в некоторой зоне. Данное явление обусловлено, в частности, различными формами связи влаги с материалом.

Моделированию и исследованию процессов тепломассопереноса с подвижной зоной фазового превращения посвящено значительное количество работ [1–12]. В [1] получена система уравнений взаимосвязанного тепломассопереноса. Для рассматриваемого процесса записываются общие уравнения для сухой и влажной зон, а критерий фазового превращения представляется в виде разрывной функции. При этом следует иметь в виду, что критерий фазового превращения зависит от параметров процесса. Данный подход достаточно сложен в реализации. Наиболее простые модели, как правило, не учитывают фильтрации пара в сухой зоне [3–7].

В данной работе приводится приближенный метод расчета кинетики сушки капиллярно-пористых тел в предположении углубления зоны испарения. Полагается, что к границе испарения теплота подводится за счет теплопроводности сухого слоя материала и расходуется на испарение влаги. Внутри капиллярно-пористого тела возникает избыточное давление пара, вызывающее его фильтрацию от границы испарения к поверхности.

В результате скорость сушки определяется термическим и фильтрационным сопротивлениями, а температура на границе испарения является функцией процесса.

Рассмотрим плоское капиллярно-пористое тело, на поверхность которого воздействует тепловой поток (рис. 1). Пренебрегается градиентами переноса во влажной зоне тела. Температура и давление на границе испарения связаны как параметры насыщенного пара уравнением Клапейрона–Клаузиуса. В сухой зоне температура тела линейно зависит от координаты. С учетом принятых допущений уравнение для скорости углубления границы испарения при граничном условии III рода на поверхности $q = \alpha(T_\infty - T_{пов})$ можно записать

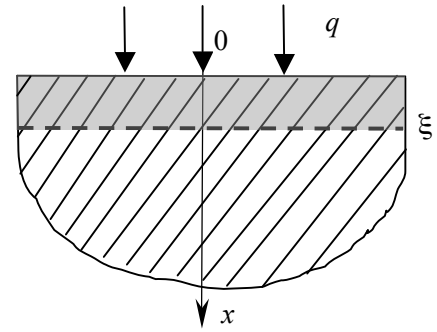


Рис. 1. К постановке задачи для плоского тела

$$\left[c_c \rho_c \frac{T_{пов} - T_\xi}{2} + (c_c \rho_c + c_{вл} u_V)(T_\xi - T_0) + u_V r \right] \frac{d\xi}{dt} = \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\xi}{\lambda} \right)^{-1} (T_\infty - T_\xi), \quad (1)$$

где c_c , $c_{вл}$ – теплоемкость сухого тела, влаги (воды), Дж/(кг·К); r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; t – время, с; $T_{пов}$, T_0 , T_ξ , T_∞ – соответственно температура поверхности тела, начальная температура тела, на границе испарения, окружающей среды, К; u_V – объемное влагосодержание тела, кг/м³; α , β – коэффициенты теплообмена и массообмена, Вт/(м²·К) и кг/(м²·с·Па); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ξ – текущая координата границы испарения, м; ρ_c – плотность сухого тела, кг/м³.

Учитывая, что теплота от поверхности материала передается в глубь тела теплопроводностью, следует $\alpha(T_\infty - T_{пов}) = (\lambda/\xi)(T_{пов} - T_\xi)$. Тогда после несложных преобразований формула (1) примет вид

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{T_\infty - T_\xi}{\left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\xi}{\lambda} \right) \left(\frac{a}{2} \frac{\alpha \xi (T_\infty - T_\xi)}{\alpha \xi + \lambda} + b(T_\xi - T_0) + u_V r \right)}, \quad (2)$$

где $a = c_c \rho_c$, $b = c_c \rho_c + c_{вл} u_V$.

Рассмотрим случай, когда можно допустить выполнение условия $T_\xi = \text{const}$. Тогда, проинтегрировав уравнение (2) при начальном условии $t = 0$, $\xi = 0$, имеем

$$t = \frac{b(T_\infty - T_0) + r u_V}{\alpha(T_\infty - T_\xi)} \xi + \left[\frac{a}{4\lambda} + \frac{b(T_\infty - T_0) + r u_V}{2\lambda(T_\infty - T_\xi)} \right] \xi^2. \quad (3)$$

По полученному выражению можно легко определить время углубления зоны испарения, т.е. время сушки.

Скорость фильтрации пара в сухой зоне от границы испарения к поверхности запишем

$$v_\Pi = \frac{k_\Pi}{\mu_\Pi} \frac{p_\xi - p_{пов}}{\xi}, \quad (4)$$

где k_Π – коэффициент проницаемости, м²; $p_{пов}$, p_ξ , p_∞ – соответственно давление пара на поверхности тела, границе испарения, окружающей среде, Па; v_Π – скорость пара, м/с; μ_Π – коэффициент динамической вязкости пара, Па·с.

Тогда для скорости границы испарения можно записать

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{\beta D}{u_V (D + \beta \xi)} (p_\xi - p_\infty), \quad (5)$$

где $D = k_{\text{п}}\rho_{\text{п}}/\mu_{\text{п}}$; $\rho_{\text{п}}$ – плотность пара, кг/м^3 .

Зависимость давления пара от температуры на границе испарения определяется уравнением Клапейрона–Клаузиуса, которое при условии $r(T_{\xi}) = \text{const}$ имеет вид

$$p_{\xi} = p^* \exp(-T^*/T_{\xi}), \quad (6)$$

где $p^* = 6.4072 \cdot 10^{10}$ Па, $T^* = 4996$ К.

Таким образом, имеем три уравнения (2), (5) и (6) с тремя неизвестными p_{ξ} , T_{ξ} и ξ . Из данной системы уравнений можно определить температуру T_{ξ} на границе испарения в зависимости от ее координаты ξ . Для этого приравняем правые части уравнений (2), (5) и, подставив (6), после преобразований запишем

$$T_{\xi} = -T^* \ln^{-1} \left\{ \frac{T_{\infty} - T_{\xi}}{Ap^*B [C\alpha\xi(T_{\infty} - T_{\xi})/(\alpha\xi + \lambda) + b(T_{\xi} - T_0) + ru_V]} + \frac{p_{\infty}}{p^*} \right\}, \quad (7)$$

где $A = \beta D / [u_V(D + \beta\xi)]$, $B = 1/\alpha + \xi/\lambda$, $C = a/2$.

Трансцендентное уравнение (7) представлено в виде $T_{\xi} = \phi(T_{\xi})$, которое будем решать методом последовательных приближений. Достаточные условия сходимости последовательности итераций к корню уравнения следующие: в некоторой окрестности корня функция $\phi(T_{\xi})$ непрерывна и удовлетворяет условию «сжатия» $|\phi'(T_{\xi})| < 1$. Можно показать, что в исследуемой области параметров условие $|\phi'(T_{\xi})| < 1$ выполняется.

Для капиллярно-пористых тел цилиндрической формы уравнение для скорости углубления границы испарения имеет вид

$$\frac{d\xi}{dt} = - \frac{T_{\infty} - T_{\xi}}{\frac{\xi(T_{\infty} - T_{\xi})}{a} \ln \frac{R}{\xi} + \xi \left(\frac{1}{\alpha R} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{R}{\xi} \right) [b(T_{\xi} - T_0) + u_V r]}, \quad (8)$$

где $a = c_c \rho_c / \lambda$; $b = c_c \rho_c + c_{\text{вл}} u_V$; R – радиус цилиндрического тела, м.

Уравнения (2) и (7) решались при следующих теплофизических параметрах пористой среды: $\rho_c = 900$ кг/м^3 ; $u_V = 500$ кг вл/м^3 ; $\beta = 3 \cdot 10^{-7}$ $\text{кг/(м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па)}$; $c_c = 1,2$ $\text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $c_{\text{вл}} = 4,19$ $\text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $r = 2250$ кДж/кг ; $T_0 = 283$ К; $\mu_{\text{п}} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ $\text{Па} \cdot \text{с}$; $\rho_{\text{п}} = 0,6$ кг/м^3 ; $T_{\infty} = 473$ К; $p_{\infty} = 10$ кПа.

В результате численного решения получены зависимости влияния проницаемости плоской пористой среды, теплопроводности, коэффициента теплообмена, температуры среды на скорость углубления границы испарения и температуру на ней (рис. 2). Установлено, что с уменьшением пористости среды скорость углубления зоны испарения замедляется. Это обусловлено повышением сопротивления движению пара в сухой зоне. Если при $k_{\text{п}} = 10^{-15}$ м^2 и прочих равных условиях температура пара на границе испарения с ее углублением возрастает, то при $k_{\text{п}} = 10^{-11}$ и 10^{-13} м^2 – несколько снижается. Следует отметить, что при низкой пористости среды возможно значительное возрастание температуры насыщения пара (рис. 2, б, кривая 3), вызываемое повышением его давления. Увеличение теплопроводности среды повышает тепловой поток к границе испарения и вызывает ускорение ее углубления. При этом температура становится выше.

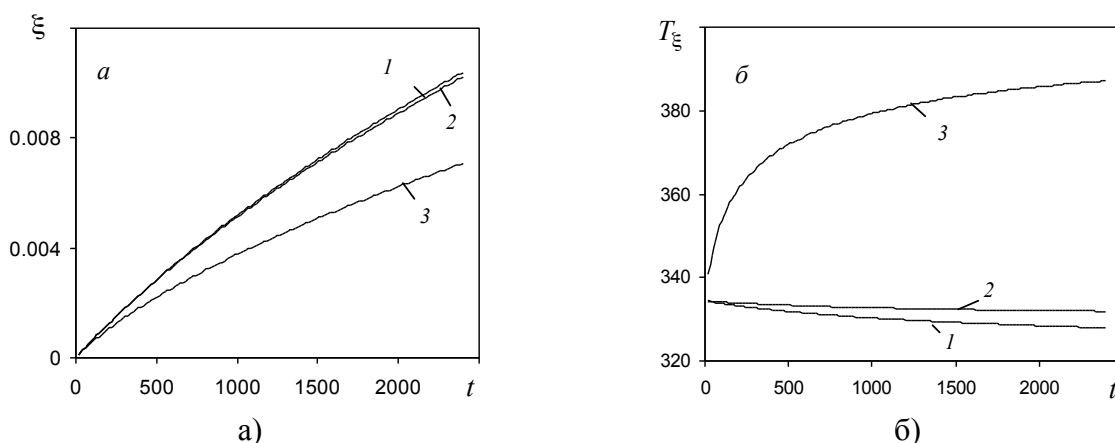


Рис. 2. Зависимости координаты (а) и температуры (б) на границе испарения от времени:
 $\lambda = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}), \alpha = 60 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$: 1 – $k_n = 10^{-11}$; 2 – 10^{-13} ; 3 – 10^{-15}

Интенсификация внешнего теплообмена ускоряет перемещение зоны испарения. Однако, как и следовало ожидать, с ростом коэффициента теплообмена ее скорость замедляется вследствие возрастания влияния термического и фильтрационного сопротивлений сухого слоя. Температура на границе испарения возрастает. Повышение температуры окружающей среды приводит как к интенсификации массопереноса, так и вызывает рост температуры на испаряющейся поверхности. Следует отметить, что данная модель учитывает влияние давления пара и температуры в окружающей среде и может быть использована для оценки воздействий внешних переменных условий на интенсивность внутреннего теплообмена.

На основе анализа проведенных исследований можно заключить, что теплофизические параметры пористой среды и режим теплообмена оказывают существенное влияние на значение температуры на углубляющейся поверхности испарения и скорость ее перемещения, что следует учитывать в расчетах процессов теплообмена. Необходимо подчеркнуть, что в большинстве известных моделей температура на границе испарения полагается постоянной величиной и равной температуре мокрого термометра.

Список литературы

1. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Хейфец Л. И., Неймарк А. В. Многофазные процессы в пористых средах. М.: Химия, 1982. 320 с.
3. Кумер И. Дж., Гупта Л. Н. Приближенное решение обобщенной задачи Стефана для пористой среды с переменными теплофизическими свойствами // Теплообмен-V: Матер. V Всесоюз. конф. по теплообмену. Минск, 1976. Т. 5. С. 187.
4. Шубин Г. С. Расчет процессов теплообмена, сопровождаемых движением границы фазовых превращений // Теплообмен-V: Матер. V Всесоюз. конф. по теплообмену. Минск, 1976. Т. 5. С. 207.
5. Рубинштейн Л. И. Проблема Стефана. Рига: Звайгзне, 1967. 457 с.
6. Кафаров В. В., Дорохов И. Н. Моделирование и оптимизация процессов сушки // Итоги науки и техники: Процессы и аппараты химической технологии. М., 1987. Т. 15. С. 3.
7. Фролов В. Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: Химия, 1987. 208 с.
8. Бабенко В. Е., Буевич Ю. А., Шепшук Н. М. Квазистационарный режим сушки сферической частицы // ТОХТ. 1975. № 2. С. 247.
9. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: КолосС, 2010. 478 с.
10. Акулич П. В., Куц П. С., Самсонюк В. К., Акулич А. В. Расчет процессов сушки, сопровождаемых перемещением зоны испарения // Тепло- и массоперенос: модели, теоретические и экспериментальные исследования: Сб. науч. тр. Минск, 1993. С. 26.

11. Акулич П. В. Термогидродинамические процессы в технике сушки. Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2002. 268 с.

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

УДК 674.047.3

О РЕВЕРСИВНОЙ СУШКЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ON REVERSIBLE DRYING OF LONG-MEASURING SHEET MATERIALS

Вадим Евгеньевич Мизонов*, Николай Николаевич Елин**,
Андрей Алексеевич Котков**
Vadim E. Mizonov*, Nicolay N. Yelin**, Andrey A. Kotkov**

* *Ивановский государственный энергетический университет, Россия, Иваново*

* *Ivanovo State Power Engineering University, Russia, Ivanovo*
(e-mail: mizonov46@mail.ru)

** *Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново*

** *Ivanovo State Polytechnic University, Russia, Ivanovo*
(e-mail: yelinnn@mail.ru)

Аннотация: Предложена нелинейная ячеечная математическая модель кинетики сушки длинномерного листового материала параллельным потоком газа. Показано, что реверс подачи газа в рационально подобранные моменты времени позволяет существенно снизить неравномерность распределения влаги в материале в процессе сушки.

Abstract: A non-linear cell mathematical model of drying kinetics of long-measuring sheet material by parallel gas flow is proposed. It is shown that the reverse of gas supply at rationally chosen moments of time allows considerable decrease of the non-homogeneity of moisture content distribution during drying process.

Ключевые слова: листовой пористый материал, влагосодержание, сушка, ячеечная модель, реверс подачи газа.

Keywords: sheet long-measuring material, moisture content, drying, cell model, reverse of gas supply.

Процессы сушки длинномерных листовых материалов встречаются во многих отраслях промышленности. Их характерной особенностью является значительная неравномерность температуры и влагосодержания по длине листов, возникающая при их взаимодействии с движущимся параллельно их поверхности потоком сушильного агента. Для большинства материалов эта неравномерность носит нежелательный характер, так как приводит к короблению изделий, появлению трещин и других дефектов, ухудшающих их механические характеристики. Одним из возможных направлений снижения неравномерности является реверсивная подача сушильного агента, когда направление его движения периодически меняется на противоположное. Однако максимальное снижение неравномерности существенно зависит от рационально подобранных моментов реверса, поиск которых чисто эмпирическим путем трудоемок и требует оснастки сушильных камер специальным измерительным оборудованием. В связи с этим целесообразно построить математическую модель процесса, которая позволила бы оценить кинетику реверсивной сушки. В основу ее построения положено ячеечное представление процесса, хорошо зарекомендовавшее себя при моделировании различных явлений переноса [1,2].

Расчетная схема процесса показана на рис.1. В качестве объекта моделирования выбирается периодический элемент укладки листов: половина толщины листа и половина ширины канала для прохода сушильного агента. В продольном направлении он разбит на n

ячеек малой длины Δy , в результате чего формируются две параллельных цепи ячеек: одна для материала, который в поперечном направлении считается термически тонким телом, и одна для прохода сушильного агента. Все теплофизические параметры состояния цепей представлены вектор-столбцами размером $n \times 1$. Состояние обеих цепей фиксируется в дискретные моменты времени $t_k = \Delta t \cdot (k - 1)$, где Δt – продолжительность, а k – номер временного перехода.

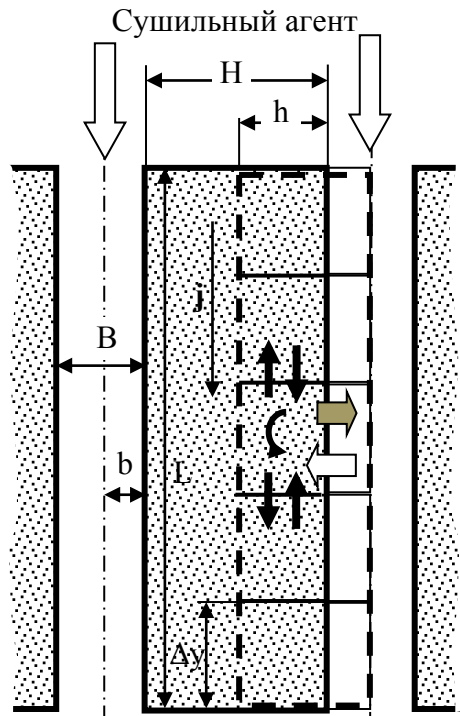


Рис. 1. Ячеечная схематизация процесса и направления потоков теплоты и влаги

Модель предполагает, что в течение каждого временного перехода последовательно протекают две стадии процесса. На первой стадии сходственные ячейки цепей обмениваются теплотой и влагой в соответствии с наличными в данный момент потенциалами переноса. Этот процесс описывается известными уравнениями тепло- и влагоотдачи. На второй стадии происходит продольный перенос. Перенос массы сушильного агента, а вместе с ней теплоты и влаги, между ячейками описывается переходной матрицей для газа [1]. При этом при прямом ходе сушильного агента в первую ячейку добавляется его масса, теплота и влага, вносимая с расходом сушильного агента, а при обратном они добавляются в последнюю ячейку. В материале изделия происходит продольный перенос теплоты и влаги путем теплопроводности и влагопроводности. Их миграция описывается матрицами теплопроводности и влагопроводности соответственно [2]. Полная система рекуррентных матрично-векторных равенств позволяет описать кинетику сушки по локальным теплофизическим параметрам материала и сушильного агента. Неравномерность распределения влагосодержания может быть оценена нормированной разностью максимального и минимального влагосодержания по длине листа.

Пример моделирования процесса показан на рис.2,а,б. Расчеты выполнены для листа древесины (осина) длиной 2м и толщиной 25мм с теплопроводностью сухого материала вдоль волокон $0,4 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$ и коэффициентом влагопроводности $3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ при его начальном влагосодержании $0,3 \text{ кг/кг}$. Скорость сушильного газа на входе составляла $1,5 \text{ м/с}$ при температуре 80°С и влагосодержании $0,005 \text{ кг/кг}$, коэффициент теплоотдачи $40 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К})$; коэффициент массоотдачи $0,01 \text{ с/м}$. Расчет заканчивался, когда среднее содержание влаги в материале достигало $0,01 \text{ кг/кг}$.

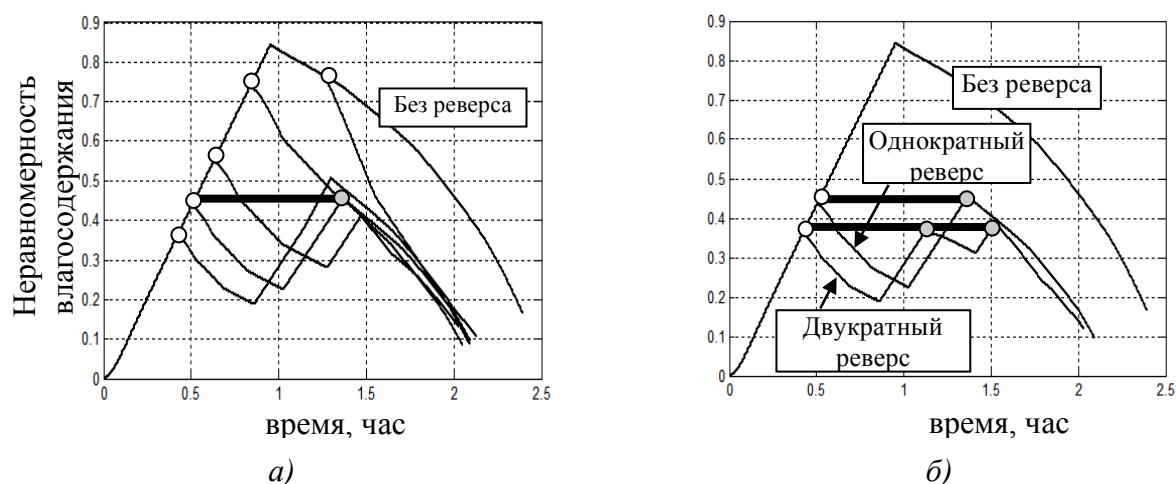


Рис. 2. Изменение неравномерности влагосодержания в процессе сушки при однократном реверсе сушильного агента в различные моменты времени (а) и при однократном и двукратном реверсе в оптимальные моменты времени (б)

На рис. 2,а показан пример того, как меняется неравномерность распределения содержания влаги при однократном реверсе в различные моменты времени (время переключения отмечено кружками). Максимальная неравномерность без реверса достигается через примерно 1 час после начала процесса. Реверс в более позднее время не меняет максимальной неравномерности, но увеличивает скорость ее снижения после включения реверса. Включение реверса в более ранние моменты постепенно снижает максимальную неравномерность, но появляется возможность такой ситуации, когда после включения реверса неравномерность сначала снижается, а потом снова начинает повышаться, причем может превысить неравномерность в момент включения реверса. Очевидно, что наилучшим вариантом будет тот, при котором оба пика неравномерности сравниваются (отмечено жирной горизонтальной линией). Наименьшая максимальная неравномерность достигается при реверсе через 0,5 час с начала процесса, когда максимальная неравномерность снижается почти в 2 раза, что явно находится за пределами возможной погрешности модели.

Рис. 2,б относится к двукратному реверсу подачи сушильного агента. Здесь рациональные моменты первого и второго переключения направления движения сушильного агента, как и выше, выбраны на основе совпадения первого, второго и третьего пика неравномерности. Эти наилучшие моменты времени составили 0,45 и 1,15 час. Переход от однократного реверса к двукратному снижает неравномерность меньше, чем переход от прямоточного режима к однократному реверсу. Здесь выигрыш составляет около 17%.

В виду разнообразия размеров и свойств высушиваемых материалов и организации процесса сушки невозможно выдать универсальные рекомендации по рациональным моментам времени реверса направления сушильного агента. Однако разработанная и описанная выше ячеечная модель процесса позволяет легко оценить эти моменты в каждом конкретном случае.

Список литературы

1. Mizonov V., Berthiaux H., Arlabosse P., Djerroud D. Application of the theory of Markov chains to model heat and mass transfer between stochastically moving particulate and gas flows // Granular Matter. 2008. V. 10. No 4. PP. 335-340.
2. Mizonov, V., Yelin, N., Sakharov, A. Theoretical study of the thermal state of building envelop in the neighborhood of embedded item // Applied Thermal Engineering. 2015. V.79. PP.149-152.

УДК 66.011

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПО КРИВЫМ КИНЕТИКИ
ПРОЦЕССОВ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
DETERMINATION OF THE KINETIC COEFFICIENTS FROM THE KINETIC CURVES
OF THE HYDROTHERMAL PROCESSES OF MATERIAL PROCESSING**

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

**Российский государственный аграрный университет РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,
Россия, Москва*

**Russian State Agrarian University - MAA named after K.A. Timiryazev, Russia, Moscow*

***Московский государственный университет дизайна и технологий, Россия, Москва*

***Moscow State University of Design and Technology, Russia, Moscow*

(E-mail: rudobashta@mail.ru, oхtрaxт@yandex.ru)

Аннотация: Изложен новый подход к определению коэффициентов массоотдачи и массопроводности процессов термовлажностной обработки материалов по кривым их кинетики. Проведён анализ кинетики экстракции технологических загрязнений из различных текстильных материалов, определены кинетические коэффициенты, которые могут использоваться в кинетических расчётах процессов термовлажностной обработки материалов в химической технологии их отделки.

Abstract: The new approach to the determination of mass transfer and mass conductivity coefficients of hydrothermal treatment of materials by its kinetic curves was described. The kinetics of extraction of technological impurities from different textile materials was analyzed, the kinetic coefficients were determined and can be used in the calculation of the kinetic processes of hydrothermal processing of materials in the chemical technology of its finish.

Ключевые слова: термовлажностная обработка, кинетика, коэффициенты массоотдачи и массопроводности, химическая технология отделки, текстильные материалы

Keywords: hydrothermal treatment, kinetics, mass transfer and mass conductivity coefficients, chemical finishing technology, textile materials

Расчёт кинетики процессов термовлажностной обработки не возможен без коэффициентов массоотдачи и массопроводности. Отсутствие данных по этим коэффициентам затрудняет кинетический расчет процессов. Однако, существуют сложности экспериментального определения этих коэффициентов [1].

В работе описывается новый подход и практическое использование методов определения коэффициента массоотдачи и концентрационной зависимости коэффициента массопроводности из кривой кинетики процесса (при этом в последнем случае не требуется отсутствие внешнего диффузионного сопротивления).

Предложенный авторами метод [2,3] реализуется следующим образом:

1. Из кривой кинетики в первом периоде по углу наклона кинетической кривой, построенной в координатах « $\tau - \bar{u}$ », определяется скорость процесса: $N = -(\frac{d\bar{u}}{d\tau})_1 = \text{const}$.

2. Записывается граничное условие массообмена для критической точки, при этом равновесная зависимость считается линейной и принимается $u_{п.кр} = \bar{u}_{кр}$ [2]

$$i_1 = NR_v \rho_0 = \beta_c^* (\bar{u}_{кр} - u_p), \quad (1)$$

Вычисляется из (1) модифицированный коэффициент массоотдачи β_c^*

$$\beta_c^* = \frac{NR_v \rho_0}{(\bar{u}_{кр} - u_p)}. \quad (2)$$

3. Находится истинный коэффициент массоотдачи $\beta_c = \beta_c^* \cdot A_p$.

Для определения зависимости $k = f(u)$ зональным методом используем решение дифференциального уравнения массопроводности для тела соответствующей формы, считая $\bar{u}_n, \bar{u}_k, k, \beta_c^*, u_p^*, R = \text{const}$, приняв за начало отсчета времени критическую точку и поместив начало координат в центр тела [1, известия]

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = k \Delta u, \quad 0 < x < R, \quad \tau > 0, \quad (3)$$

где Δ – оператор Лапласа.

Решение задачи (3) для среднеобъемного массосодержания в теле в регулярном режиме массообмена имеет вид [1]

$$\bar{E} = B_1 \exp\left(-\frac{\mu_1^2}{R^2} k \tau\right), \quad (4)$$

где B_1 и μ_1 – предэкспоненциальные множители и корни характеристических уравнений для первого члена решений задач, зависящие от формы тела и числа Bi_m [1].

Для нахождения зависимости $k = f(u)$ разбиваем весь диапазон изменения массосодержания распределяемого вещества от $u_n = \bar{u}_{кр}$ до \bar{u}_k (где \bar{u}_k – конечное массосодержание на опытной кривой кинетики) разбивается на n концентрационных зон, для каждой из которых находится значение коэффициента k . При этом для первой зоны используется решение (4). Для второй и последующих зон параметр B_1 необходимо заменить на $B_1^* = \gamma_i B_1$ (где γ_i – поправочный коэффициент), поскольку в них начальное распределение концентраций уже не является равномерным, а равно конечному распределению концентрации в предыдущей зоне [1].

В i -той концентрационной зоне $P_i = k_i \mu_{1,i}^2$. Этот множитель выражается из уравнения (4), при этом B_1 переобозначается на B_1^*

$$P_i = k_i \mu_{1,i}^2 = \frac{R^2}{\tau_i} \ln \frac{B_1^*}{\bar{E}_i}. \quad (5)$$

Записываются характеристические уравнения для решения (4) [1]. Первые корни в концентрационных зонах $\mu_{1,i}$ заменяются на выражения $\mu_{1,i} = \sqrt{P_i/k_i}$. Приводится выражение для пластины (аналогично можно записать выражения для тел другой формы)

$$\text{ctg}(\sqrt{P_i/k_i}) = \frac{\rho_0 \sqrt{P_i \cdot k_i}}{\beta_c^* \cdot R}. \quad (6)$$

Таким образом, имеется четыре выражения: (5), (6), $Bi_m = (\beta_c^* R)/(k \rho_0)$, $\mu_{1,i} = \sqrt{P_i/k_i}$, которые содержат 4 неизвестных: $B_{1,i}^*, P_i, \mu_{1,i}, k_i$, что позволяет вычислить их при условии, что известны остальные величины, входящие в эти зависимости. Указанные зависимости алгебраически не разрешимы относительно искомым неизвестных, которые, могут быть найдены как корни уравнений в соответствии со следующей процедурой их нахождения: а) задается величина B_1^* – в интервале $\bar{E}_i < B_1^* \leq 1$; б) по уравнению (5) определяется параметр P_i ; в) по уравнению (6) (или иному, соответствующему форме тела) находится значение k_i – как корень этого уравнения; г) вычисляется число Bi_m , с использованием найденного из первого периода кинетики значения β_c^* ; д) проверяется правильность задания B_1^* , при необходимости перезадается значение B_1^* и повторяется расчет – до совпадения предварительно принятых и найденных из расчета значений этого параметра.

Ниже приводятся результаты определения кинетических коэффициентов β_c^* и k_i из кинетических кривых, полученных при промывке тонкосуконной шерстяной ткани в лабораторных условиях от жировых технологических загрязнений и хлопчатобумажных тканей от щелочи [4, 5]. Шерстяная тонкосуконная ткань имела поверхностную плотность $\rho_n = 0,780 \text{ кг/м}^2$, ширину 0,07 м, длину 0,5 м, толщину $2R = 0,006 \text{ м}$. Образец ткани фиксировался на направляющих роликах промывной установки в виде бесконечной петли. Линейная скорость перемещения петли в опытах составляла 60 м/мин [4]. Полученная кривая кинетики промывки приведена на рис. 1.

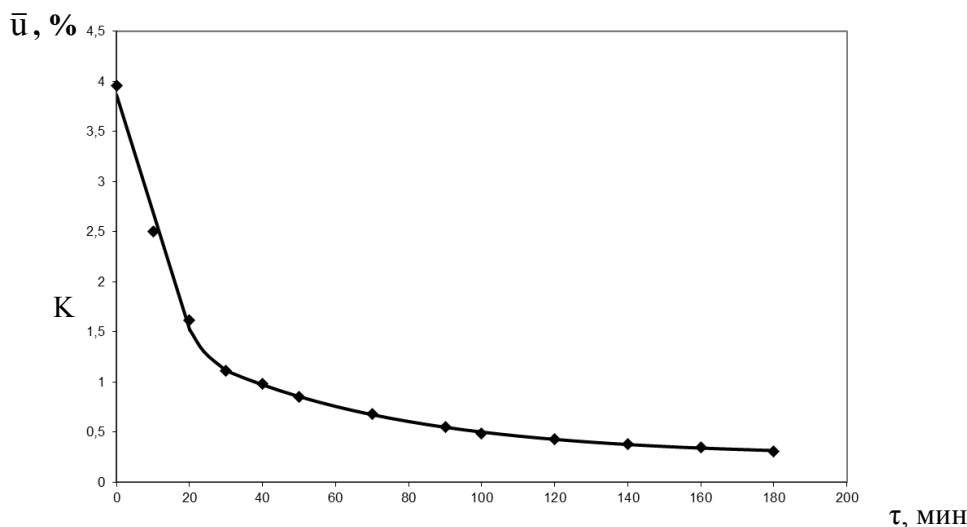


Рис. 1. Экспериментальная кривая кинетики промывки типовой тонкосуконной шерстяной ткани

Как видно из рисунка, на первой стадии зависимость $\bar{u}=f(\tau)$ линейна, что характерно и для промывки других тканей [5, 6]. Из этого участка кривой кинетики по уравнению (2) найден модифицированный коэффициент массоотдачи: $\beta_c^* = 0,60 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \text{ с)}$. Соответствующий ему истинный коэффициент массоотдачи равен: $\beta_c = \beta_c^* A_p = \beta_c^* A_p' \varepsilon / \rho_0$, где A_p' – коэффициент распределения функции равновесия, у которой концентрация распределяемого вещества в твердой фазе отнесена к объему внутрипоровой жидкости, $(\text{кг/м}^3)/(\text{кг/м}^3)$; ε – пористость твердой фазы, $\text{м}^3/\text{м}^3$. Принимая $\varepsilon = 0,5$, $\rho_0 = \rho_n / (2R) = 130 \text{ кг/м}^3$, получили: $\beta_c = 0,23 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$, что согласуется по порядку величин со значениями коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе [6, 7].

Коэффициенты массопроводности определяли по приведенной выше методике, разбивая кривую кинетики при $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ на концентрационные зоны, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты массопроводности для тонкосуконной шерстяной ткани

Номер концентрационной зоны	1	2	3
$(\bar{u}_{n,i} - \bar{u}_{k,i}) \cdot 10^2, \text{ кг/кг с. м.}$	1,09-0,795	0,795-0,34	0,34-0,31
$k_i \cdot 10^9, \text{ м}^2/\text{с}$	1,69	1,62	1,39
Bi_m	8,19	8,71	2,10

Как видно из таблицы, коэффициент массопроводности имеет порядок 10^{-9} , что согласуется по порядку величины со значениями этого коэффициента при экстрагировании целевых компонентов из твердой фазы [6, 7].

Исследования кинетики промывки хлопчатобумажной ткани (ткань обрабатывается щёлочью в процессе мерсеризации) проводили на лабораторной установке, моделирующей процесс промывки при обтекании ткани жидкостью [5]. Объектом исследования являлась

хлопчатобумажная ткань средней плотности $\rho_n = 0,340 \text{ кг/м}^2$. Ткань имела толщину $2R = 0,00091 \text{ м}$. Скорость движения ткани составляла 100 м/мин. , модуль ванны M_v был равен 500 . Образец ткани пропитывали раствором едкого натра с концентрацией 100 кг/м^3 , время пропитки было больше времени достижения равновесия, концентрацию щёлочи определяли методом обратного титрования [5]. Полученная кривая кинетики промывки приведена на рис.2.

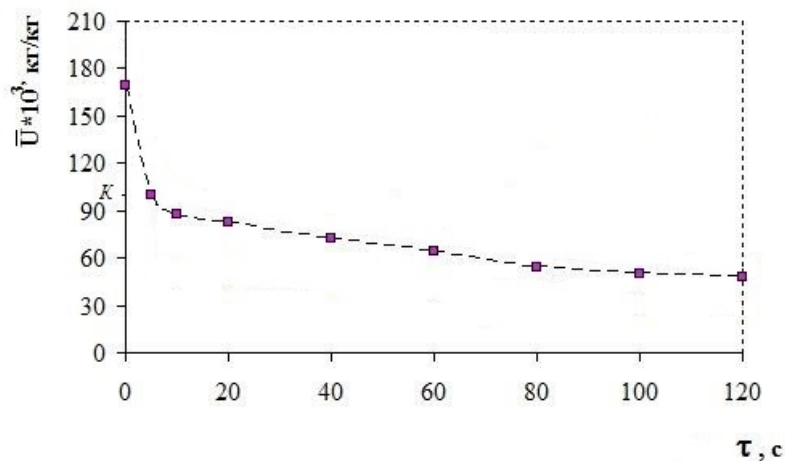


Рис. 2. Кинетика промывки хлопчатобумажной ткани

Как видно из рис. 2, на кривой кинетики наблюдаются два периода, процесса, что характерно для промывки от щёлочи хлопчатобумажных тканей различной плотности и при фильтрации промывочного раствора сквозь полотно ткани [5, 6]. Из линейного участка кривой кинетики был найден коэффициент $\beta_c^* = 0,0615 \text{ кг/(м}^2 \text{ с)}$. Соответствующий ему истинный коэффициент массоотдачи равен: $\beta_c = \beta_c^* A_p = \beta_c^* A_p' \varepsilon / \rho_0$. Принимая $\varepsilon = 0,57$, $\rho_0 = \rho_n / (2R) = 750 \text{ кг/м}^3$, получили: $\beta_c = 0,467 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$. Коэффициенты массопроводности определяли, разбивая кривую кинетики при $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ на три концентрационные зоны (табл.2).

Таблица 2. Коэффициенты массопроводности для хлопчатобумажной ткани средней плотности

Номер концентрационной зоны	1	2	3
$(\bar{u}_{н,i} - \bar{u}_{к,i}) \cdot 10^2, \text{ кг/кг с. м.}$	0,0995-0,0765	0,0765-0,0645	0,0645-0,0475
$k_i \cdot 10^9, \text{ м}^2/\text{с}$	1,258	0,534	0,486
Bi_m	29,7	69,7	76,7

Величина коэффициента массопроводности хорошо согласуется с его значениями при экстрагировании целевых компонентов из твердой фазы [6, 7]. С уменьшением концентрации технологического загрязнения коэффициент массопроводности снижается. Это объясняется тем, что по мере развития процесса удаляется технологическое загрязнение, более прочно связанное со структурой ткани. Величина рассчитанного числа Bi_m указывает на то, что в рассматриваемом процессе реализуется преимущественно смешанно-диффузионная задача массообмена, при которой на скорость процесса влияют как внутреннее, так и внешнее диффузионные сопротивления [2, 3].

Полученные данные по коэффициентам массопроводности и массоотдачи могут быть использованы при расчёте процессов термовлажностной обработки текстильных материалов в химической технологии их отделки.

Обозначения

A_p – коэффициент распределения функции концентрационного фазового равновесия, (кг/кг)/(кг/м³); $C_{с.п.}$, C_c – концентрация распределяемого вещества во внешней фазе соответственно у поверхности тела и в ядре потока, кг/м³; $\bar{E} = (\bar{u}(\tau) - u_p^*) / (u_n - u_p^*)$ – среднее относительное массосодержание; i_1 – плотность потока распределяемого вещества в первом периоде, кг/(м²·с); k – коэффициент массопроводности, м²/с; R – половина толщины пластины, радиус цилиндра или шара; R_v – отношение объема тела к его поверхности, м; β_c – коэффициент массоотдачи, м/с; ε – пористость твердой фазы, м³/м³; $\beta_c^* = \beta_c / A_p$ – модифицированный коэффициент массоотдачи, кг/((м²·с)(кг/кг)); ρ_0 – плотность сухой ткани, кг/м³; ρ_n – поверхностная плотность ткани, кг/м²; $Bi_m = (\beta_c^* R) / (k \rho_0)$ – число Био массообменное модифицированное. Индексы: п – поверхность тела; р – равновесный.

Список литературы

1. Рудобаишта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248 с.
2. Рудобаишта С. П., Кошелева М. К. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. № 6 (360). 2015. С. 175-180.
3. Рудобаишта С. П., Кошелева М. К. Определение кинетических коэффициентов в процессах сушки и термовлажностной обработки материалов // Тезисы докладов и сообщений 15-го Минского международного форума по тепломассообмену. Минск, 23 – 26 мая 2016 г.
4. Кошелева М. К. Повышение производственной и экологической безопасности отделочного производства тонкосуконных фабрик за счет совершенствования технологии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2005. №2. С. 100-105
5. Реутский В. А., Щёголев А. А., Кошелева М. К. Расчёт процесса промывки при фильтрации моющего раствора сквозь полотно ткани // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 1984. № 5. С.50-54.
6. Сажин Б. С. Процессы сушки и промывки текстильных материалов / Б. С. Сажин, М. К. Кошелева, М. Б. Сажина. М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2013. 301 с.
7. Аксельруд А. А., Лысянский В. М. Экстрагирование. Система твердое тело-жидкость. Л.: Химия, 1974. 255 с.

УДК 664.723.085 + 664.723.047.41

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБОВ СУШКИ ЗЕРНА THE EFFICIENCY ANALYSIS OF COMBINED METHODS OF GRAIN DRYING

Георгий Николаевич Станкевич
Georgii N. Stankevich

Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса,
Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine, Odessa
(e-mail: georg-st@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены различные способы комбинированной сушки зерна, их преимущества и недостатки, показана возможность комбинирования конвективного и микроволнового способа подвода энергии при сушке зерна.

Abstract: Various methods of combined grain drying, their advantages and disadvantages, are considered, the efficiency of combination of convectional and microwave energy input method for grain drying is presented.

Ключевые слова: зерно, комбинированные методы, микроволновая сушка, энергия.

Keywords: grain, combined methods, microwave drying, efficiency.

Известно, что комбинирование различных способов сушки позволяет объединить преимущества, присущие каждому отдельному способу сушки. Однако при этом могут также сохраняться и некоторые недостатки этих же способов сушки.

В качестве используемых на практике комбинированных способов сушки можно назвать сушку зерна с предварительным нагревом, когда кратковременный предварительный нагрев зерна осуществляют в падающем или кипящем слое, а последующую основную сушку проводят в плотном слое. Достижимый при этом положительный эффект заключается в сокращении длительности сушки (повышается производительность сушилки), а также в снижении удельных затрат теплоты (топлива) [1, 2].

Объединение прямоточного способа сушки с рециркуляционным также дает определенный положительный эффект. Например, при сушке высоковлажного зерна в спаренных зерносушилках, в первой сушилке целесообразно организовывать рециркуляционную сушку, а во второй — прямоточную, что позволит с одной стороны сушить зерно в потоке без формирования досушиваемых партий зерна в определенном диапазоне влажности, а с другой — получить более равномерно просушенное зерно и уменьшить количество механически поврежденного зерна, чем при чисто рециркуляционной сушке. Производственные испытания переведенных на такой способ сушки зерна кукурузы спаренных зерносушилок ДСП-320Т показали, что максимальный съём влаги за один проход через зерносушилки до реконструкции составлял 14 %, после реконструкции 22 %. Значительно снизился удельный расход газа — с 1,82 м³/т% до 1,36 м³/т% (т.е. на 34 %), а электроэнергии — с 3,0 до 2,7 квт ч/ пл. т. (на 11%) [1, 3].

В Украине некоторые крупные компании, специализирующиеся на производстве зерна кукурузы, начали широко применять для ее сушки комбинацию высокотемпературной сушки и последующего, после отлежки, досушивания и охлаждения зерна наружным воздухом в отдельно стоящих бункерах или силосах с системами активного вентилирования. Этот способ известен как двухэтапная сушка или драйэрация [4, 5]. При сушке обычным способом, когда кукуруза в одной сушилке и сушится и охлаждается, зерно подвергается сильному растрескиванию из-за резкого перепада температур при его поступлении в зону охлаждения и не отвечает ограничительным требованиям по количеству зерновой примеси. Двухэтапная же сушка позволяет получить высококачественное зерно кукурузы, а вследствие того, что зерно в сушилке недосушивают на 1...2 % (эта влага снимается после отлежки на этапе охлаждения), повышается производительность зерносушилки и снижаются удельные затраты топлива.

Расчеты и производственный опыт показали, что применение способа двухэтапной сушки зерна позволяет уменьшить удельные затраты теплоты на испарение 1 кг влаги с 5,1...5,2 МДж до 3,3...3,8 МДж, или на 27...35 % [5]. При этом улучшается также охлаждение зерна, поскольку после отлежки зерна и интенсивного испарения поверхностной влаги, расходуется теплота нагретого зерна. Наиболее целесообразно сушить таким способом культуры, склонные к растрескиванию — кукурузу, рис-сырец, бобовые. Ныне уже предлагаются промышленно изготавливаемые комплексы для реализации двухэтапной сушки зерна, включающие собственно зерносушилки, теплоизолированные теплообменники для отлежки зерна и отдельностоящие шахтные охладители.

В последние годы предложены и другие варианты сушильных установок с использованием различных комбинированных способов сушки. Например, комбинация высокотемпературной конвективной сушки зерна и удаления влаги при обработке зерна низкотемпературной озоновоздушной смеси, при которой используется явление электроосмоса, интенсифицирующего внутренний влагоперенос и сушку в целом на 20...30 %. При такой комбинации удельные энергозатраты снижаются на 30...40 % [6].

В настоящее время во многих промышленных процессах применяется интенсификация технологических процессов под влиянием микроволнового электромагнитного излучения (СВЧ-поля). Микроволновое оборудование становится необходимым технологическим компонентом крупных рентабельных производств. Несмотря на то, что микроволновая

сушка все еще остается довольно энергозатратной, ее основное преимущество — подвод энергии ко всему объему материала — можно использовать на заключительном этапе досушивания продукта, когда влага и зона ее испарения находятся глубоко внутри продукта и конвективная сушка недостаточно эффективна. Кроме того, одновременно с сушкой производится дезинфекция и обеззараживание зерна от микроорганизмов — бактерий, грибов и плесеней. Для микроволновой сушки уже предлагаются соответствующие СВЧ-зерносушилки [7].

Исследования по использованию СВЧ энергии для сушки зерна и пищевых продуктов проводятся многими исследователями, в том числе и в Одесской национальной академии пищевых технологий (ОНАПТ) [8, 9].

Учитывая выше изложенное, нами были проведены исследования по комбинированной конвективно-микроволновой сушке малоисследованной культуры — голозерного овса сорта Белорусский.

Исследования проводили на экспериментальной конвективно-микроволновой установке, состоящей из рабочей камеры, в которую помещали радиопрозрачную сетчатую кассету с зерном. Для конвективного охлаждения зерна наружным воздухом установка снабжена вентилятором, подающем воздух со скоростью 0,5...1,0 м/с. Кассету с зерном периодически взвешивали на электронных весах, а температуру зерна измеряли термопарой в период отсутствия подачи импульсов энергии. Начальная влажность голозерного овса $w = 18...24\%$, высота слоя зерна в кассете $h = 30...60$ мм. Сушили овес до конечной влажности 14 % при осциллирующем режиме, в котором чередовали импульсы подвода энергии (τ_e) с продувкой слоя зерна (τ_n) воздухом. При этом длительности импульсов составляли соответственно $\tau_e = 6...10$ с и $\tau_n = 20...30$ с.

На основании полученных экспериментальных данных были построены кривые сушки и кривые нагрева зерна голозерного овса. Ранее было сказано, что микроволновую сушку целесообразно использовать в конце сушки зерна, когда удаляемая влага и зона ее испарения находятся в глубоко в зерне (конвективная сушка при этом малоэффективна). Поэтому, на основании кривых сушки и нагрева овса были определены продолжительность τ досушивания зерна с влажности 16 % до конечной влажности 14 %, а также скорость нагрева зерна $\Delta\theta/\Delta\tau$ за этот период. Полученные усредненные результаты сведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты конвективно-микроволнового досушивания голозерного овса с влажности 16 % до 14 %

Параметры	Режим сушіння			
	$\tau_e=6$ с, $\tau_n=20$ с	$\tau_e=10$ с, $\tau_n=20$ с	$\tau_e=6$ с, $\tau_n=30$ с	$\tau_e=10$ с, $\tau_n=30$ с
Длительность сушки τ , мин.	4,0	3,5	5,5	4,3
Скорость нагрева $\theta/\Delta\tau$, °С/мин.	3,00	1,43	1,27	1,07

Обработка полученных данных позволила получить зависимость продолжительности τ досушивания зерна с 16 до 14 %

$$\tau = -0,353 + 0,225 \tau_e + 0,255 \tau_n - 0,017 \tau_e \tau_n, \text{ мин.} \quad (1)$$

а также зависимость скорости нагрева зерна на этом этапе

$$N_\theta = \Delta\theta/\tau = 12,922 - 1,077 \tau_e - 0,378 \tau_n + 0,034 \tau_e \tau_n, \text{ °С/мин.} \quad (2)$$

которые адекватно описывают экспериментальные данные.

Определить температуру голозерного овса после его досушивания в микроволновой сушилке можно по формуле

$$\theta_k = \theta_n + N_\theta \tau, \text{ °С.} \quad (3)$$

где θ_k , θ_n – температура зерна соответственно в конце и в начале микроволновой сушки, °С.

Используя полученные уравнения и зная температуру зерна в начале этапа досушивания θ_n (т.е. при влажности 16 %), можно рассчитать продолжительность импульсов подачи энергии τ_e и продувки слоя зерна воздухом τ_n , при которых температура зерна в

конце сушки θ_k (при достижении влажности 14 %) не будет превышать предельно допустимую, т.е. будет обеспечено нормативное качество просушенного зерна.

Для примера рассчитаем, какую температуру будет иметь зерно голозерного овса после микроволнового досушивания, если оно поступило в микроволновую сушилку подсушенным до влажности 16 % с температурой 44 °С. Для этого, задавая значения τ_3 и τ_n (из диапазона их изменения соответственно 6...10 и 20...30 с) по формуле (2) определим возможную продолжительность досушивания зерна в микроволновой сушилке τ , затем по формуле (3) — скорость нагрева зерна и, наконец, по формуле (4) — температуру зерна после сушки θ_k . Проведенные расчеты показывают, что в рассматриваемом диапазоне изменения факторов τ_3 и τ_n расчетная продолжительность досушивания находится в пределах 3,6...5,6 мин, что значительно меньше, чем при конвективной сушке. Температура нагрева зерна при этом равна 48...56 °С. Рассмотрев весь диапазон изменения τ_3 и τ_n , методом последовательных приближений можно выбрать такие их значения, когда температура нагрева зерна будет равна предельно допустимой. При этом конечная влажность зерна будет равна 14 %, поскольку уравнения (1)–(3) были получены именно при этом условии.

Дальнейшие расчеты показывают, что если предельную температуру зерна принять равной 50 °С, то в рассматриваемом примере выполнение условия $\theta_k \leq 50$ °С может быть обеспечено при следующих условиях:

при $\tau_3 = 6$ с, $\tau_n = 30$ с; при $\tau_3 = 8$ с, $\tau_n = 28...30$ с; при $\tau_3 = 10$ с, $\tau_n = 20...30$ с.

Среди указанных возможных вариантов наименьшая продолжительность микроволновой сушки овса (а, значит, и наибольшая производительность сушилки) будет при $\tau_3 = 10$ с и $\tau_n = 20$ с. Эти режимы сушки можно рекомендовать как лучшие с точки зрения производительности зерносушилки и обеспечения нормативного качества просушенного зерна. Проводя подобные расчеты, можно определить режимы микроволновой сушки и для других значений температуры зерна, поступающего в микроволновую сушилку.

Таким образом, применяя конвективно-микроволновой способ можно более эффективно использовать подводимую энергию и значительно снизить время сушки зерна.

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., Атаназевич В.І. Сушіння зерна: Підручник. К.: Либідь, 1997. 352 с.
3. Страхова Т.В., Станкевич Г.Н. Опыт комплексного внедрения энергосберегающих технологических и технических решений в зерносушении // Труды Второй Междунар. научно-практич. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005». Том 2. М.: Изд-во ВИМ, 2005. С. 55-57.
4. Сорочинский В.Ф. Применение активного вентилирования в технологии двухстадийной сушки зерна // Труды Четвертой междунар. научно-практич. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов (СЭТТ-2011))». Том 2. 2011. М.: ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. С. 26-32.
5. Гапонюк О.І. Остапчук М.В., Станкевич Г.М., Гапонюк І.І. Активне вентильовання та сушіння зерна: Навч. посібник. Одеса: ВМВ, 2014. 326 с.
9. Установка микроволновая для сушки зерновых и масленичных культур модели АСТ-3 // <http://www.act-agro.ru/?page=RuProductsGrain&Sid=SID>
7. Пахомов В.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н. Рассмотрение возможности использования новой двухэтапной технологии высокотемпературной конвективной сушки и озонозвоздушной обработки зерна на базе применяемых в производстве сушильных установок. / Труды Четвертой междунар. научно-практич. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов (СЭТТ-2011))». Том 2. М.: ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. С. 54-66.

8. Станкевич Г.Н., Бошкова И.Л., Дементьева Т.Ю., Овсянникова Л.К., Кац А.К. Исследование закономерностей осциллирующей конвективно-микроволновой сушки зерна // Сб. трудов (секц. доклады) Междунар. научно-техн. конф. «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» (ПРЭТ-2014). Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2014. С. 328-333.

9. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Бандура В.Н. Режимы обезвоживания в электромагнитном поле // Сб. науч. статей Первых Междунар. Лыковских науч. чтений «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе». Курск: ЗАО «Университетская книга». 2015. С. 47-53.

УДК: 634.25

**РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СУШКИ ФЕЙХОА ПРИ
СТУПЕНЧАТОМ ЭНЕРГОПОДВОДЕ
DEVELOPMENT OF RATIONAL MODES OF DRYING FEIJOA
WITH STEP ENERGY SUPPLY**

**Александр Николаевич Остриков, Александр Юрьевич Бачевский
Aleksandr N. Ostrikov, Aleksandr Y. Bachevskiy**

*Воронежский Государственный Университет Инженерных Технологий, Россия, Воронеж
Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh
(e-mail: ostrikov27@yandex.ru, aleksandr-bachevskiy@yandex.ru)*

Аннотация: Приведено обоснование разработки ступенчатого режима СВЧ-конвективной сушки фейхоа, позволяющего добиться повышение тепловой эффективности процесса сушки и улучшение качества готового продукта.

Annotation: The substantiation of the development step mode microwave convection drying feijoa, allows for increasing the thermal efficiency of the drying process and improve the quality of the finished product.

Ключевые слова: СВЧ-конвективная сушка, фейхоа, кинетика сушки.

Keywords: microwave convective drying, feijoa, kinetics of drying.

Использование ступенчатого теплоподвода при сушке фейхоа позволит интенсифицировать процесс сушки, сократить время сушки фейхоа. Применение щадящих температурных режимов, максимально адаптированных к основным кинетическим закономерностям, позволит снизить негативное воздействие на термолабильные вещества фейхоа и повысить их качество.

Целью работы является улучшение качества готового продукта и повышение тепловой эффективности процесса сушки за счет использования ступенчатого режима СВЧ-конвективной сушки фейхоа, снижение энергозатрат на получение готового продукта [2].

Для эффективной реализации рациональных режимов сушки фейхоа при ступенчатом энергоподводе методом дифференциально-термического анализа были исследованы формы связи влаги в продукте [1].

Исследования закономерностей теплового воздействия на фейхоа осуществлялись методом неизотермического анализа на комплексном термоанализаторе TGA-DSC фирмы Mettler-Toledo STAR^с с постоянной скоростью нагрева 3 К/мин до 220 К.

Количественную оценку форм связи влаги в продукте осуществляли по экспериментальным зависимостям изменения массы образца TGA и скорости изменения массы DTG (рисунок 1), полученный методом термогравиметрии. После обработки закономерностей на рисунке 1 получили зависимость $-lga$ от величины $10^3/T$ исследуемых фейхоа при нагревании со скоростью подъема температуры 3 К/мин (рисунок 2).

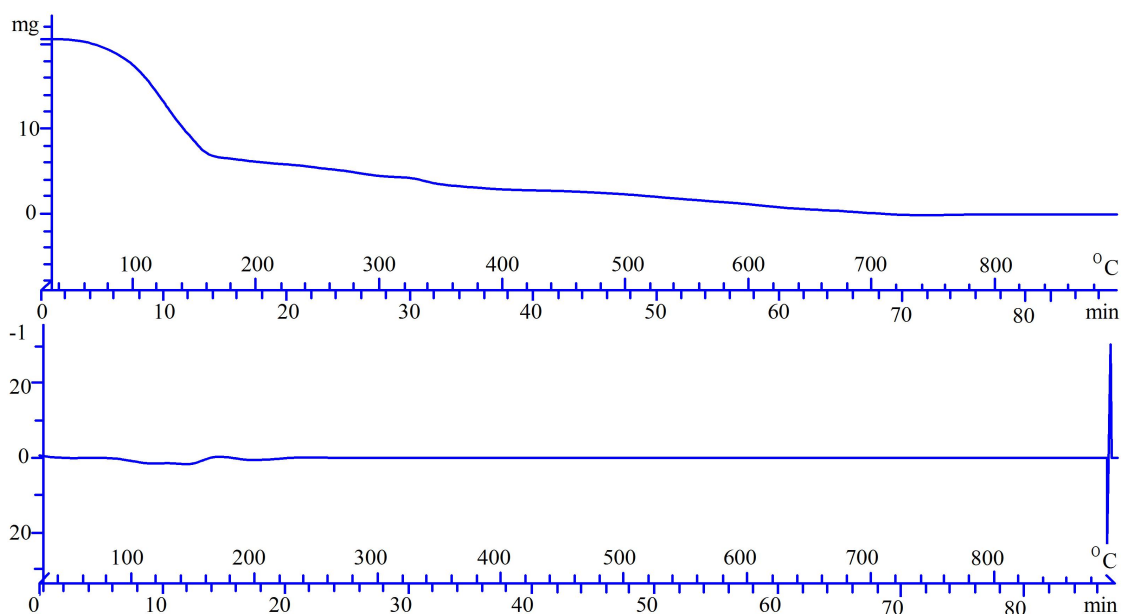


Рис. 1 - Экспериментальные зависимости изменения массы образца фенхоа TGA и скорости изменения массы DTG мушмулы.

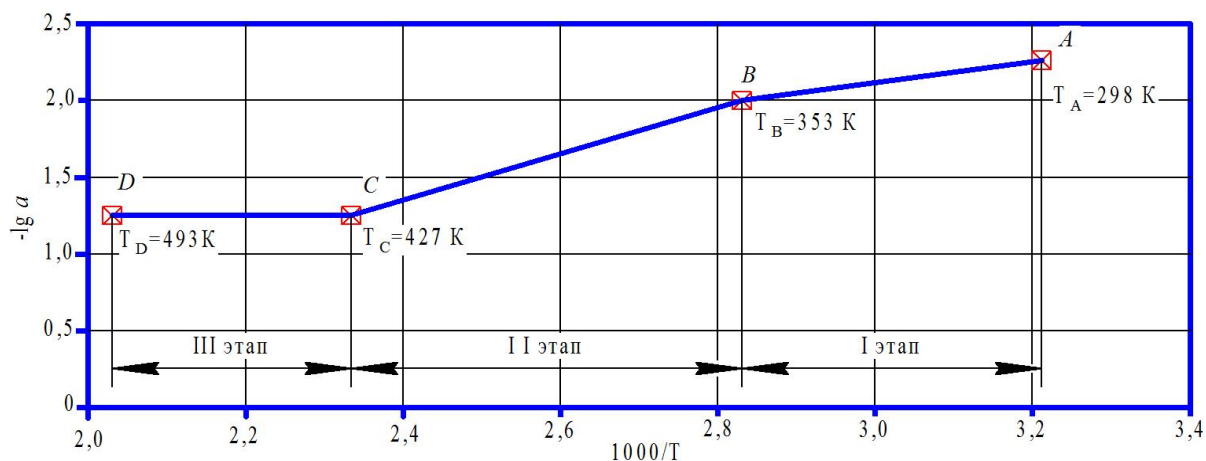


Рис. 2 - Зависимость $-\lg a$ от величины $10^3/T$ исследуемых фенхоа при нагревании со скоростью подъема температуры 3 К/мин

Проведенный анализ полученных данных позволил выделить периоды дегидратации воды и преобразования сухих веществ при термическом воздействии на фенхоа, а также выявить температурные зоны, которые соответствуют высвобождению влаги с различной формой и энергией связи, что позволит прогнозировать режимные параметры процесса сушки и выбрать среди них наиболее эффективные.

На основе дифференциально-термического анализа был разработан ступенчатый режим сушки (рис. 3, таблица 1).

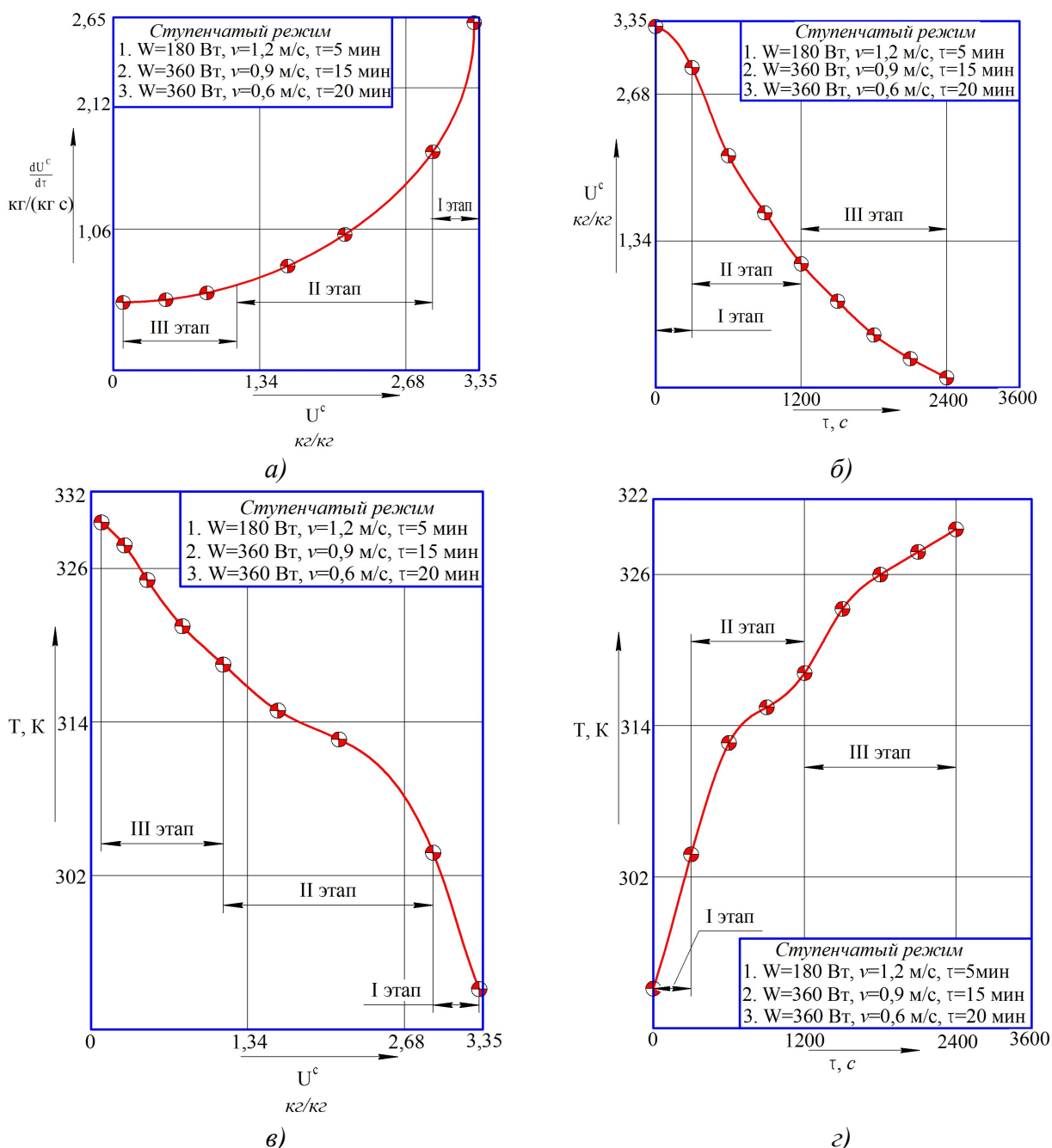


Рис. 3 - Кривая скорости сушки (а), кривая сушки (б), температурная кривая (в) и термограмма (г) при ступенчатом режиме СВЧ - конвективной сушки фейхоа

Как видно из рисунка 3, во время первого этапа из продукта активно удаляется капиллярная влага, отвод паров которой интенсифицируется за счет высокой скорости теплоносителя, на втором этапе теплового воздействия из сырья уходит осмотическая влага, на третьем этапе удаляется моноадсорбционная влага. Повышение температуры на заключительных этапах сушки дает возможность осуществить процесс более эффективно.

На рисунке 3 представлены кривая скорости сушки (а), кривая сушки (б), температурная кривая (в) и термограмма (г) при ступенчатом режиме СВЧ– конвективной сушки фейхоа.

Таблица 1. Ступенчатый режим сушки фейхоа

Номер этапа	Мощность, Вт	Скорость воздуха, м/с	Время, с
1	180	1,2	0 - 300
2	360	0,9	300 - 1200
3	360	0,6	1200 - 2400

В процессе теплового воздействия фейхоа претерпевает значительные физико-химические изменения, в результате которых высвобождается вода, содержащаяся в конкретном продукте и определяющая характер происходящих внутри него преобразований вещества.

Применение ступенчатого режима сушки фейхоа позволяет уменьшить продолжительность процесса за счет его интенсификации и повысить показатели качества полученного продукта.

Список литературы

1. Демьянов, В. Д. Обоснование выбора ступенчатого режима СВЧ–конвективной сушки груш [Текст] / В. Д. Демьянов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2013. – № 4. – С. 11-13.

2. Витковский, В. Л. Плодовые растения мира [Текст] / В. Л. Витковский. – СПб.: Лань, 2011. – 591 с.

УДК 532.516: 536.24

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СУШКИ ТОРФА В УСЛОВИЯХ КИПЯЩЕГО СЛОЯ MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMICS DRYING PEAT IN THE FLUIDIZED BED

Наталья Николаевна Сорокова, Юрий Федорович Снежкин
Natalia N. Sorokovaya, Yury F. Snezhkin

*Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины, Украина, Киев
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Ukraine, Kiev
(e-mail: n.sorokova@yandex.ua)*

Аннотация: Разработана математическая модель и численный метод расчета тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел сферической формы в условиях кипящего слоя. Результаты расчета свидетельствуют о возможности ее применения при выборе оптимальных режимных параметров обезвоживания фрезерного торфа.

Abstract: A mathematical model and a numerical method for the calculation of heat and mass transfer, phase changes and the shrinkage on drying of colloidal capillary-porous bodies of spherical form in a fluidized bed. The calculation results indicate the possibility of its application in the selection of optimal regims of dewatering milled peat.

Ключевые слова: математическое моделирование, динамика сушки, кипящий слой, торф.

Keywords: mathematical modeling, drying dynamics, fluidized bed, peat.

Эффективной альтернативой использования каменного угля в твердотопливных котлах, частных и муниципальных котельных являются торфяные гранулы и брикеты. Они также представляются ценным сырьем при производстве некоторых сортов активированного угля. Для их производства фрезерный торф подлежит осушке до конечной влажности 15 – 20 %. Начальная влажность торфа может достигать 90%. На этапе заготовки торф по технологии должен некоторое время находиться в буртах, где ворошится и в итоге естественным образом достигается влажность 40 – 45%. Последующая сушка торфа осуществляется преимущественно дымовыми газами с температурой 100 ÷ 170 °С в сушильных установках с кипящим слоем. Непрерывное вращение частиц в

псевдооживленном слое способствует равномерному тепло- и массообмену, поэтому температура теплоносителя на различных участках по высоте слоя практически одинакова [1]. Частицы торфа имеют форму, наиболее приближенную к сферической. Кривые распределения частиц по размерам [2] свидетельствуют о существенной неоднородности дисперсного состава торфа, причем необработанный торф имеет преимущественно грубодисперсную фракцию с эквивалентными диаметрами частиц от 0,5 мм до 5 мм. Это обстоятельство затрудняет задание времени пребывания торфа в сушильном аппарате кипящего слоя. Математическое моделирование динамики тепло- и массопереноса при обезвоживании частиц торфа в условиях псевдооживленного состояния позволит определять время сушки частиц различного диаметра и выбирать оптимальные с точки зрения сохранения энергии и качества режимные параметры процесса.

Для случая равномерного обдува сферического коллоидного капиллярно-пористого тела сушильным агентом система дифференциальных уравнений переноса энергии и массы компонентов связанного вещества, которая строится на базе уравнения переноса субстанции для деформируемого тела, полученного в [3], без учета термодиффузии компонентов представляется в следующем виде:

$$c_{\text{эф}} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + w_{\text{эф}r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\text{эф}} r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) - LI_V, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{\text{ж}r} U_{\text{ж}})}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{\text{ж}} r^2 \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial r} \right) - I_V - \frac{U_{\text{ж}}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{\text{г}r} U_{\text{п}})}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{\text{п}} r^2 \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial r} \right) + I_V - \frac{U_{\text{п}}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}. \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{\text{г}r} U_{\text{в}})}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{\text{в}} r^2 \frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial r} \right) - \frac{U_{\text{в}}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}. \quad (4)$$

Здесь T – температура; $U_{\text{ж}}$, $U_{\text{п}}$ и $U_{\text{в}}$ – объемные концентрации жидкости, пара и воздуха в теле; $c_{\text{эф}}$, $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективные теплоемкость и теплопроводность тела, $c_{\text{эф}} = c_{\text{т}} U_{\text{т}} + c_{\text{ж}} U_{\text{ж}} + c_{\text{п}} U_{\text{п}} + c_{\text{в}} U_{\text{в}}$, $\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{т}} U_{\text{т}} / \rho_{\text{т}} + \lambda_{\text{ж}} U_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}} + \lambda_{\text{п}} U_{\text{п}} / \rho_{\text{п}} + \lambda_{\text{в}} U_{\text{в}} / \rho_{\text{в}}$; I_V – интенсивность испарения жидкости в порах тела; L – удельная теплота испарения, которая учитывает удельную теплоту испарения свободной жидкости и удельную энергию десорбции связанной влаги; $w_{\text{эф}r}$ – эффективная скорость связанного вещества вдоль координаты r , $w_{\text{эф}r} = (w_{\text{ж}r} c_{\text{ж}} U_{\text{ж}} + w_{\text{п}r} c_{\text{п}} U_{\text{п}} + w_{\text{в}r} c_{\text{в}} U_{\text{в}}) / c_{\text{эф}}$.

Скорости фильтрации жидкой $w_{\text{ж}}$ и газовой фаз $w_{\text{г}}$ согласно закону Дарси пропорциональны градиентам их давлений: $w_{\psi} = -K_0 K_{\psi} / \eta_{\psi} \nabla P_{\psi}$, $\psi = \text{ж, г}$. Здесь K_0 – общая проницаемость среды; K_{ψ} – относительная проницаемость фазы ψ ; η_{ψ} – динамический коэффициент вязкости фазы ψ . Давления $P_{\text{ж}}$ и $P_{\text{г}}$ выражаются через функции $U_{\text{ж}}$, $U_{\text{п}}$, $U_{\text{в}}$ и T . Объемные доли скелета $\Psi_{\text{т}}$, жидкости $\Psi_{\text{р}}$ и газа $\Psi_{\text{г}}$ в пористом теле находятся по выражениям $\Psi_{\text{т}} = 1 - \Pi$, $\Psi_{\text{ж}} = U_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}}$ и $\Psi_{\text{г}} = 1 - \Psi_{\text{т}} - \Psi_{\text{ж}}$, где Π – пористость, $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости. Парциальные плотности пара и воздуха $\rho_{\text{п}} = U_{\text{п}} / \Psi_{\text{г}}$ и $\rho_{\text{в}} = U_{\text{в}} / \Psi_{\text{г}}$, а парциальные давления $P_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} R_{\text{г}} T / \mu_{\text{п}}$ и $P_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} R_{\text{г}} T / \mu_{\text{в}}$. Давление газовой смеси будет $P_{\text{г}} = P_{\text{п}} + P_{\text{в}}$. Давление жидкой фазы $P_{\text{ж}} = P_{\text{г}} + P_{\text{к}}$, где капиллярное давление $P_{\text{к}}$ определяется [3] как среднее капиллярное давление жидкости. Объем жидкости $dV(r)$ содержащейся в порах с радиусами от r до $r+dr$ в единичном объеме тела пропорционален дифференциальной функции $F(r)$ распределения пор по размерам и объемной доли $\theta(r)$ капилляра, занятой жидкостью: $dV(r) = \theta(r) F(r) dr$. Тогда среднее значение капиллярного давления в данной точке тела может быть представлено в виде выражения, аналогичного формуле Лапласа

$$P_K = 2\sigma(T) \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\theta(r)}{r} F(r) dr / \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \theta(r) F(r) dr = \frac{2\sigma(T)}{r^*}, \quad r_{\min} < r^* < r_{\max}, \quad (5)$$

где r_{\min} и r_{\max} — минимальный и максимальный радиусы пор единичного объема.

Коэффициенты диффузии жидкой и газовой фаз находятся по формулам: $D_{ж} = \gamma_{Dж} [\exp(A_D/RT) - 1]^{-1}$, $D_{п} = D_{в} = \gamma_{Dп} T^{3/2} / P_r$, где R — универсальная газовая постоянная, A_D — энергия активации для процесса диффузии; $\gamma_{Dж}$, $\gamma_{Dп}$ — диффузионные коэффициенты. Формула Н.И. Никитенко для $D_{ж}$ [4] в предельных случаях переходит в эмпирическую формулу Аррениуса для твердых тел и в формулу Эйнштейна для жидких сред.

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

$$I = \gamma_c \left\{ \varphi_T \left(\exp \left[\frac{A}{RT} \Big|_{v=0} \right] - 1 \right)^{-1} - \varphi_c \left(\exp \left[\frac{A}{RT_c} \right] - 1 \right)^{-1} \right\}, \quad (6)$$

где $\gamma_c = \epsilon \rho_{ж} \delta^* / 4$ — коэффициент поверхностного испарения; ϵ — коэффициент излучения; δ^* — средняя длина диффузионного перескока активизированной частицы в слое жидкости; φ_T — влажность парогазовой смеси, которой согласно изотерме сорбции отвечает объемная концентрация $U_{ж}$ в данной точке пористого тела; v — нормаль к граничной поверхности; T_c и φ_c — температура и относительная влажность внешней среды; A — энергия активации. Значение φ_T может быть определено на базе формулы, полученной [5] для равновесной толщины слоя конденсата δ на поверхности твердого тела, находящегося в среде с параметрами φ и $P_{п}$: $\delta = \delta^* \bar{\delta} = \delta^* (1 - \sqrt{1 - P_{п} / P_{н}}) = \delta^* (1 - \sqrt{1 - \varphi})$, где $\bar{\delta} = \delta / \delta^*$ при $0 < \delta < \delta^*$ и $\bar{\delta} = 1$ при $\delta > \delta^*$, откуда $\varphi_T = \bar{\delta} (2 - \bar{\delta})$. Давление насыщения $P_{н}$ определялся по формуле Никитенко Н.И. [5]: $P_{н} = N_p \sqrt{T} [\exp(A/RT) - 1]^{-1}$, $N_p = \text{const}$, которая хорошо согласуется с табличными данными.

Интенсивность испарения в порах тела находится по формуле, которая следует из (6) при условии локального термодинамического равновесия, в соответствии с которым температуры фаз в каждой точке тела совпадают

$$I_V = \gamma_c [\exp(A/RT) - 1]^{-1} (\varphi_T - \varphi) S. \quad (7)$$

Здесь S — площадь контакта жидкой и газовой фаз в частично заполненных жидкостью порах единичного объема тела. Для нахождения функции S получена формула [6]:

$$S = \frac{2\sqrt{1 - \varphi_T}}{\rho_{ж} \delta^*} \frac{\partial U_{ж}}{\partial \varphi_T}. \quad (8)$$

Производная $\partial U_{ж} / \partial \varphi_T$ может быть найдена из уравнения изотермы десорбции. Если изотерма задана в виде $U_{ж} = U_{\max} \varphi_T^g$, $g = \text{const}$, то $\partial U_{ж} / \partial \varphi_T = U_{\max} g \varphi_T^{g-1}$. Для древесного торфа результаты по равновесной влажности [7] достаточно хорошо описываются уравнением

$$U_{ж} = 0,3 U_{\max} \left(\frac{\varphi_T}{1 - \varphi_T} \right)^{1/3}.$$

Относительная объемная деформация ϵ_V находится на базе уравнения термоконцентрационного деформирования [6], записанного в сферических координатах, когда известны функции температуры T и объемных концентраций жидкости $U_{ж}$, пара $U_{п}$ и воздуха $U_{в}$ в пористом теле.

Условия теплообмена на границе $r = 0$ представляют собой условия симметрии полей температуры и объемных концентраций компонентов связанного вещества

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{ж}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{п}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{в}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad (9)$$

а на поверхности $r = R$ имеют место граничные условия третьего рода

$$\lambda_{\text{эф}} \left. \frac{\partial T}{\partial v} \right|_{v=0} = \alpha(T_c - T|_{v=0}) - L\gamma_c \left\{ \varphi_{\tau}|_{v=0} \left[\exp\left(\frac{A}{RT|_{v=0}}\right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_c \left[\exp\left(\frac{A}{RT_c}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (10)$$

$$D_{\text{ж}} \left. \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial v} \right|_{v=0} = \gamma_c \left\{ \left[\varphi_{\tau}|_{v=0} \exp\left(\frac{A}{RT|_{v=0}}\right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_c \left[\exp\left(\frac{A}{RT_c}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (11)$$

$$-D_{\text{п}} \left. \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial v} \right|_{v=0} = \gamma_{\text{пс}} (U_{\text{п}}|_{v=0} - \rho_{\text{пс}} \psi_{\text{п}}), \quad U_{\text{в}}|_{v=0} = \frac{P_c \psi_{\text{г}} \mu_{\text{в}}}{R T|_{v=0}} - U_{\text{п}}|_{v=0} \frac{\mu_{\text{в}}}{\mu_{\text{п}}}. \quad (12)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи может быть использована формула для теплоотдачи в кипящем слое $\text{Nu}=0,03\text{Pr}^{0,33}\text{Re}$ [8].

Решение системы дифференциальных уравнений (2) – (5) при граничных условиях (9) – (12) может быть проведено численным методом на базе явной трехслойной пересчетной разностной схемы Никитенко Н.И. [9] и процедуре расщепления алгоритма по физическим факторам. Разностная аппроксимация уравнения переноса жидкой фазы в сферических координатах на равномерной разностной сетке $r_i = ih$, ($i = 0, 1, \dots, h = \text{const}$), $t_n = nl$ ($n = 0, 1, \dots, l > 0$) в соответствии с указанной схемой представляется в виде

$$\frac{\bar{U}_{\text{ж}_i}^{n+1} - U_{\text{ж}_i}^n}{l} = - \left[\left((w_{\text{ж}} U_{\text{ж}})_{i+1}^n - (w_{\text{ж}} U_{\text{ж}})_i^n \right) - \left((w_{\text{ж}} U_{\text{ж}})_i^n - (w_{\text{ж}} U_{\text{ж}})_{i-1}^n \right) \right] / (2h^2), \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & (1 + \Omega_{\text{ж}}) \frac{U_{\text{ж}_i}^{n+1} - U_{\text{ж}_i}^n}{l} - \Omega_{\text{ж}} \frac{U_{\text{ж}_i}^n - U_{\text{ж}_i}^{n-1}}{l} = \\ & = - \left[\left((w_{\text{ж}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i+1}^n - (w_{\text{ж}} \bar{U}_{\text{ж}})_i^n \right) - \left((w_{\text{ж}} \bar{U}_{\text{ж}})_i^n - (w_{\text{ж}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i-1}^n \right) \right] / (2h^2) + \end{aligned} \quad (14)$$

$$+ \frac{1}{2r_i^2} \left[(D_{\text{ж}_{i+1}} r_{i+1}^2 + D_{\text{ж}_i} r_i^2) (U_{\text{ж}_{i+1}}^n - U_{\text{ж}_i}^n) - (D_{\text{ж}_i} r_i^2 + D_{\text{ж}_{i-1}} r_{i-1}^2) (U_{\text{ж}_i}^n - U_{\text{ж}_{i-1}}^n) \right] / h^2 - I_V.$$

Значение параметра $\Omega_{\text{ж}} \geq 0$, который устраняет ограничения на шаг по времени, выбираются после построения разностной сетки исходя из условия устойчивости

$$\text{разностных уравнений (13), (14): } l_{\text{ж}} \leq \left\{ \left(\frac{w_{\text{ж}r}}{h} \right)^{-1}; (1 + 2\Omega_{\text{ж}}) / \left[2D_{\text{ж}} \left(\frac{1}{h^2} \right) \right] \right\}.$$

На рис.1 показаны результаты численных экспериментов сушки сферической частицы верхового торфа диаметром 5 мм при равномерном ее обдуве сушильным агентом с температурой 100 °С и 150 °С. Скорость сушильного агента (дымовых газов) принималась 3 м/с, а влагосодержание 12 г/кг сухих газов. Значения диффузионных коэффициентов определялись в результате сопоставления расчетных и экспериментальных данных по кинетике конвективной сушки дымовыми газами неподвижного торфяного слоя [10].

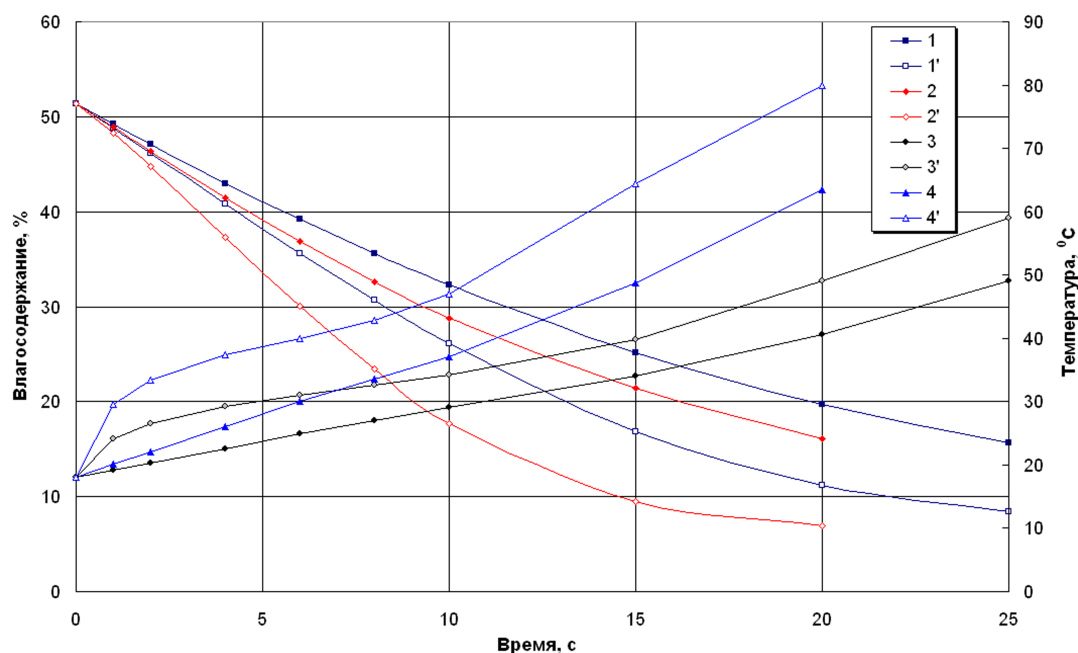


Рис.1 Графики изменения средних значений влагосодержания (кривые 1, 2) и температуры (кривые 3, 4), а также влагосодержания (кривые 1', 2') и температуры (кривые 3', 4') на поверхности сферической частицы торфа диаметром 5 мм при ее обезвоживании во взвешенном слое с температурой теплоносителя 100 °C (кривые 1, 3) и 150 °C (кривые 2, 4).

Качественный характер кривых свидетельствует об адекватности математического описания процесса и о возможности использования представленной математической модели и метода расчета для выбора оптимальных режимных параметров сушки фрезерного торфа в аппаратах кипящего слоя.

Список литературы

1. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 1988. 352с.
2. Воларович М.П., Чураев Н.В. Исследование степени дисперсности торфа. Тр. Инсторфа. №1. Тверь, 2010. С. 37.
3. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки с целью оптимизации процесса сушки термолабильных материалов // ИФЖ.. 2005. Т. 78, № 1. С. 74.
4. Никитенко Н.И. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидких средах // ИФЖ.. 2000. Т. 73. № 4. С. 851.
5. Никитенко Н.И. Исследование динамики испарения конденсированных тел на основе закона интенсивности спектрального излучения частиц// ИФЖ.. 2002. Т.75. № 3. С. 128.
6. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н., Кольчик Ю.Н. Молекулярно-радиационная теория и методы расчета тепло- и массообмена. Киев: Наукова думка, 2014. 744 с.
7. Исследование изотерм сорбции и десорбции // 2015. http://mechtrans.ru/info/issledovanie_izoterm_sorbtsii_i_desorbtsii.
8. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — Изд. 5-е перераб. и доп. — М.: Атомиздат, 1979, 416 с. http://info.sernam.ru/book_ott.php?id=127
9. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. Киев: Наукова думка, 1983. 352 с.
10. Смольянинова Н.М., Котликов Я.Л. Влияние температуры и скорости движения теплоносителя на искусственную сушку формованного торфа // Известия ТПИ. 1961. Т.111. С. 91. http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/1961/v111/24_full.pdf

УДК 664.723.047

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ТЕПЛО- И
ВЛАГООБМЕНА ПРИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СУШКЕ ЗЕРНА
THE EXPERIMENTAL STUDY OF THE INTERRELATION OF HEAT AND MOISTURE
INTERFACE FOR RECIRCULATING GRAIN DRYING**

Вениамин Алексеевич Резчиков*, Светлана Вениаминовна Савченко,
Любовь Александровна Савченко**
Veniamin A. Rezchikov*, Svetlana V. Savchenko**, Lyubov A. Savchenko****

*Московский государственный университет пищевых производств», Россия, Москва
Moscow state university of food production», Russia, Moscow
(e-mail: rezchikovva@gmail.com, svetlanasav@gmail.com, laff@inbox.ru)*

Аннотация: Исследованы некоторые особенности взаимосвязи процессов внешнего и внутреннего тепло- и влагообмена, присущие технологии комбинированной рециркуляционной сушке зерна. В лабораторных условиях осуществлено физическое моделирование технологии рециркуляционной сушки зерна. Исследован характер изменения в процессе сушки зерна соотношения интенсивностей внешнего и внутреннего переноса влаги.

Abstract: We studied some features of the interaction of processes of internal and external heat and moisture inherent in the combined recirculating grain drying technology. In laboratory carried out the physical simulation of recirculation technology of drying grain. Explore the nature of the change in the process of drying grain ratio of the intensities of external and internal moisture transfer.

Ключевые слова: зерно, рециркуляционная сушка, температура зерна, влажность зерна, тепловлагообмен, взаимосвязь.

Key words: grain, recirculating drying, grain temperature, grain moisture, heat and moisture exchange, interrelation.

При исследовании комбинированной рециркуляционной сушки зерна выявлены некоторые особенности взаимосвязи процессов внешнего и внутреннего тепло- и влагообмена.

В лабораторных условиях осуществлено физическое моделирование технологии рециркуляционной сушки зерна, включающей процессы механического смешивания сырого и подсушенного зерна, интенсивного нагрева смеси зерна в состоянии псевдооживленного слоя, контактного влагообмена между сырым и подсушенным зерном, конвективной сушки смеси зерна в состоянии плотного гравитационно-движущегося слоя.

Основное внимание уделено исследованию взаимосвязи тепло- и влагообмена в процессе конвективной сушки смеси зерна, когда удаляется наибольшее количество влаги.

Кинетика процесса конвективной сушки смеси зерна представлена на рисунке 1 в виде совмещенных кривых сушки (1, 2, 3) и температуры (1', 2', 3') зерна.

Полученные в результате исследования кинетики кривые сушки зерна имеют аномальный характер, обусловленный особенностями испарения влаги из нагретой смеси зерна [1]. Снижение температуры зерна в начале процесса вызывается интенсивным испарением влаги, подводимой к поверхности нагретого зерна, что способствует ускорению процесса сушки. По мере развития процесса и ослабления интенсивности внутреннего влагопереноса зона испарения углубляется внутрь зерна, температура зерна начинает повышаться, а скорость сушки снижается.

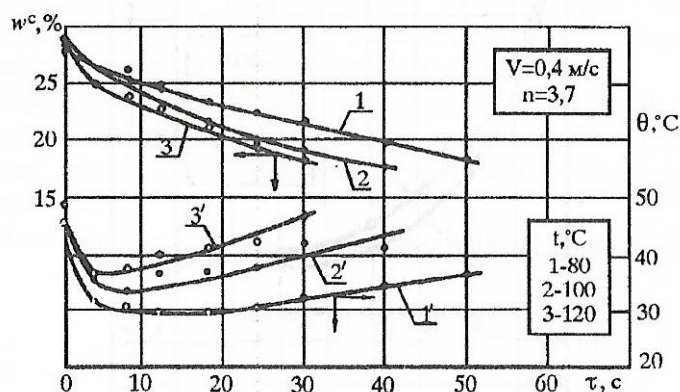


Рис. 1. Кинетика сушки смеси предварительно нагретого сырого и рециркулирующего зерна разной начальной влажности.

Скорость и глубина охлаждения зерна зависят от начальной влажности смеси сырого и рециркулирующего зерна. Чем выше начальная влажность смеси зерна, тем в большей мере снижается температура зерна в начальный период сушки.

Вследствие снижения температуры зерна и уменьшения коэффициента диффузии влаги ослабляется перенос ее изнутри к поверхности зерна, снижается скорость сушки.

На протяжении всего процесса скорость сушки убывающая: на кривых сушки и скорости сушки отмечаются переломные точки, соответствующие минимуму температуры зерна, что свидетельствует о неразрывной связи явлений тепло- и влагообмена.

Анализируя выявленный характер взаимосвязи тепло- и влагообмена, следует к тому же учитывать, что высушиваемая смесь зерна неоднородна по влажности. Снижение температуры сырого и рециркулирующего зерна в начальный период различно вследствие неодинакового количества влаги, испаряющейся с поверхности зерновок. В общем случае сырое зерно охлаждается в большей мере, чем рециркулирующее.

Закономерности снижения влажности зерна в зоне сушки определяются взаимосвязью процессов нагрева зерна и испарения влаги. Чем жестче режим сушки, тем с большей скоростью нарастает температура зерна во втором периоде сушки и тем короче весь процесс.

Отметим, что в зоне сушки одновременно протекает несколько взаимозависимых явлений внешнего и внутреннего тепло- и влагообмена, по-разному влияющих на скорость сушки зерна.

В соответствии с положениями общей теории сушки взаимосвязь средних интегральных значений влажности и температуры зерна с интенсивностями тепло- и массообмена установлена в виде уравнения баланса тепла, подведенного к зерну и потраченного на испарение влаги и на нагрев зерна [1].

Значения температурного коэффициента определяли расчетным путем по экспериментальным данным из кривых кинетики сушки зерна [2]. Установлено, что по мере протекания процесса сушки температурный коэффициент уменьшается, причем темп снижения величины температурного коэффициента зависит от температуры сушильного агента. Чем выше температура сушильного агента, тем интенсивнее углубление поверхности испарения внутри зерна.

Определены значения критерия Кирпичева Ki , характеризующего соотношение интенсивности внешнего и внутреннего влагопереноса (1):

$$Ki = \frac{q_m \cdot R_v}{a_m \cdot \rho_0 \cdot u_0}, \quad (1)$$

где R_v – определяющий размер зерна, м; ρ_0 – плотность абсолютно сухого вещества зерна, кг/м³; a_m – коэффициент диффузии влаги, м²/с; u_0 – среднее влагосодержание зерна, кг/кг; q_m – величина потока влаги, определяемая по уравнению (2):

$$q_m = \frac{1}{100} \frac{d\omega^c}{d\tau} R_v \rho_0, \quad (2)$$

где $\frac{d\omega^c}{d\tau}$ – скорость сушки зерна, %/с.

Снижение температуры зерна вначале процесса сушки вызывает уменьшение потока влаги, предопределяет снижение величины критерия Кирпичева, т.е. превышения интенсивности испарения влаги с поверхности зерна над интенсивностью внутреннего переноса влаги.

Результаты исследования характера изменения в процессе сушки зерна соотношения интенсивностей внешнего и внутреннего переноса влаги позволяют определить величину градиента влагосодержания в зерне – важного технологического параметра сушки.

Результаты проведенных исследований взаимосвязи и взаимодействия тепло- и влагообмена использованы при разработке и внедрении технологии интенсифицированной рециркуляционной сушки зерна с ведением процесса сушки в так называемом «квазиизотермическом» режиме [1].

Список литературы

1. Савченко С.В. Научно-практические основы модернизации и технологии зерносушения: монография / С.В. Савченко. – М.: Издательский комплекс МГУПП, 2012. – 248 с.
2. Савченко С.В. Развитие научных основ и практических методов повышения эффективности технологии зерносушения: дисс.... докт.техн.наук / Савченко С.В.; МГУПП. – М.:2009. – 387 с.

УДК 664.047

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ КОНВЕКТИВНО-КОНДЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД СУШКИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ЧИПСОВ ENERGY EFFECTIVE CONVECTIVE AND CONDENSATION METHOD OF DRYING IN TECHNOLOGIES OF PRODUCTION OF CHIPS

**Юрий Федорович Снежкин, Раиса Алексеевна Шапарь, Елена Витальевна Гусарова
Yuri F. Snezhkin, Raisa A. Shapar, Elena V. Husarova**

*Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины
Украина, Киев
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine
Ukraine, Kyiv
(email: sunflowers@i.ua)*

Аннотация: представлена энергоэффективная технология производства плодоовощных чипсов с использованием конвективно-конденсационного метода сушки, приведен анализ способов предварительной обработки сырья.

Abstract: presented energy-efficient technologies of production of fruit and vegetable chips using convection-condensation drying method, presented the analysis of methods of pre-treatment raw materials.

Ключевые слова: плодоовощные чипсы, сахаро-кислотный индекс, конвективно-конденсационный режим сушки сырья, энергоэффективность процесса.

Keywords: fruit and vegetable chips, sugar-acid index, convective and condensation drying, energy efficiency of process.

Плодоовощные чипсы на украинском рынке появились недавно, но уже стали популярными, так как являются полезными, вкусными и диетическими.

В производстве чипсов используют различные способы обезвоживания – сублимационный, вакуумный, конвективный, инфракрасный, а также их сочетание. Большинство технологий получения чипсов предполагают применение различных вкусовых

добавок, стабилизаторов, пряностей, как на стадии подготовки сырья, так и на заключительной стадии [1, 2, 3, 4]. Для этого необходимы дополнительные компоненты, оборудованные, что в свою очередь, увеличивает себестоимость конечного продукта. Кроме этого, плодоовощные чипсы теряют свою натуральность, становятся более калорийными и менее диетическими.

Цель работы - разработка энергоэффективной технологии производства плодоовощных чипсов с использованием конвективно-конденсационного метода сушки, которая обеспечивает получение натурального продукта без вкусовых добавок, ароматизаторов и стабилизаторов.

Объектами исследований были яблоки, груши, айва, хурма и белые корнеплоды. Термолабильность сырья определяется содержанием в его составе органических кислот, сахаров, пектинов, витаминов, каротиноидов, эфирных и ароматических веществ. Поэтому, при разработке технологии и проведении экспериментальных исследований, учитывались свойства и состав каждого вида сырья, подбирались соответствующие способы его подготовки и режимы сушки таким образом, чтобы максимально сохранить его натуральность и минимизировать энергозатраты на сушку.

При производстве чипсов из фруктов предпочтительно использовать плоды средней степени зрелости и плотной консистенции, поздних осенних и осенне-зимних сортов. Также следует учитывать величину сахаро-кислотного индекса исходного сырья - отношение сахара к кислоте (СКИ). Экспериментально установлено, что оптимальная величина СКИ, например для яблок - 16...20, а для груш - 50...70. Выбор сырья с указанной величиной СКИ положительно сказывается на вкусовых качествах чипсов, исключает возможность протекания реакций карамелизации и меланоидинообразования, обеспечивает увеличение влагообмена в процессе сушки.

Подготовленные фрукты нарезают толщиной 1...5 мм, подвергали различным видам предварительной обработки (паротермической, обработкой лимонной кислотой и сахарным сиропом). Анализ режимов и способов предварительной обработки сырья на кинетику сушки и на органолептику готового продукта показал, что рассмотренные виды обработки обеспечивают высокую степень сохранности цвета исходного сырья (табл. 1) и ускоряют кинетику в сравнении с необработанными образцами. При паротермической обработке скорость процесса сушки на 15 % выше, чем при других видах обработки [5]. Паротермическая обработка стабилизирует цветовую и вкусовую гамму исходного материала, способствует сохранению витаминов, разрушению окислительных ферментов.

Обезвоживание осуществлялось методом конвективно-конденсационной сушки до остаточной влажности не более 8 %.

Таблица 1. Влияние предварительной обработки сырья на цвет образца и готового продукта (на примере яблок)

Вид обработки	Изменение цвета образца	Цвет чипсов
необработанные	потемнение от 3 до 35 мин в зависимости от сорта	светло-коричневый цвет
паротермическая обработка	Цвет устойчивый насыщенный	светло-кремовый цвет
обработка в растворе лимонной кислоты	Цвет устойчивый насыщенный	светло-кремовый цвет
обработка в растворе сахарного сиропа	Цвет устойчивый насыщенный	кремовый цвет

Для белых корнеплодов, содержащих ароматические вещества и эфирные масла, паротермическая обработка не проводилась. Сушка осуществлялась в режиме низкотемпературного обезвоживания [6].

На основании полученных результатов авторами разработана схема технологического процесса (рис. 1).

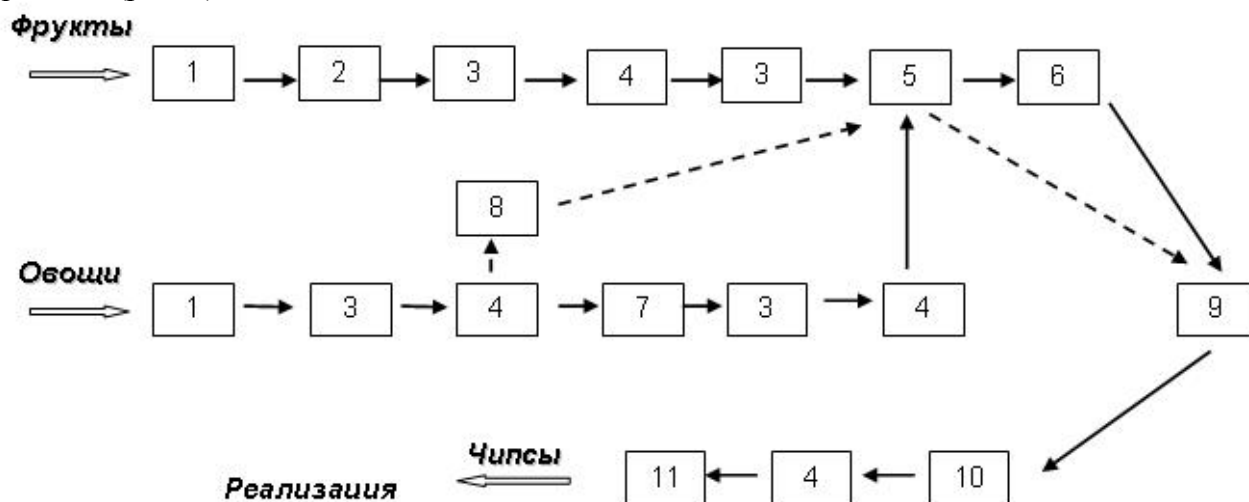


Рис. 1. Энергоэффективная технология производства плодоовощных чипсов.

1 – бункер; 2 – ванна для замачивания; 3 – моющая машина; 4 – инспекционный транспортер; 5 – машина для резки; 6 – аппарат для паротермической обработки;

7 – термоочистительная машина; 8 – агрегат для механической очистки;

9 – сушильная установка; 10 – аппарат для охлаждения; 11 – упаковочное оборудование

Анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований позволил разработать конвективно-конденсационные режимы процесса сушки в соответствии с которыми осуществляется снижение температуры и влагосодержание сушильного агента постадийно, в зависимости от вида сырья. Во избежание превышения температуры материала выше предельно допустимой, проводится контроль длительности пребывания сырья в среде определенной температуры и влагосодержания, благодаря чему исключается перегрев материала и разрушение термолабильных веществ плодоовощного сырья.

Разработанная технология производства плодоовощных чипсов с использованием конвективно-конденсационного метода сушки повышает энергоэффективность процесса. Технология защищена 7 патентами Украины.

Список литературы

1. Пат. CN104305041A, A23L 1/212. Method for making dehydrated apple chips/Zhao Guoying; appl. 10.10.2014; pub. 28.01.2015. – International application № 201410529339.

2. Пат. WO 2002074102, A23B 7/022, A23B 7/06, A23B 7/08, A23B 7/10, A23B 7/155, A23L 1/212. Method of manufacturing diet chips of vegetables and fruits/W. Plochanski, D. Конорска. P346508; appl. 15.03.2001; pub. 26.09.2002. – International application № PCT/PL2002/000013.

3. Пат. 10964 Беларусь, МПК⁸ A23L 1/212, A23B 7/005. Способ производства пищевого продукта из яблок/Арнаут С.А., Ловкис З.В. – № a20060519; заявл. 26.05.2006; опубл. 30.08.2008.

4. Пат. 2520142 Российская Федерация, МПК⁹ A23L 1/212. Способ производства плодоовощных чипсов/Калашников Г.В., Литвинов Е.В. – № 2012127498/13; заявл. 03.07.2012; опубл. 20.06.2014. Бюл. № 17.

5. Снежкин Ю.Ф., Шапар Р.О., Сорокова Н.М., Гусарова О.В. Розробка технології виробництва нових форм сушених продуктів // Промышленная теплотехника, г. Киев, 2015. Т. 37. № 6. С. 29-37.

6. Снежкин Ю.Ф., Шапар Р.А. Энергоэффективность теплотехнологий переработки растительных материалов // Материалы конференции, 3-я международная научно-техническая конференция «Нестационарные, энерго- и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, нано- и биотехнологии». Москва: МГОУ, 2013. С. 211-215.

УДК 664.727

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ
ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ СЕМЯН НА ЭФФЕКТ СТИМУЛЯЦИИ
EFFECT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE OSCILLATING IR DRYING
SEED ON THE STIMULATION EFFECT**

**Дмитрий Сергеевич Кашменский, Станислав Павлович Рудобашта
Dmitry S. Kashmensky, Stanislav P. Rudobashta**

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени
К.А. Тимирязева, Россия, Москва
Russian state agrarian University – MAA after K. A. Timiryazev, Russia, Moscow
(e-mail: kashmensky11@gmail.com)*

Аннотация: Рассмотрено влияние различных технологических параметров осциллирующей инфракрасной сушки семян на эффект стимуляции: начальной влажности семян, продолжительности этого процесса, температурного режима, а также длительности сохранения стимулирующего эффекта.

Abstract: This paper considers the effect of various process parameters oscillating infrared seed drying on the stimulation effect: the initial moisture content of seeds, the duration of the process, temperature, and duration of the stimulating effect.

Ключевые слова: инфракрасная сушка, стимуляция, энергия прорастания, всхожесть.
Keywords: infrared drying, stimulation, germination energy, germination.

Для повышения энергии прорастания и всхожести семян применяют различные способы их стимуляции [1]: скарификация (механическое повреждение твердой поверхности семян – перетирание мелких семян наждаком или в смеси с песком, надпиливание или надрез покровов крупных семян), импакция (повреждение кожуры семян путем удара семян друг о друга или о стенки сосуда, в который они заключены), обработка семян и плодов щелочами, кислотами и некоторыми другими веществами, способствующими разрушению семенных покровов, термическая обработка семян, ультрафиолетовое облучение, облучение семян лазерным светом, обработка семян в электромагнитном поле СВЧ. Эти способы «работают» в биологически активном диапазоне и, как правило, оказываются эффективными только в том случае, если обработке подвергаются семена, содержащие достаточно влаги.

В [2] было установлено, что инфракрасная сушка (ИК-сушка) семян, собранных с поля, проводимая в импульсном (осциллирующем) температурном режиме, позволяет не только эффективно высушить семена перед закладкой их на хранение, но и повышает посевные качества семян: вызывает повышение энергии прорастания (ЭП) и всхожести семян (В). Таким образом, осциллирующая ИК-сушка может рассматриваться как еще один способ стимуляции семян, перспективность применения которого определяется совмещением двух технологических процессов – сушки и стимуляции. В [3] проведены исследования по изучению различных факторов именно на стимуляцию семян этим методом. В дальнейшем будем использовать термин «осциллирующая», а не «импульсная» сушка, поскольку он точнее отображает суть процесса. Цель данной работы: проанализировать влияние исследованных в [2] и [3] параметров осциллирующей ИК-сушки на стимуляцию семян и наметить дальнейшие исследования по стимуляции семян этим методом.

В [2] было показано следующее:

- применение осциллирующей инфракрасной сушки для собранных с поля семян таких овощных культур, как томат, огурец, бобы, свёкла, морковь, петрушка, пастернак, а также семян таких нетрадиционных и редких растений, как иссоп, шалфей, змееголовник

молдавский, кресс-салат, укроп при осцилляции температуры материала от $t_{\min} = 34^{\circ}\text{C}$ до $t_{\max} = 40^{\circ}\text{C}$ вызывает значительную стимуляцию семян;

- стимулирующий эффект различен для семян разного вида, что объясняется их биологическим видовыми особенностями;

- из числа исследованных излучателей (лампы «КГТ» и «OSRAM», керамический излучатель «ELCER») наибольший стимулирующий эффект дает применение ламп «OSRAM», что объясняется лучшим соответствием их спектральных характеристик таковым у семян;

- для достижения максимального стимулирующего эффекта плотность потока лучистой энергии должна составлять $q = 1810 \dots 1890 \text{ Вт/м}^2$;

- увеличение всхожести семян при применении лампы «OSRAM» в среднем по всем овощным культурам составляет 24%, а энергии прорастания - 30% от контроля, для семян нетрадиционных и редких растений эти цифры соответственно составляют 24% и 82%;

- наибольший стимулирующий эффект наблюдался для семян огурца: увеличение энергии прорастания на 53,8% и всхожести на 47,5%.

Поскольку исследования в [2] проводили с семенами, собранными с поля, то они имели разную полевую влажность, влияние которой невозможно было проконтролировать, не исследовалось также влияние длительности ИК-сушки на эффект стимуляции. В связи с этим была проведена вторая серия экспериментов [3], в которой целенаправленно изменяли начальную влажность и длительность ИК-сушки, изучая их влияние на стимулирующий эффект. Из числа выбранных первоначально для этих опытов семян таких культур, как пшеница яровая сорта «Приокская», перец сладкий сорта «Богатырь», горчица белая сорта «ВНИИМК-162», лук репчатый, сорта «Штутгартер ризен», оказалось, что наибольший стимулирующий эффект наблюдается у семян лука, с которыми и были проведены основные эксперименты. У семян других культур исходные энергия прорастания и всхожесть были высоки, поэтому их стимуляция не имела смысла. Так, у пшеницы эти данные соответственно были равны 89% и 94%, у перца 71% и 89%, у горчицы 85 и 93%.

В результате проведенных в [3] исследований по осциллирующей ИК-сушке (лампы «OSRAM», $q = 1810 \text{ Вт/м}^2$, $t_{\min} = 34^{\circ}\text{C}$, $t_{\max} = 40^{\circ}\text{C}$) было установлено следующее:

1. Влияние начальной влажности. Начальная влажность семян оказывает влияние на стимулирующий эффект. Выборочные результаты исследований [3], иллюстрирующие этот эффект, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние начальной влажности семян на их энергию всхожесть после осциллирующей ИК-термообработки в течение 40 мин [3]

№ опыта	Начальное влагосодержание семян u_n , (кг влаги)/(кг сух. м-ла)	Конечное влагосодержание семян (после сушки) u_k , (кг влаги)/(кг сух. м-ла)	Увеличение всхожести в результате ИК-сушки
1.	0,48	0,15	в 1,68
2.	0,30	0,10	в 1,54
3.	0,20	0,08	в 1,66
4.	0,12	0,075	в 1,20

Как видно из таблицы 1, чем выше влажность семян, тем больше стимулирующий эффект, максимальное значение которого составило 1,68 раза. Исходная влажность стимулируемых семян была равна 50%, за счет стимуляции максимальное ее значение поднялось до 84%. Стимуляция семян при влагосодержании 12% (такое влагосодержание имеют семена на складе при их хранении) также имеет место и составляет 12%;

2. Влияние времени ИК-сушки. На эффект стимуляции оказывает влияние также время ИК-сушки (рис. 1).

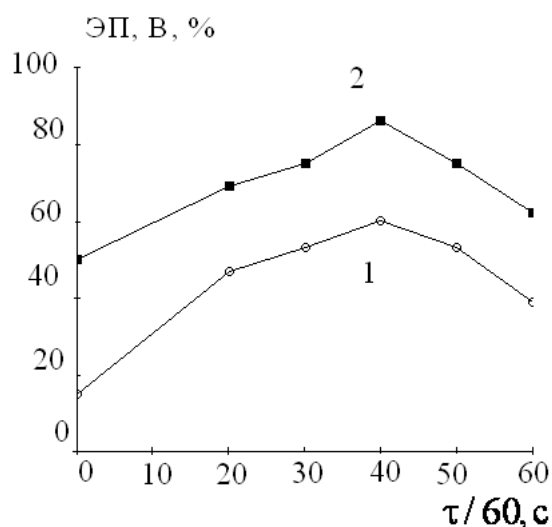


Рис. 1. Зависимость ЭП и В лука репчатого сорта «Штутгарер ризен», высушенного методом осциллирующей ИК-сушки, от времени сушки ($u_n = 48,1\%$; контроль: ЭП = 13%, В = 50 %; $q = 1890 \text{ Вт/м}^2$; $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$, $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$) [3].

Как видно из рис.1, наибольшее увеличение энергии прорастания и всхожести семян достигается при длительности осциллирующей ИК-сушки 40 мин. Поскольку осциллирующая ИК-сушка может применяться как при сушке семян, собранных с поля – для достижения влажности 11%, необходимой для хранения, так и непосредственно перед посевом в качестве специального технологического процесса по стимуляции семян, то в этом случае ее продолжительность для достижения максимального эффекта стимуляции должна составлять 40 мин;

3. Влияние температурного режима. Эти исследования в [3] проводили в два этапа:

1) на первом этапе сохраняли $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$ и варьировали значение t_{\max} , беря его последовательно равным 40°C , 50°C и 60°C (средняя температура в циклах при этом составляла соответственно $\bar{t} = 37^\circ\text{C}$, 42°C и 47°C). Было установлено, что наиболее благоприятным является режим, при $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$ (увеличение всхожести в 1,68 раза), при $t_{\max} = 50^\circ\text{C}$ увеличение всхожести - в 1,5 раза, т.е. меньше, чем в предыдущем режиме, а при $t_{\max} = 60^\circ\text{C}$, наблюдается угнетение семян: их всхожесть снижается на 68,8%;

2) на втором этапе в [3] исследовали влияние амплитуды температурных осцилляций (температурного гистерезиса) $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$ на эффект стимуляции. Опыты проводили при условии, средняя температура семян в циклах постоянна и равна $\bar{t} = 37^\circ\text{C}$, а значения t_{\min} и t_{\max} - разные, а именно: в первом опыте $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$, $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$, $\Delta t = 6^\circ\text{C}$; во втором опыте $t_{\min} = 31^\circ\text{C}$, $t_{\max} = 43^\circ\text{C}$, $\Delta t = 12^\circ\text{C}$; в третьем опыте $t_{\min} = 28^\circ\text{C}$, $t_{\max} = 46^\circ\text{C}$, $\bar{t} = 37^\circ\text{C}$, $\Delta t = 18^\circ\text{C}$. Результаты этих исследований представлены в табл. 2 (в контроле В = 50%).

Как видно из табл. 2, наибольшую стимуляцию дает режим, в котором $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$, $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$; увеличение температурного гистерезиса Δt приводит к ухудшению энергии прорастания и всхожести по сравнению с контролем, поэтому эти режимы не приемлемы;

Таблица 2. Влияние температурного гистерезиса при осциллирующей ИК-сушке семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» на их энергию прорастания и всхожесть [3]

№	условия опыта		температурный гистерезис $\Delta t, ^\circ\text{C}$	средняя длительность цикла «нагрев-охлаждение», с	энергия прорастания, %	всхожесть, %
	$t_{\min}, ^\circ\text{C}$	$t_{\max}, ^\circ\text{C}$				
1	34	40	6	60	73	84 ± 4
2	31	43	12	80	4	18 ± 2
3	28	46	18	200	0	12 ± 2

4. Сохранение эффекта стимуляции во времени. В [3] изучали длительность сохранения эффекта стимуляции, полученного от применения осциллирующей ИК-сушки, во времени. С этой целью семена, подвергнутые ИК-сушке высевали сразу после сушки, спустя 4 месяца после нее, и спустя 8 месяцев. сохраняется длительное время, о чем свидетельствуют данные таблицы 2. Результаты этих опытов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Влияние длительности хранения семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» на стимулирующий эффект [3]

№	Вид семян	контроль		высадили сразу после ИК-сушки		высадили через 4 месяца		высадили через 8 месяцев	
		ЭП, %	В, %	ЭП, %	В, %	ЭП, %	В, %	ЭП, %	В, %
Показатель		13	50 ± 3	73	84 ± 6	65	71 ± 3	60	70 ± 4
Значение показателя									

Данные табл. 3 показывают, что эффект стимуляции сохраняется длительное время. Это означает, что стимулировать семена можно как непосредственно перед посевом, так и в процессе сушки семян, собранных с поля – применяя осциллирующий ИК-способ.

Заключение

1. Проведенный анализ показывает, что осциллирующая ИК-сушка вызывает стимуляцию семян, проявляющуюся в увеличении их энергии прорастания и всхожести;

2. Семена разного вида имеют различную всхожесть, применять осциллирующую ИК-сушку с целью их стимуляции нужно к семенам с низкой всхожестью. К числу таких семян относятся, в частности, семена лука репчатого и огурца;

3. В [2, 3] исследовано влияние различных технологических аспектов осциллирующей ИК-сушки на эффект стимуляции, раскрывающие возможности этого метода стимуляции. В [3] установлено, что для достижения максимального эффекта стимуляции надо применять температурный режим осцилляций со значениями температур $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$, $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$, поскольку он обеспечивает наибольший эффект стимуляции;

4. Не выясненным осталось влияние продолжительности цикла осцилляций на эффект стимуляции;

5. Все исследования выполнены при сушке семян в монослое. С одной стороны, применение монослоя обеспечивает гарантированное ИК-облучение всех семян, но, с другой, использование монослоя в промышленной сушилке будет приводить к большому ее рабочему объему при заданной производительности по семенам. Поэтому целесообразно изучить эффект стимуляции при проведении ИК-сушки семян в плотном слое.

Проведение таких исследований планируется в нашей работе.

Список литературы

1. Трифонова М.В., Бляндур О.В., Соловьев А.М., Фирсов И.П., Сиротин А.А., Сиротина Л.В. Физические факторы в растениеводстве. М.: Колос. 1998. 352 с.
2. Рудобашта С. П., Григорьев И. В. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур, нетрадиционных и редких растений // Промышленная теплотехника. 2011. 33. №8. С. 85.
3. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А. Стимуляция семян путем осциллирующей инфракрасной термообработки // Промышленная теплотехника. 2013. Т.35. № 7. С. 218.

УДК 664.663.12

ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЗЕРНА АРАХИСА HEAT-AND-MASS EXCHANGE AT HYDROTHERMAL TREATMENT GROUNDNUT SEEDS

Александр Анатольевич Шевцов, Лариса Игоревна Лыткина,
Бенедито Агостиньо Гуме
Alexandr A. Shevtsov, Larisa I. Lytkina, Benedito A. Guma

*Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Россия, Воронеж
Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh
(e-mail: shevalol@rambler.ru, larissaig2410@rambler.ru, beneditogune@gmail.com)*

Аннотация: Разработана математическая модель процессов теплообмена при гидротермической обработке зерна арахиса перегретым паром атмосферного давления, которая позволила определить поля влагосодержания и температур в единичном зерне. Полученная модель может быть использована при проектировании аппаратов для гидротермической обработки зерна арахиса и для составления алгоритмов управления технологическими параметрами.

Abstract: A mathematical model of heat and mass transfer processes in hydrothermal processing of grain peanut superheated atmospheric pressure steam, which allowed us to determine the field moisture content and temperature in a single grain. The resulting model can be used in the design of devices for hydrothermal processing of grain and peanuts to produce algorithms control process parameters.

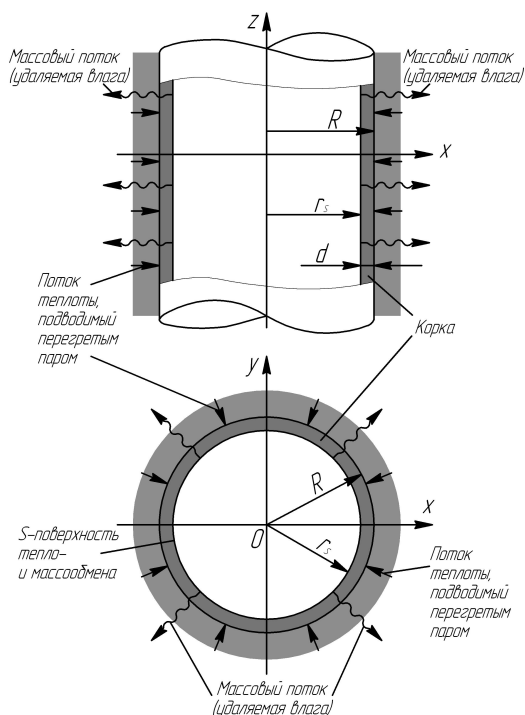
Ключевые слова: гидротермическая обработка, зерно арахиса, математическая модель, теплообмен, кинетика.

Keywords: hydrothermal treatment, peanut grain, mathematical model, heat and mass transfer, kinetics.

Для изучения механизма теплообмена при гидротермической обработке (ГТО) зерна арахиса перегретым паром была разработана математическая модель для определения полей влагосодержания и температур в единичном зерне и расчета продолжительности процесса [1-3].

Зерно арахиса имеет геометрическую форму, приближенную к цилиндру. Отношение высоты h к радиусу R цилиндра в среднем составляет 8, что дает основание рассматривать арахис в виде бесконечного цилиндра, ограниченного поверхностью S , и в цилиндрической системе координат (r, h, φ) .

При этом теплообмен в процессе термической обработки арахиса перегретым паром в условиях вынужденной конвекции осуществляется в направлении вектора внешней нормали n к поверхности S (рис. 1).



**Рис. 1. Модель процесса
тепломассопереноса при обжарке
арахиса перегретым паром**

Интенсивность влагоотдачи q_m зависит от концентрации влаги на поверхности продукта и в окружающей среде:

$$q_m = \alpha_{mi} \rho_o (u(M, \tau)|_{M \in S} - u_p), \quad (4)$$

где $\alpha_{mi} = D_n / \delta_u$ – коэффициент влагоотдачи, м/с, или константа скорости диффузии k_D ; ρ_o – плотность абсолютно сухого материала, кг с. вещ./м³; u_p – равновесное влагосодержание продукта, кг. вл./ кг. с. вещ.; $u(M, \tau)|_{M \in S}$ – влагосодержание продукта на поверхности S ; $D_n = f(u)$ – коэффициент диффузии пара, м²/с; δ_u – условная толщина пограничного слоя, м;

Для задания интенсивности процесса теплообмена использован закон Ньютона – Рихмана [1]:

$$q = \alpha (T(M, t)|_{M \in S} - T_c), \quad (5)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $T_n = T(M, t)|_{M \in S}$ – температура поверхности теплообмена, К; M – точка на поверхности S теплообмена; T_c – температура в центре потока теплоносителя, К.

В этих условиях процесс ГТО частицы продукта представлен системой дифференциальных уравнений в частных производных в цилиндрической системе координат

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho_o c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho_o c} \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\epsilon r_c}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial a_m}{\partial r} \frac{\partial u}{\partial r} + a_m \delta \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \left(\delta \frac{\partial a_m}{\partial r} + a_m \frac{\partial \delta}{\partial r} \right) \frac{\partial t}{\partial r}, \quad (7)$$

с начальными условиями

$$t(r, 0) = \begin{cases} T_c, & \text{при } r \geq R, \\ t_{нач}, & \text{при } r < R \end{cases}, \quad (8)$$

$$u(r, 0) = \begin{cases} u_c, & \text{при } r \geq R, \\ u_{нач}, & \text{при } r < R \end{cases}, \quad (9)$$

Процесс ГТО сопровождается образованием на поверхности зерна корки, которая характеризуется коэффициентом коркообразования

$$\xi = \frac{\zeta}{(u_{нач} - u_{кон}) - \zeta \cdot u_{нач}}, \quad (1)$$

где ζ – относительное коркообразование:

$$\zeta = d / R, \quad (2)$$

где d – толщина корки, м

$$d = R - r_s, \quad (3)$$

где R и r_s – соответственно радиус зерна и радиус поверхности тепло- и массообмена, $u_{нач}$, $u_{кон}$ – соответственно влагосодержание зерна в начале и конце процесса ГТО.

Распределение температуры и влагосодержания в зерне арахиса рассматривались в цилиндрической системе координат. В качестве независимых координат любой точки M влажного тела принимались пространственные координаты r , h , φ и время τ . Предполагалось, что искомое температурное поле $t = t(r, \tau)$ и поле влагосодержания $u = u(r, \tau)$ являлись симметричными относительно оси цилиндра и не зависели от высоты h и угла φ .

граничными условиями третьего рода, отображающими теплообмен между коркой и теплоносителем

$$-\lambda_k \left(\frac{\partial t_k}{\partial r} \right)_{r=R} + \alpha_k [T_c - t_k(\tau)] - r_c(1-\varepsilon) \beta \rho_o [u_k(\tau) - u_p] = 0' \quad (10)$$

и массообмен между коркой и теплоносителем

$$-a_{mk} \left(\frac{\partial u_k}{\partial r} \right)_{r=R} + a_{mk} \delta \left(\frac{\partial t_k}{\partial r} \right)_{r=R} + \beta [u_k(\tau) - u_p] = 0' \quad (11)$$

граничными условиями четвертого рода, отображающими теплообмен между продуктом и коркой

$$\lambda_k \left(\frac{\partial t_k}{\partial r} \right)_{r=r_S} = \lambda_n \left(\frac{\partial t_n}{\partial r} \right)_{r=r_S} \quad , \quad (12)$$

и массообмен между продуктом и коркой

$$a_{mk} \left(\frac{\partial u_k}{\partial r} \right)_{r=r_S} = a_{mn} \left(\frac{\partial u_n}{\partial r} \right)_{r=r_S} \quad , \quad (13)$$

и условиями симметрии

$$\left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (14)$$

Задача (6) – (14) решалась при условии, что граница между продуктом и коркой подвижна и перемещение ее задавалось функцией $d(\tau)$:

$$d(\tau) = \xi \tau, \quad 0 \leq r \leq R - d(\tau), \quad [R - d(0) = r], \quad \tau > 0. \quad (15)$$

Задача (6) – (15) представляет собой краевую задачу тепло- и массопроводности с одной статичной и одной движущейся границей [1] и решена с использованием функциональных преобразований методом конечных разностей.

Разработан программный модуль расчета процесса ГТО арахиса перегретым паром в системе *Maple 9.5*.

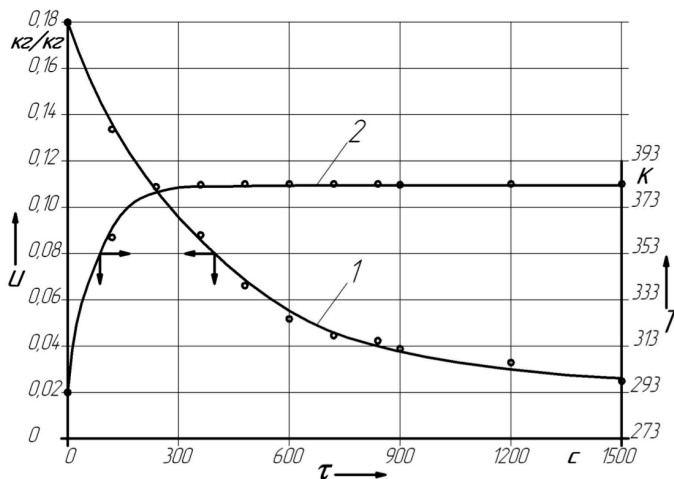


Рис. 2. Сравнение расчетных (—) и экспериментальных (○) данных при ГТО перегретым паром, $T_{II} = 383$ К; $q_n = 25$ кг/м²; $v = 2,3$ м/с: 1 – кривая обжарки зерна арахиса; 2 – термограмма тепломассопереноса при ГТО зерна арахиса

По сравнительному анализу результатов аппроксимации расчетных и экспериментальных данных (рис. 2) установлено, что их отклонение по абсолютному значению не превышало для температуры 8,7 % и для влагосодержания 10,3 %.

Из кинетических кривых ГТО арахиса (рис. 2), полученных экспериментально, выявлено, что продукт достигает конечной влажности $W = 4$ % ($u = 0,04123$ кг/кг) через 850 с. Из решения математической модели численным методом получено значение времени, при котором продукт достигает конечной влажности $W = 4$ %, равное 855 с. В процессе ГТО зерно арахиса достигает температуры денатурации

белков 70 °С через 80 с, а по расчетным данным температура зерна составляет 70 °С через 82 с.

Полученные результаты моделирования с достаточной для инженерных расчетов

точностью отражают кинетические закономерности процесса гидротермической обработки зерна в среде перегретого пара и могут быть использованы для расчета параметров процесса ГТО и проектирования аппаратов для влаготепловой обработки.

Список литературы

1. *Шевцов, А. А.* Моделирование процессов тепломассопереноса при обжарке зерна ячменя перегретым паром [Текст] / А. А. Шевцов, С. В. Куцов, А. Г. Ткачев // Известия вузов. Пищевая технология. – 2010. – № 5-6. – С. 99–101.
2. *Burmester, K., Eggers, R.* Heat and mass transfer during the coffee drying process. Journal of Food Engineering. – 2010. – Vol. 99. – pp. 430-436.
3. *Hernandez, J.A., Heyd, B., Trystram, G.* Prediction of brightness and surface area kinetics during coffee roasting. Journal of Food Engineering. – 2008. – Vol. 89. – pp. 156-163.

УДК 667. 92

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ СУСПЕНЗИЙ INTENSIFICATION OF DRING PROCESSES OF SUSPENSISIONS AND CONSTRUCTION OF DEVICES

Александр Михайлович Воробьев, Геннадий Сергеевич Кормильцин
Alexander M. Vorobjev, Gennadi S. Kormiltsin

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov state technical university, Russia, Tambov
(e-mail: fvd56@mail.ru, gkorm40@mail.ru)

Аннотация: Дан обзор сушилок с активным гидродинамическим режимом и принцип их действия. Показаны их достоинства и недостатки. Приведены результаты исследования процесса сушки в одной из конструкций сушилок.

Abstract: Given the review of drying units with active hydrodynamic mode and the principle of their operation. Presented their merits and defects. Given the results of the research of process of drying in one type of the drying units.

Ключевые слова: интенсификация, сушка, активный режим, инертный материал, закрученный поток.

Keywords: intensification, drying process, active mode, inert material, swirling flow.

Интенсификация процесса сушки требует разработки новых аппаратов, особенно это характерно для обезвоживания термолабильных материалов. К таким материалам относятся суспензии и пасты биопродуктов, азокрасителей, материалов фармацевтической и пищевой промышленности. Для сушки таких продуктов нами разработаны аппараты с активными гидродинамическими режимами [1...4].

Особое место при этом занимают аппараты с закрученными потоками взаимодействующих фаз: сушильный агент- инертный носитель- влажный материал. В качестве сушильного агента используется нагретый воздух, а инертным носителем -гранулы полиэтилена, полиамида- 610 и фторопласта с эквивалентным диаметром частиц 2; 2,5; 3; 5 мм.

В качестве примера рассмотрим конструкцию одного из аппаратов (рис. 1) и результаты исследования процесса сушки в нем суспензии окисленного кукурузного крахмала. Окисленный крахмал используют и в технических целях. В бумажной промышленности он служит для повышения механической прочности бумаги. Данный продукт используют и в текстильной промышленности, он образует на нитях

эластичное и прочное покрытие. Ниже на рисунке приведена схема аппарата, на котором проводились опыты.

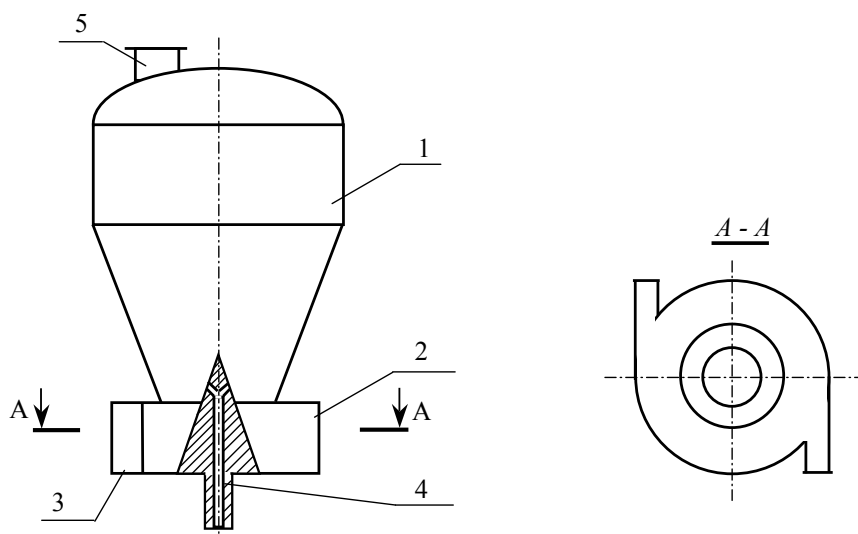


Рисунок 1. Аппарат для сушки суспензий.

Аппарат состоит из цилиндрикоконического корпуса (1), диаметр цилиндрической части которого равен 600мм, а раствор конуса 40° . В нижней части конуса установлен съемный горизонтальный барабан (2) с патрубками (3) тангенциального ввода сушильного агента и форсункой (4) для подачи суспензии влажного материала. В верхней части аппарата вмонтирован патрубок (5) для отвода отработанного сушильного агента и сухого материала.

Аппарат работает следующим образом. В него загружается инертный носитель (фторопластовая крошка) с эквивалентным диаметром частиц 5 мм. В патрубки тангенциального ввода (3) подается сушильный агент (нагретый до 80°C воздух), который приводит инертный носитель во взвешенное состояние, создавая закрученный вращающийся слой. Суспензия влажного материала с помощью форсунки (4) наносится на частицы инерта. Высушенный материал из-за соударений частиц инерта и трения о стенки аппарата скалывается и выносится из аппарата отработанным сушильным агентом на улавливание через патрубок (5). Благодаря активному закрученному слою инертного носителя и влажного материала предотвращается агломерация частиц и обеспечивается более полная отработка сушильного агента.

Исследования показали, что максимальная производительность аппарата по исходному биопродукту (окисленный кукурузный крахмал) составила 12 кг/час при начальной влажности 80% и конечной 9%.

Необходимо отметить, что область применения сушилок с активными гидродинамическими режимами ограничены и не все рассмотренные аппараты, показанные в обзоре [1...4] можно применять для многих влажных материалов.

Сравнительные эксперименты процесса сушки пастообразных материалов (азопигментов) на ленточной сушилке и в аппарате с закрученным слоем показали, что в первом случае готовый сухой продукт необходимо измельчать, а во втором случае он не требует измельчения. Это, конечно, преимущество сушилок с активным гидродинамическим режимом, но необходимо учитывать, что такие аппараты работают с выносом тонкодисперсного готового продукта, что требует применения высокоэффективного пылеулавливающего оборудования.

Попытка высушить в приведенном на рисунке аппарате водного раствора аспаргината магния не дала положительного результата. Этот продукт при сушке до влажности 20-30 % становится вязким, что приводило к агломерации частиц инерта и остановке аппарата.

Кроме того, в нашей практике были попытки использования сушилок с активным гидродинамическим режимом [1...4] для обезвоживания такого вязкого продукта, как

свекловичная патока. Эти опыты дали отрицательные результаты: влажный продукт налипал на внутренние стенки аппарата и инерт, что приводило к агломерации частиц инерта, поэтому перед использованием таких аппаратов необходимо исследовать не только свойства материалов как объектов сушки, но и адгезионные взаимодействия в системе: «влажный материал – инерт – конструкционный материал аппарата».

Список литературы

1. А.с. 1121564 СССР, МКИ F 26 В 17/10.Сушилка для растворов, суспензий и пастообразных материалов / С. П. Рудобашта и др (СССР) № 3599818/03-06, заявл.03.06.83, опуб.30.10.03.84, Бюл.№40.-3 с.:2 ил.

2. 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.: 1 ил.

3. 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.: 5 ил.

4. 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.: 2 ил.

УДК 66.047.6

ТЕПЛОМАССОБМЕН В ПРОЦЕССЕ КОНТАКТНОЙ СУШКИ ТКАНЕЙ HEAT AND MASS TRANSFER IN THE PROCESS OF CONTACT DRYING OF TISSUES

Леонид Иванович Жмакин, Николай Михайлович Шарпар
Leonid I. Zhmakin, Nikolai M. Sharpar

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow
(e-mail: LI_zhmakin@mail.ru, sharpar753@mail.ru)*

Аннотация: В статье дан анализ процессов теплообмена на начальной стадии контактной сушки тканей, предложена приближенная математическая модель, описывающая закономерности испарения влаги и истечения паровой фазы. Процесс испарения влаги описан в рамках одномерной модели в трехслойной системе.

Abstract: In the article the analysis of heat and mass transfer in the initial stage of the contact drying of fabrics is given, an approximate mathematical model describing regularities of moisture evaporation and the expiration of the vapor phase is proposed. The process of moisture evaporation is described within the framework of the one-dimensional model in a three-layer system.

Ключевые слова: массообмен, сушка, ткань, испарение влаги

Keywords: mass transfer, drying, fabric, evaporation of moisture.

В нашей работе для анализа процессов теплообмена на начальной стадии контактной сушки предлагается приближенная математическая модель, описывающая закономерности испарения влаги и истечения паровой фазы. Процесс испарения влаги описывается в рамках одномерной модели в трехслойной системе. Нулевой слой (при $x < 0$) – это высокотеплопроводный материал (обогреваемая стенка) с температурой, превышающей температуру насыщения влаги. Первый (при $0 < x < X$, где X - координата фазового перехода) – слой ткани, из которой испарена капиллярная влага к моменту времени $\tau > 0$ и второй (при $x > X$) - слой, в котором влагосодержание ткани равно исходному. В начальный момент времени ($\tau = 0$) второй слой приводится в контакт с нулевым. При этом $X = 0$ и первый слой отсутствует. Такая нумерация слоев будет использована далее в форме подстрочных индексов. Предполагается, что теплота передается от нулевого слоя к влажной

ткани путем теплопроводности через поверхность контакта, и в точке с координатой X происходит процесс испарения влаги.

Физическая модель испарения в такой постановке представляет собой разновидность задачи Стефана о фазовом переходе. Ограничения, накладываемые в работе на продолжительность начальной стадии сушки, позволяют рассматривать области, занимаемые нулевым и вторым слоями как полуограниченные: $-\infty < x < 0$ и $X < x < \infty$, соответственно. При таком подходе задача может решаться в автомодельной по характерному размеру постановке. Значения коэффициентов переноса приняты постоянными, а миграция влаги под действием капиллярных сил, диффузии и термодиффузии не учитывается. Тогда поставленная задача сводится к решению системы дифференциальных уравнений теплопроводности

$$\frac{\partial t_0}{\partial \tau} = a_0 \frac{\partial^2 t_0}{\partial x^2} \quad \text{при} \quad -\infty < x \leq 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2} \quad \text{при} \quad 0 < x \leq X \quad (2)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} \quad \text{при} \quad X < x \leq \infty \quad (3)$$

где a_i - коэффициент температуропроводности соответствующего слоя. Температуры нулевого и второго слоев в начальный момент времени предполагаются постоянными

$$t_0 = \vartheta_0 \quad \text{при} \quad -\infty < x \leq 0 \quad (4)$$

$$t_2 = \vartheta_2 \quad \text{при} \quad 0 < x < \infty \quad (5)$$

На границе нулевого и первого слоев температуры и тепловые потоки одинаковы, т.е.

$$t_0 = t_1; \quad -\lambda_0 \frac{\partial t_0}{\partial x} = -\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \chi; \quad \text{при} \quad x = 0 \quad (6)$$

Здесь λ_i - коэффициент теплопроводности; а параметр χ - доля поверхности ткани, контактирующей с твердой стенкой (доля опорной поверхности), которая по данным [1] приблизительно равна 0,1...0,15. На границе первого и второго слоев температуры одинаковы и равны температуре насыщения, а тепловые потоки отличаются на величину, затрачиваемую на испарение жидкости в единицу времени

$$t_0 = t_s; \quad t_1 = t_s; \quad -\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} + \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} = r \xi \rho \frac{dX}{d\tau}; \quad \text{при} \quad x = X \quad (7)$$

где r - удельная теплота парообразования; ρ - плотность жидкости; ξ - доля испаряемой жидкости. В силу автомодельности задачи по характерному размеру решение системы уравнений (1) – (3) можно представить в виде

$$t_0 = \vartheta_0 - A [1 + \operatorname{erf}(-\xi_0)] \quad (8)$$

$$t_1 = B - C \operatorname{erf}(\xi_1) \quad (9)$$

$$t_2 = \vartheta_2 + D \operatorname{erfc}(\xi_2) \quad (10)$$

где A , B , C , D - константы. Формулы (8 - 10) записаны с учетом начальных условий (4, 5). Граничные условия (6) дают

$$\vartheta_0 - A = B; \quad \frac{\lambda_0}{\sqrt{a_0}} A = \frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}} \chi C \quad (11)$$

Два первых граничных условия (7) позволяют получить

$$B - C \operatorname{erf}(X) = \vartheta_2 + D \operatorname{erfc}(X) = t_s \quad (12)$$

Значение температуры фазового перехода t_s предполагается постоянным, поэтому равенства (12) будут действительными только в том случае, если координата точки фазового перехода $X \sim \sqrt{\tau}$, например,

$$X = 2\gamma\sqrt{a_1\tau} \tag{13}$$

где γ - константа. Система уравнений (11) – (13) позволяет выразить константы C и D через постоянную γ

$$C = \frac{\vartheta_0 - t_s}{\chi\sqrt{\frac{m_1}{m_0} + \operatorname{erf}(\gamma)}}; \quad D = \frac{t_s - \vartheta_2}{\operatorname{erfc}\left(\gamma\sqrt{\frac{a_1}{a_2}}\right)}; \tag{14}$$

где $m = \sqrt{\lambda\rho c}$ - коэффициент теплоусвоения. Из условий (7) можно получить

$$C \exp(-\gamma^2) - D\sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \exp\left(-\gamma^2 \frac{a_1}{a_2}\right) = \frac{r\xi\gamma\rho\sqrt{\pi}}{c_1\rho_1} \tag{15}$$

Решение нелинейной системы уравнений (14), (15) позволяет найти величину γ . Затем константы C и D рассчитываются по уравнениям (14), а константы A и B – по уравнениям (11). Это позволяет найти температурные поля в слоях по уравнениям (8) – (10).

Рассчитанные таким методом температурные поля для двух моментов времени: $\tau = 1$ с (сплошные кривые) и $\tau = 3$ с (пунктирные кривые) приведены на рис. 1. Изменение температуры в пределах пластины из алюминиевого сплава с коэффициентом теплопроводности $\lambda_0 = 200 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ не превышает 1°C (см. рис. 1а), что по порядку величины совпадает с наблюдавшимся в экспериментах понижением температуры поверхности греющей пластины. Расчеты, выполненные для стальной греющей пластины, показали, что температура ее поверхности понижается примерно на $1,2^\circ\text{C}$. При этом характер изменения температуры остается таким же. Температурные поля во влажном материале (рис. 1б) имеют излом в точке фазового перехода, координата которой растет с течением времени, что и следовало ожидать в соответствии с уравнением (13). Скорость изменения количества молекул в указанном объеме при этом можно описать балансным соотношением

$$\frac{dN}{d\tau} = \frac{dN^+}{d\tau} - \frac{dN^-}{d\tau} \tag{16}$$

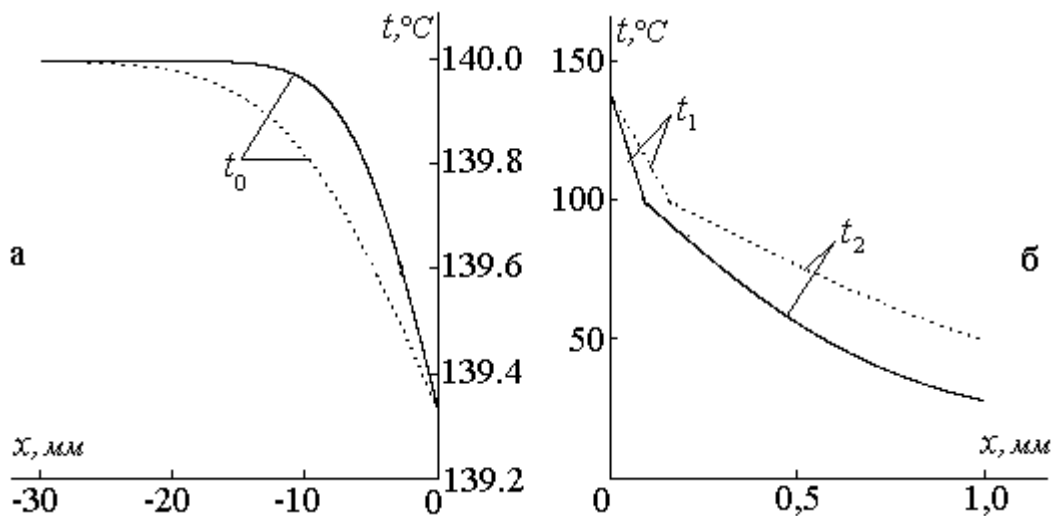


Рис. 1. Температурные поля в греющей пластине и ткани

где N^+ , N^- - количества молекул, поступающих в объем V и покидающих его, соответственно. Скорость изменения первой из них может быть найдена при помощи закона движения фронта испарения (13)

$$\frac{dN^+}{d\tau} = \frac{f_k \xi \rho}{m} \frac{dX}{d\tau} = \frac{f_k \xi \rho \gamma}{m} \sqrt{\frac{a_1}{\tau}} \quad (17)$$

где f_k - площадь сечения, занятая конденсированными фазами, m - масса молекулы.

Скорость убыли количества молекул, обусловленную истечением в окружающую среду, можно найти при помощи закона Дарси

$$\frac{dN^-}{d\tau} = \frac{\kappa \rho_g f \Delta p}{\eta m l} \quad (18)$$

где f - площадь поперечного сечения, κ - проницаемость, η - динамическая вязкость, l - длина канала, ρ_g - плотность газообразной фазы. Изменение давления в объеме V под тканью связывается с изменением количества молекул в этом объеме при помощи уравнения состояния идеального газа в предположении малого влияния изменения температуры

$$\frac{dN}{d\tau} = \frac{V}{kT} \frac{dp}{d\tau} \quad (19)$$

где k - константа Больцмана, T - среднее значение абсолютной температуры. Решая совместно уравнения (16) - (19) и переходя к молярным величинам, получим дифференциальное уравнение относительно избыточного давления Δp

$$\delta \frac{d\Delta p}{d\tau} = \frac{\chi \xi \rho R_\mu \gamma T}{\mu} \sqrt{\frac{a_1}{\tau}} - \frac{\kappa \rho_g R_\mu T}{\mu \eta} \frac{\Delta p}{l} \quad (20)$$

где R_μ - универсальная газовая постоянная, μ - молярная масса. В преобразованиях уравнения (20) было принято $V = \delta f$ и $f_k = \chi f$. Уравнение (20) решалось численно при начальном условии $\Delta p(\tau = 0) = 0$.

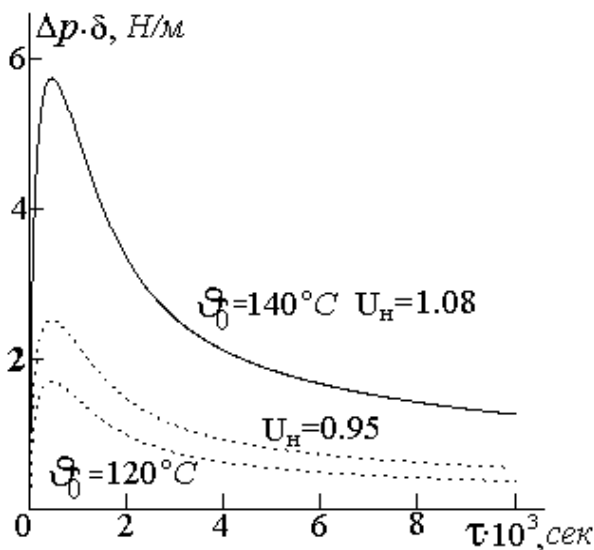


Рис. 2. Изменение давления под тканью (влияние температуры и влагосодержания)

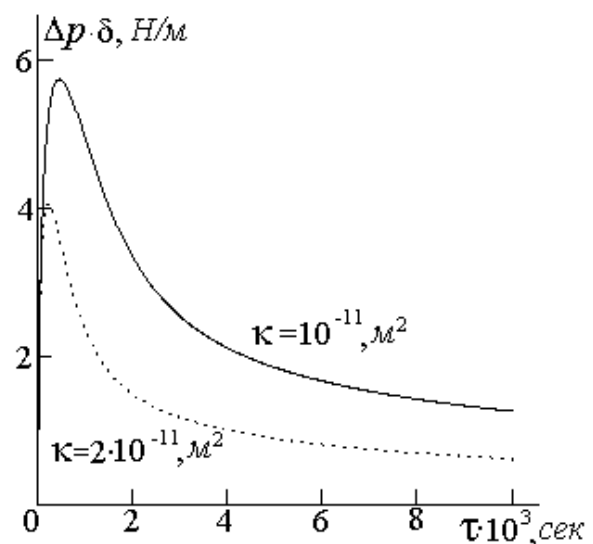


Рис. 3. Влияние проницаемости на давление под тканью

Примеры полученных зависимостей в форме произведения $\delta \Delta p(\tau)$ показаны на рис.2 и 3. Сплошные кривые получены при начальном влагосодержании $U_n = 1,08$, начальной

температуре греющей пластины $\vartheta_0 = 140^\circ\text{C}$ и коэффициенте проницаемости $\kappa = 10^{-11} \text{ м}^2$. Пунктирные кривые получены при тех же значениях параметров за исключением одного из них, величина которого указана на графиках. При вертикальном расположении манометрической трубки величину силы можно представить как $F = s(\Delta p(\tau) - \Delta p_{\text{тр}}(y') - \rho g y)$, а массу жидкости как $M = s \rho y$, и получим следующее уравнение

$$\rho u y'' + \rho (y')^2 + \Delta p_{\text{тр}}(y') + \rho g y = \Delta p(\tau) \quad (21)$$

Рассмотренная выше математическая модель предполагает, что при повышении давления под ткань пар отводится только через поры в окружающую среду, что имеет место и в реальном процессе сушки. В экспериментальной установке он может уходить и через отверстие для измерения давления внутрь импульсной трубки, подсоединенной к микроманометру (повышение давления под ткань приводит к сжатию пара в импульсной трубке и, следовательно, к подтоку в нее пара из-под ткани). Ситуация может усугубиться возможностью конденсации пара в трубке. Судя по значениям продольной и поперечной составляющих коэффициента проницаемости тканей [2], газ может подтекать к отверстию с участка площади радиусом примерно равным 10-кратной толщине ткани. Отсюда можно заключить, что объем пространства под ткань существенно меньше объема импульсной трубки, и, следовательно, влияние рассматриваемого эффекта на результаты измерения не будет пренебрежимо малым.

Найденная зависимость $\Delta p(\tau)$ использовалась для расчета массы пара, отведенной из-

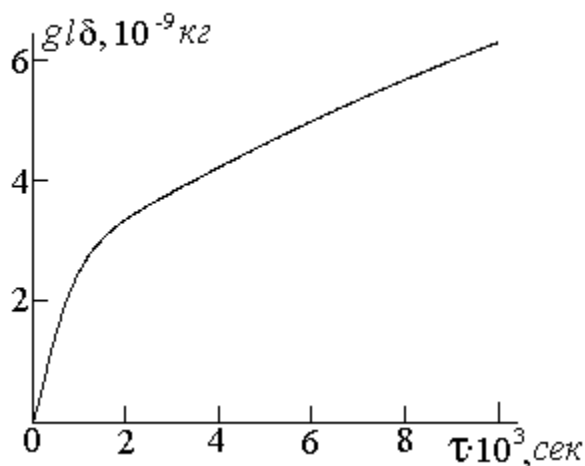


Рис. 4. Масса влаги, отведенная от ткани

под ткани к моменту времени τ , с помощью численного интегрирования уравнения (18), преобразованного к молярным характеристикам. На рис. 4 представлено изменение во времени величины, пропорциональной массе g , отведенной с единицы площади. Быстрое нарастание величины g сменяется более медленным.

Таким образом, в работе предложена приближенная модель процесса интенсивного испарения влаги при контактной сушке тканей, качественно согласующаяся с наблюдавшимися в опытах закономерностями. Модель может быть уточнена после получения более надежных опытных данных.

Список литературы

1. Бунин О.А. Исследование контактной сушки ткани. Труды ИВНИТИ, 1965, т. 27
2. Корнюхин И.П., Пятенков И.В. Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1998, №5.

УДК 664.8.047:536.24

**КИНЕТИКА И ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ
РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**
KINETICS AND MECHANISMS OF THE SPRAY DRYING PLANT MATERIALS

**Юрий Александрович Максименко, Эльвира Рафаэлевна Теличкина,
Надежда Эдуардовна Пшеничная**
Yuri A. Maksimenko, Elvira R. Telichkina, Nadezhda E. Pshenichnaya

Астраханский государственный технический университет, Россия, Астрахань
Astrakhan state technical university, Russia, Astrakhan
(e-mail: amxs1@yandex.ru)

Аннотация: Представлены результаты экспериментально-аналитических исследований кинетики процесса распылительной сушки жидких растительных материалов для последующего анализа, расчета и моделирования процесса сушки. Представлены кривые сушки и скорости сушки. Получена функциональная зависимость скорости процесса сушки от влияющих факторов.

Abstract: Presents the results of experimental and analytical studies of the kinetics of the process spray drying liquid herbal materials for further analysis, calculation and simulation of the drying process. The curves of drying and drying rate are presented. Obtained functional dependence of speed of drying process and the influencing factors.

Ключевые слова: сушка растительных материалов, распылительная сушка, кинетика процесса сушки.

Keywords: drying plant materials, spray drying, kinetics of drying process.

В настоящее время распылительной сушке жидких систем, получаемых при переработке сырья растительного происхождения, уделяется значительное внимание [1]. Для анализа, расчета и моделирования процесса распылительной сушки растительных материалов необходим значительный объем информации о переменных свойствах, форме, размерах, структуре частиц. В настоящее время, современный уровень развития измерительной и вычислительной техники, а также сформированная многочисленными исследованиями база данных результатов, методов исследований и моделирования позволяют ставить и решать задачи более детального изучения сушки в диспергированном состоянии на новом качественном уровне, максимально приближенном к реальным условиям протекания процессов.

Исследование кинетики сушки проводилось для: экспериментального подтверждения ряда положений теории сушки; практической проверки теоретических исследований; комплексного анализа тепломассообменных процессов и разработки математических моделей, адекватных протекающим физическим явлениям. Для анализа кинетики сушки применим традиционный лабораторный метод [2, 3], связанный с отбором проб из зоны сушки на гидрофобное покрытие и дальнейшей регистрацией убыли веса экспериментальных образцов при досушке. Непрерывный процесс сушки производился при прямом контакте распыленного продукта с нагретым воздухом, при этом в установившемся режиме сушки, при постоянных по высоте сушильной камеры параметрах процесса (температура и влажность сушильного агента и продукта), осуществлялся отбор проб витающих частиц продукта по высоте камеры. Пробы продукта отбирались с целью определения степени их обезвоживания на разных стадиях процесса и построения экспериментальных кривых сушки.

В качестве экспериментальных образцов при изучении кинетики были использованы: плодовоовощные пюре с размером частиц 1 – 30 мкм из моркови (начальная влажность $W_n = 0,88$ кг/кг), тыквы ($W_n = 0,92$ кг/кг) и яблока ($W_n = 0,88$ кг/кг); пектиновый растительный экстракт из тыквы, полученный по оригинальной технологии (Патент РФ № 2309607);

водные экстракты корня алтея и корня имбиря (начальная влажность экстрактов перед сушкой $W_n = 0,9$ кг/кг). Конечная влажность продуктов $W_k = 0,05$ кг/кг принята в соответствии с требованиями к физико-химическим показателям сухих растительных материалов и на основании результатов изучения гигроскопических характеристик. Использовалась экспериментальная установка, разработанная на кафедре «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет».

В качестве основных факторов, влияющих на эффективность процесса сушки при проведении экспериментальных исследований с учетом [2, 3, 4, 5] были приняты: температура сушильного агента $T_{с.а.}$, К и начальная температура продукта $T_{прод}$, К. Границы варьирования факторов (таблица 1) установлены из технологических ограничений и возможностей технической реализации экспериментального процесса сушки.

Таблица 1. Факторы и уровни варьирования

Уровни		Факторы	$T_{с.а.}$, К	$T_{прод}$, К
1	Пюре, пектиновый экстракт		423	298
	Экстракты корней алтея и имбиря		443	293
2	Пюре		473	-
	Пектиновый экстракт		473	313
	Экстракты корней алтея и имбиря		473	308
3	Пюре, пектиновый экстракт		523	328
	Экстракты корней алтея и имбиря		503	318

Нижний предел $T_{прод} = 293..298$ К, соответствует температуре хранения плодовоовощных пюре и водных экстрактов, а верхний предел $T_{прод} = 318..328$ К может достигаться предварительным нагревом продуктов перед сушкой, в том числе при вакуум – выпаривании. Остальные факторы приняты постоянными и установлены в результате аналитических расчетов и серии постановочных экспериментов. Экспериментальные исследования кинетики сушки проводились по полному многоуровневому многофакторному плану с помощью вероятностно-статистических методов планирования и обработки данных.

На основе результатов экспериментальных исследований построены кривые сушки продуктов, некоторые из которых представлены на рис. 1.

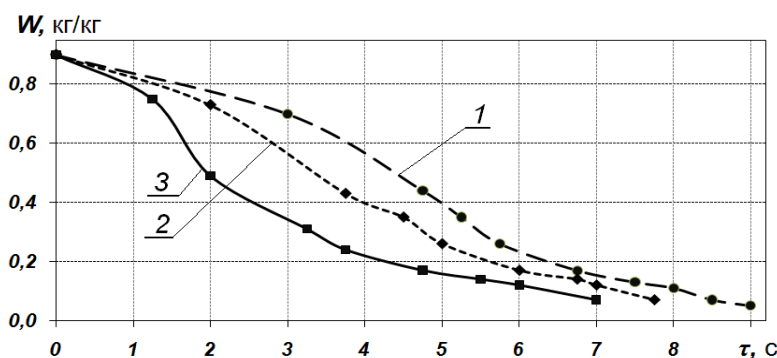


Рис.1. Кинетика распылительной сушки пектинового экстракта при $T_{с.а.} = 423$ К: 1 – при $T_{прод} = 298$ К; 2 – при $T_{прод} = 313$ К; 3 – при $T_{прод} = 328$ К.

Обобщая экспериментальные данные для ряда продуктов получены зависимости скорости $dc/d\tau$ при различных $T_{прод}$:

$$\frac{dc}{d\tau} = -1 \left/ \left[4 \cdot (A_k \cdot T_{с.а.}^2 + B_k \cdot T_{с.а.} + C_k) \cdot (1-c)^3 + 3 \cdot (D_k \cdot T_{с.а.}^2 + E_k \cdot T_{с.а.} + F_k) \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot (G_k \cdot T_{с.а.}^2 + H_k \cdot T_{с.а.} + K_k) \cdot (1-c) + (L_k \cdot T_{с.а.}^2 + M_k \cdot T_{с.а.} + N_k) \right] \right. \quad (1)$$

где $A_k, B_k, C_k, D_k, E_k, F_k, G_k, H_k, K_k, L_k, M_k, N_k$, – кинетические коэффициенты. Размерность кинетических коэффициентов равна отношению размерности функции к размерности аргумента (или произведения аргументов). С учетом, что c , кг/кг, то размерность A_k, D_k, G_k, L_k , – c/K^2 ; B_k, E_k, H_k, M_k – c/K ; C_k, F_k, K_k, N_k – c .

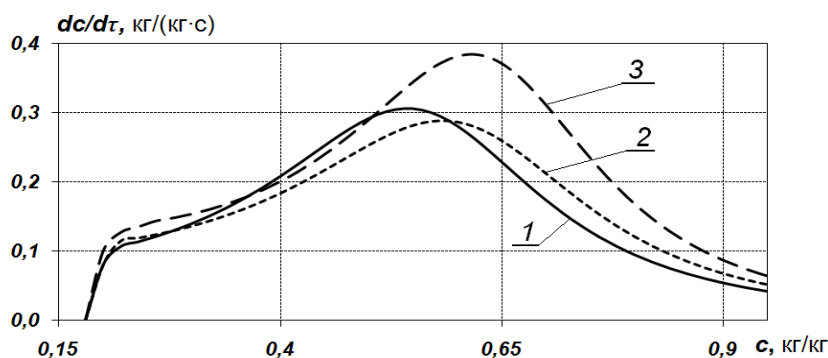


Рис. 2. Кривые скорости распылительной сушки порою из моркови при $T_{prod} = 298K$: 1 – при $T_{c.a.} = 423K$; 2 – при $T_{c.a.} = 473K$; 3 – при $T_{c.a.} = 523K$.

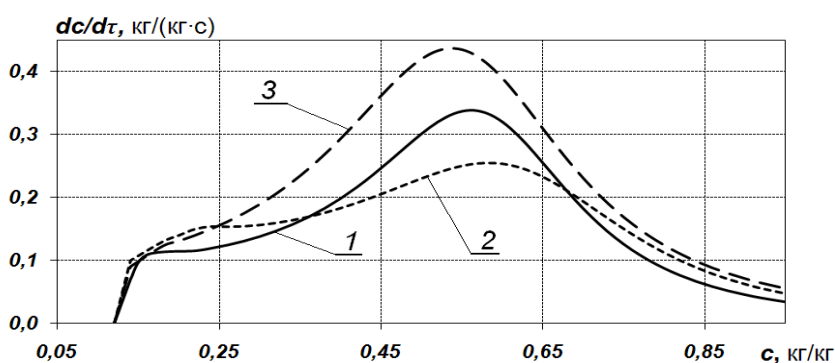


Рис. 3. Кривые скорости распылительной сушки порою из яблока при $T_{prod} = 328K$: 1 – при $T_{c.a.} = 423K$; 2 – при $T_{c.a.} = 473K$; 3 – при $T_{c.a.} = 523K$.

Анализ характера экспериментальных кривых скорости сушки растительных материалов (например, рис. 2 – 3), построенных с использованием (1), позволяет сделать вывод о том, что при интенсивной распылительной сушке зависимость скорости носит экстремальный характер. Отмечается быстрый рост функции до максимального значения в первом периоде с последующим резким падением, что обусловлено процессами формирования капиллярно-пористой структуры частиц продукта при их обезвоживании. Стремительное удаление преимущественно свободной влаги с поверхности частиц за счет интенсивного испарения исключает перегрев продукта в начале процесса. При развитии процесса происходит уменьшение объема частицы и в условиях влаготдачи увеличивается концентрация сухих веществ в частице, что запускает механизм формирования внутренней структуры сухого продукта. В конце первого периода, влажность на поверхности частицы достигает гигроскопического значения. В определенный момент в области точки перегиба происходит плавный переход структуры в капиллярно-пористое тело, в результате чего образуется сеть микрокапилляров, движение пара через которые далее осуществляется путем эффузии. Актуализируются процессы удаления влаги адсорбции при прогреве материала. Во втором периоде, после максимальной скорости, в результате возрастающего несоответствия между расходом влаги, испаряющейся с поверхности частицы, и расходом влаги, поступающей из внутренних слоев, происходит углубление зоны испарения вглубь частицы. Прослеживаются два характерных периода обезвоживания, что не противоречит основным положениям теории сушки.

Для комплексного анализа протекающих процессов и характеристики механизма внутреннего теплопереноса при распылительной сушке необходимы дополнительные

исследования по оценке изменений ряда свойств высушиваемого продукта во времени процесса и моделирование. Дальнейшее развитие получает продолжение экспериментальных исследований и обобщение результатов с целью определения эмпирических коэффициентов функциональных зависимостей для других перерабатываемых продуктов.

Список литературы

1. *Алексамян, И.Ю.* Инновационные технологии переработки сырья растительного происхождения [Текст]/ И.Ю. Алексамян, 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. *Леончик, Б.И.* Особенности моделирования сушки распылением // Вторая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005». Труды конференции. Т. 1. – М.: Издательство ВИМ, 2005. С. 71-73.

3. *Лыков, М.В.* Распылительные сушилки [Текст] / М.В. Лыков, Б.И. Леончик // - М., Машиностроение. 1966 - 330 с.

4. *Максименко, Ю.А.* Совершенствование процесса распылительной сушки продуктов из сырья растительного происхождения [Текст] / Ю.А. Максименко, Э.Р. Теличкина, Ю.С. Феклунова // Естественные и технические науки. №6(84), 2015. Москва: Изд-во «Спутник+», 2015. С. 509 – 511.

5. *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.

УДК 67.017:532.72

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО - И МАССОПЕРЕНОСА В МАТЕРИАЛАХ И ПАКЕТАХ ОДЕЖДЫ И ОБУВИ FEATURES OF HEAT AND MASS TRANSFER IN MATERIALS AND BAGS CLOTHES AND SHOES.

**Антонина Александровна Захарова, Валентина Сергеевна Салтыкова,
Ольга Сергеевна Моргун, Виталий Петрович Комолов
Antonina A. Zakharova, Valentina S. Saltykova, Olga S. Morgun, Vitaly P. Komolov**

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow
(e-mail: dekanat-ximiki@rambler.ru)*

Аннотация: Рассмотрены основные закономерности тепло и массопереноса в системе «человек-одежда-окружающая среда» и «стопа-обувь-окружающая среда». Показано, что паропроницаемость является характеристикой процесса переноса паров влаги через пакет материала и зависит от внешних условий среды, структуры материала и пакета.

Abstract: The paper describes the main regularities of heat and mass transfer in the system "person-clothes-environment" and "stop-footwear-environment". It is shown that the permeability is a characteristic of the process of moving moisture vapor through the package material and depends on external conditions of environment, structure, material and package.

Ключевые слова: массоперенос в капиллярно-пористых телах, теплопроводность материалов и пакетов; паропроницаемость материалов и пакетов.

Keywords: the mass transfer in capillary-porous bodies, the thermal conductivity of the materials and packages; the qualities of materials and packages.

При эксплуатации одежды и обуви перенос теплоты и влаги через пакет материалов в окружающее пространство подчиняется общим закономерностям переноса субстанции через многослойную стенку [1]. Однако для описания этих процессов необходимо учитывать природу и структуру материала, а также возможность создания соответствующего микроклимата в пододежном и внутри-обувном пространстве.

При эксплуатации теплозащитной одежды и обуви эти процессы протекают в 2 периода:

- нестационарный;
- стационарный.

Согласно имитационной модели «человек - теплозащитная обувь-среда» [2,3] длительность нестационарного процесса составляет 20-25 мин в зависимости от граничных условий, структуры пакета, величины тепловыделений и других факторов.

Поэтому изучение некоторых особенностей передачи теплоты и влаги в обувных и одежных пакетах позволит более надежно прогнозировать структуры пакетов обувных и швейных изделий. На кафедре «Промышленная экология и безопасность» с 1980 г. по настоящее время проводятся исследования тепловых свойств материалов обуви и одежды и пакетов из них.

Одежные и обувные материалы по своим свойствам как объекты сушки увлажнения согласно классификации А.В. Лыкова относятся к коллоидным капиллярнопористым телам. Они содержат поры различного вида и размеров, стенки которых эластичны и могут поглощать влагу. Теплота в таких материалах может передаваться теплопроводностью через скелет и микропоры, а в общем случае теплопроводность таких материалов зависит от пористости материала. Чем выше пористость материала (за счет мелких пор), тем меньше теплопроводность. При увеличении пористости материала за счет крупных пор теплопроводность будет увеличиваться, т.к. в этом случае будет значительная конвективная составляющая.

В таблице 1,2 приведены некоторые результаты по определению тепловых свойств обувных материалов и пакетов из них [2,4]

Таблица 1. Тепловые свойства обувных материалов

№ п/п	Материал	Толщина δ мм	Теплопроводность λ Вт/мК	Термическое сопротивление R м ² К/Вт
Кожи верха				
1.	Выросток хромового дубления	1,6	0,113	0,014
2.	Выросток хромового дубления	1,3	0,104	0,012
3.	Яловка	2,2	0,175	0,013
4.	Выросток с нитроакриловым покрытием	1,1	0,127	0,0089
Подкладочные материалы				
1.	Кожа подкладочная	1,8	0,161	0,011
2.	Искусственный мех	1,87	0,075	0,025
3.	Специдиагональ	0,5	0,092	0,006

Таблица 2. Тепловые свойства материалов и пакетов

Пакет	Материал	Толщина δ , мм	Теплопроводность λ , Вт/мК	Термическое сопротивление материала R_m , м ² К/Вт	Термическое сопротивление пакета R_p , м ² К/Вт
1.	Кожа хромового дубления	1,6	0,113	0,042	0,032
	Подкладка тп	0,5	0,092	0,0055	
2.	Выросток с нитроакриловым покрытием	1,1	0,127	0,009	0,0084
	Спецдиагональ	0,5	0,092	0,0055	
3.	Яловка	2,2	0,175	0,0125	0,0155
	Спецдиагональ	0,5	0,092	0,0054	

Из приведенных примеров видно, что действительное термическое сопротивление пакета может быть меньше, расчетного значения. Через пакет будет передаваться больше теплоты, тем ожидается при анализе пакет как двухслойная стенка. Появляется как бы дополнительный «вынос» теплоты из внутриобувного пространства. Такая ситуация характерна для пористых многослойных изоляционных материалов. Образуется дополнительный конвективный перенос теплоты через сквозные поры за счет разности температур внутри обуви и в окружающей среде, поэтому при проектировании теплозащитной обуви (и одежды) необходимо учитывать структуру материалов.

Рассмотрим пути передачи влаги из внутриобувного пространства в окружающую среду в процесс эксплуатации. Практически влага удаляется за счет:

- паропроницаемости паров влаги через пакет материала обуви (т.е. за счет массопроводности пакета);
- вытеснения влажного воздуха через неплотности между обувью и стопой;
- при разности давлений воздухопроницаемости влажного воздуха через пакет материала $\Delta P = P_n - P_{атм}$, где P_n – давление внутри обувного пространства, Па, мм Hg; $P_{атм}$ – давление в окружающем пространстве, Па, мм Hg.

Паропроницаемость Π , которую используют как характеристику данного материала, представляет собой скорость передачи влаги через материал под действием разности влажности воздуха под материалом и над ним. Под материалом поддерживается влажность воздуха $\varphi = 100\%$, над материалом $\varphi = 0\%$. Величина паропроницаемости Π зависит для данного конкретного материала от его структуры и разности относительной влажности внутри обувного пространства и окружающей среды. Величина паропроницаемости, определенная по методике, будет существенно отличаться от паропроницаемости в реальных условиях, когда уменьшается движущая сила процесса. Например, паропроницаемость спецдиагонали ткани «Тайна» при относительной влажности окружающей среды $\varphi_{окр}$, т.е. $\Delta\varphi = (100 - \varphi_{окр})\%$ приведена в таблице 3:

Таблица 3. Влияние относительной влажности воздуха на паропроницаемость материалов

	$\varphi_{окр}$, %	0%	1,2%	48%	71%	90%
Спецдиагональ арт 3515	Π	3,28	2,70	1,66	1,52	1,43
Ткань «Тайна» арт 4С-150		2,80	2,61	2,50	1,80	1,48

Для пакетов одежды и обуви паропроницаемость не является прогнозируемой величиной, методика определения паропроницаемости включает в схему стационарного переноса три этапа: перенос паров влаги из ядра влажного воздуха стакана к внутренней поверхности образца - перенос паров влаги от внутренней поверхности образца к наружной через толщину материала перенос воздуха от наружной поверхности материала в эксикатор. Эти этапы являются элементарными видами массопереноса: массоотдачей (конвективной диффузией) и массопроводностью. Рассмотренная схема, элементарные виды переноса и их последовательность полностью соответствуют процессу массопередачи.

В таблице 4 представлены результаты опытов по определению паропроницаемости единичных материалов и 3-х слойных пакетов из них.

Таблица 4. Паропроницаемость материалов и пакетов

Характеристика	Подкладка на коже	Пакет из подкладочной кожи (3 слоя)	Кожа хромового дубления	Кожа хромового дубления (2 слоя)	Ткань хлопок	Пакет из хлопковой ткани (3 слоя)
Толщина $\delta \cdot 10^3$	0,8	2,4	1,2	2,3	0,3	0,9
Паропроницаемость Пкг/м ² ч	12,00	7,32	3,10	1,76	17,13	16,20

Как показали опыты, проведенные на кафедре «Промышленной экологии и безопасности», величина паропроницаемости практически не является прогнозируемой характеристикой. Например, увеличение толщины одного и того же материала в два раза при прочих условиях в одном случае ведет к снижению паропроницаемости примерно в два раза, а в другом – примерно в полтора раза, а в третьем – паропроницаемость практически остается неизменной величиной.

Если рассмотреть баланс влаги, передаваемой от стопы в окружающую среду количество влаги, которая передает паропроницаемостью от стопы в окружающее пространство, составляет 5-10%, а сорбция влаги материалами пакеты 50-60%.

Поэтому для создания комфортных условий в теплозащитной одежде и обуви необходимо прогнозировать состав пакета с учетом всех массообменных и тепловых свойств материалов пакетов: теплопроводность, паропроницаемость при конкретных условиях эксплуатации, условие эксплуатации, сорбционные характеристики и т.д.

Список литературы

1. Захарова А. А., Бахшиева Л.Т., Кондауров Б.П., Салтыкова В.С. и др. Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие для вузов // Под редакцией А.А. Захаровой. – М.: Издательский центр «Академия», 2006 –528 с.
2. Костылева В.В., Захарова А.А. Оценка теплового состояния стопы в теплозащитной обуви на основе имитационной модели «Стопа – теплозащитная обувь – окружающая среда» // Обувь, производство, качество, рынок, 2005 - № 7, с. 38.
3. Осина Т.М., Михайлов А.Б., Михайлова И.Д., Жихарев А.П. Особенности математического моделирования нестационарного процесса теплообмена в системе «стопа-обувь-окружающая среда» // Дизайн и технология, 2009 -№ 11, с 91.
4. Бахшиева Л.Т., Салтыкова В.С., Захарова А.А. и др. «Тепловые и массообменные свойства материалов легкой промышленности»: монография. – М.: ФГБОУ ВПО МГУДТ, 2015. - 140 с.

УДК 664.723

РАСЧЕТ СУШКИ ЧАСТИЦ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ ПО ЛОКАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ СОСТОЯНИЯ
CALCULATION OF PARTICLE DRYING PROCESS IN FLUIDIZED BED BASED ON THE LOCAL FEATURES OF STATE

Андрей Васильевич Митрофанов, Арнольд Фигерар Камело
Andrey V. Mitrofanov, Arnold F. Kamelo

*Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
 Россия, Иваново*
Ivanovo State Power Engineering University, Russia, Ivanovo
(e-mail: and2mit@mail.ru)

Аннотация: Исследование направлено на обоснование ячеечной модели для сушки картофеля в кипящем слое. Ячеечная схема была дополнена эмпирическими зависимостями. Полученные расчетные результаты находятся в хорошем соответствии с экспериментальными значениями.

Abstract: The study is intended to validation of the cell model of potato drying in fluidized bed. The empirical correlation was integrated into the cell calculation scheme. The obtained calculation results are in good agreement with the experimental data.

Ключевые слова: кипящий слой, цепи Маркова, сушка, картофель.

Keywords: fluidized bed, Markov chains, drying, potato.

Картофель является одной из главных сельскохозяйственных культур, объем производства которой в России остается стабильно высоким. Комплексная переработка картофеля в широкий ассортимент продуктов длительного хранения эффективна и целесообразна, о чем свидетельствует как зарубежный, так и отечественный опыт [1-3].

Одним из переделов такой переработки является сушка [1-3], реализуемая, в том числе, в аппаратах с псевдооживленным слоем [1,3]. Однако имеющиеся модели псевдооживления далеко не всегда отвечают необходимым требованиям по точности прогнозирования, так как включают в себя трудновыполнимые даже для научной лаборатории идентификационные процедуры [4-5]. В результате предлагаемые модели, комплексно описывающие протекание технологического процесса, оказываются не восприняты инженерной практикой, а режимные параметры работы оборудования выбираются по эмпирическим и полуэмпирическим зависимостям.

Таким образом, остается актуальной разработка моделей, сочетающих быстроту вычислительных операций с достаточной для инженерных расчетов точностью. В настоящей работе предпринята попытка адаптировать предложенную ранее модель [4], основанную на теории цепей Маркова, для описания процесса сушки частиц картофеля в кипящем слое.

В основу модели положена ячеечная схема: аппарат представлен как совокупность из n ячеек, а изменение векторов состояний рассматривается в дискретные моменты времени $t_k=(k-1)\Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода, k – номер итерационного перехода (целочисленные значения времени).

Эволюция векторов состояний оживающего воздуха и частиц твердой фазы описывается рекуррентными матричными равенствами

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

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

где \mathbf{S}_p и \mathbf{S}_g – векторы-столбцы объемного содержания частиц и воздуха в ячейках, \mathbf{P}_p^k и \mathbf{P}_g^k – переходные матрицы для частиц и газа, зависящие от текущих векторов состояния и меняющиеся на каждом переходе, \mathbf{S}_{gf} – вектор источников оживающего агента (при подаче

только через газораспределительное устройство снизу содержит единственный ненулевой элемент в первой ячейке, равный объему газа, подаваемому в нее за один итерационный переход).

Матричные равенства (1)-(2) описывают перенос вдоль цепей любого аддитивного свойства, связанного с частицами и газом. Кроме того предусмотрен обмен теплотой и влагой между сходственными ячейками цепей. Расчетная схема модели и детальное ее описание приведено в работе [4].

Сама по себе ячеечная формулировка задачи основана на известных балансовых соотношениях, которые предопределяют получение достаточно правдоподобных результатов. Однако для количественного описания процесса необходима идентификация, по крайней мере, основных параметров модели. В работе [4] была предложена эмпирическая зависимость для коэффициента сопротивления частиц, позволяющая модели с достаточной для инженерных задач точностью прогнозировать расширение слоя. Применительно к процессу сушки в качестве параметров идентификации были также подобраны эмпирические зависимости для определения усадки, тепло- и массоотдачи.

Для расчета коэффициента межфазного теплообмена α в кипящем слое использована эмпирическая зависимость, полученная в [5]:

$$Nu = 0,017 \cdot Pr \cdot Re^{0,991},$$

где Nu – критерий Нуссельта ($Nu = \alpha \cdot d / \lambda$; d – диаметр ожижаемой фракции; λ – коэффициент теплопроводности материала частиц); Re – критерий Рейнольдса ($Re = w \cdot d / \nu$; w – локальная скорость обтекания частиц воздухом; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха).

При описании межфазного массообмена используется допущение о равенстве критериев Нуссельта и Шервуда ($Sh = \beta \cdot d / D \cdot \rho$; где β – коэффициент массоотдачи, D – коэффициент диффузии, ρ – плотность ожижающей среды) [3-5].

Объемная усадка картофеля имеет линейную зависимость от влагосодержания [2]:

$$V = V_c(1 + \beta_v \cdot X),$$

где V – объем частицы в любой момент сушки, $см^3$; V_c – объем частицы абсолютно сухого материала, $см^3$; β_v – коэффициент объемной усадки (для картофеля – 0,625) [2].

Экспериментальная часть работы была направлена на проверку работы предложенной модели. Кубики картофеля со стороной $L=5$ мм высушивались в цилиндрическом аппарате (внутренний диаметр $D=100$ мм) при постоянном расходе (расходная скорость $W_0=3,75$ м/с) и температуре ($45^\circ C$) сушильного агента. Газораспределительная решетка была выполнена в виде дна быстростъемного тонкостенного стакана, вставляемого внутрь аппарата, что позволяло быстро извлечь

весь материал для взвешивания и определения среднего влагосодержания частиц. В процессе сушки периодически выполнялись измерения высоты кипящего слоя, а затем проводились выгрузка материала из слоя для взвешивания и измерения линейных размеров 10 частиц. Результаты сравнения расчетно-экспериментальных данных приведены на рис. 1. и рис. 2. На рис. 1. показаны расчетные (линии) и экспериментальные (маркер \circ) значения размеров частиц.

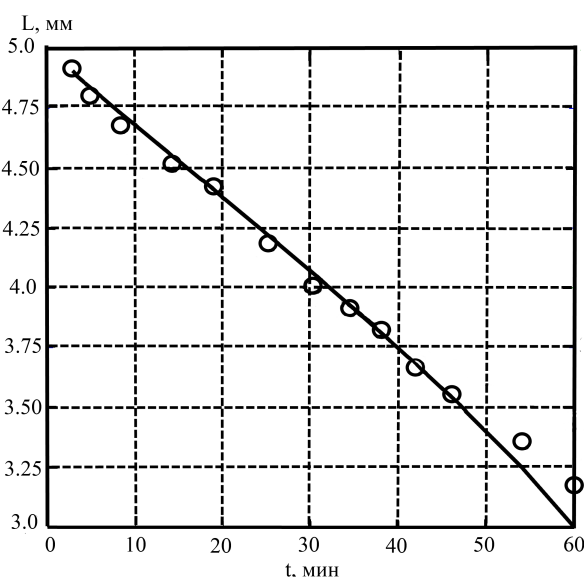


Рис. 1. Расчетно-экспериментальные значения усадки частиц картофеля в процессе сушки в кипящем слое.

На рис. 2. показаны расчетные (кривая 1) и экспериментальные (маркер ○) значения высоты слоя и соответствующие им значения влагосодержания частиц (линия 2 – расчетные значения, маркер □ – экспериментальные значения).

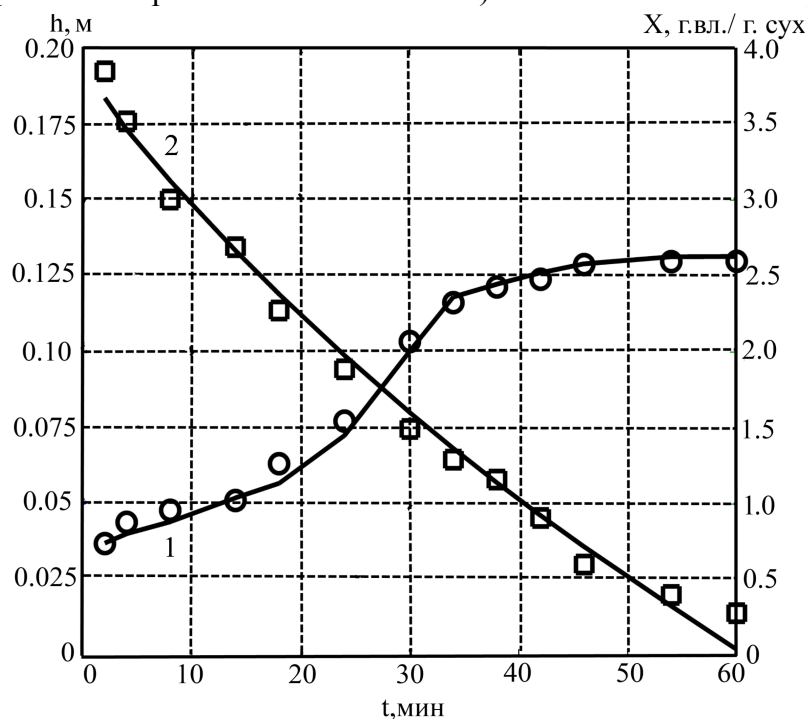


Рис. 2. Кинетика конвективной сушки картофеля и изменения высоты кипящего слоя.

Таким образом, предложенная ячеечная математическая модель в сочетании с приведенными эмпирическими зависимостями позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью описывать процесс сушки картофеля в кипящем слое, что позволяет ее рассматривать как достоверную научную основу инженерного компьютерного метода расчета этого процесса.

Список литературы

1. Серпова О.С., Борченкова Л.А. Ресурсосберегающие технологии переработки картофеля: Науч. ан. обзор. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 84 с.
2. Киселева Т.Ф. Технология сушки: Учебно-методический комплекс / Кемерово. Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. 2007. 117 с.
3. Handbook of Industrial Drying, 3rd ed. / ed. by A.S. Mujumdar. LLC. CRC Precc, 2006. 1312 p.
4. Mizonov V., Mitrofanov A., Ogurtzov A., Tannous K. Modeling of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains // Particulate Science and Technology: An International Journal. – 2014. – Vol. 32 (2). – P. 171–178.
5. Овчинников Л.Н. Моделирование процесса сушки минеральных удобрений во взвешенном слое // Изв. Вузов «Химия и химич. технология». – 2009. – Т. 52. – Вып. 7. – С. 122-124.

УДК 664.723.047.46

**КОМБИНИРОВАННАЯ МИКРОВОЛНОВАЯ СУШКА ЗЕРНА
COMBINED MICROWAVE DRYING OF GRAIN****Ирина Леонидовна Бошкова, Наталья Викторовна Волгушева,
Тамара Юрьевна Дементьева****Irina L. Boshkova, Natalya V. Volgusheva, Tamara Y. Dementeva**

*Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, г. Одесса
Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine, Odessa
(e-mail: ira_boshkova@mail.ru)*

Аннотация: Приведены результаты исследований процесса сушки зерна при микроволново-конвективном подводе энергии в непрерывном и циклическом режиме. Определено влияние длительности продувки слоя зерна в циклическом режиме на удельные затраты энергии и скорость сушки. Представлены обобщающие зависимости для расчета скорости сушки. Установлено, что оптимальной является микроволново-конвективная сушка с непрерывной продувкой воздухом.

Abstract: Results of research of the drying process of grain during microwave-convective energy supply in a continuous and cyclic operation are presented. The effect of the duration of the purge of grain's layer in cyclic operation on the specific energy consumption and the drying rate are determined. Generalized equations to calculate the drying rate are given. It was found that the optimum is microwave-convection drying with continuous purging air.

Ключевые слова: сушка; нагрев, зерно, удельный расход энергии, микроволновая энергия, эффективность.

Keywords: drying; heat, grain, specific energy consumption, the microwave energy efficiency.

Исследования микроволново (МВ) – конвективной сушки зерна пшеницы [1] показали, что длительность процесса сушки при наличии осциллирующего микроволнового энергоподвода сокращается в 3,5 раза по сравнению с конвективной сушкой. При исследовании кинетики сушки зерна гречихи [2] получены убедительные доказательства применимости микроволновых технологий и целесообразности разработок микроволновых сушилок. В [3] подчеркивается эффективность микроволновой обработки для сушки семенного зерна. При сушке зерна в МВ поле удачно сочетаются процессы удаления влаги и дезинсекции, дезинфекции [4]. Внутренние источники теплоты, возникающие при МВ-нагреве, приводят к повышению температуры и давления внутри зерна и к значительному ускорению перемещения влаги из внутренних слоев материала к поверхности [5]. При конвективном методе сушки температура на поверхности зерна выше, чем внутри, и градиенты температуры, и соответственно, давления препятствуют процессу перемещения влаги к поверхности. Нагрев материала в МВ поле приводит к обратному результату: температура внутри материала становится выше, чем на поверхности, поэтому градиенты температуры и давления содействуют ускорению процесса сушки.

Цель исследований – установить, какой способ подвода энергии (микроволновой, микроволново-конвективный циклический и непрерывный) и какие режимные параметры обеспечивают высокую интенсивность процесса сушки и необходимое качество зерна при минимальных энергозатратах. Для решения этих задач при каждом способе проводили эксперименты при различных режимах. При обработке опытных данных определяли закономерности изменения среднеинтегральных влагосодержаний и температур, скорость сушки, затраты энергии на 1 кг испаренной влаги.

Методика проведения опытов заключалась в следующем. В микроволновую установку загружалось 100 г зерна (овес) с начальным влагосодержанием 0,2 кг/кг. Сушка зерна проходила в циклическом режиме – периоды МВ нагрева чередовались с периодами продувки, и в непрерывном режиме – МВ нагрев сопровождался продувкой слоя воздухом. Длительность периода МВ нагрева во всех опытах при циклической сушке была одинакова и составляла 10 с, мощность магнетрона 600 Вт. Длительность периода продувки была 10, 20 и 30 с. Температура воздуха составляла 20 °С, скорость фильтрации 1 м/с, начальная температура зерна 20 °С.

Получено, что удельные затраты энергии при длительности продувки ненагретым воздухом в течение 10 с составили 9,07 МДж/кг, Средняя скорость сушки за весь период $N = 0,00043 \text{ с}^{-1}$. Средняя скорость МВ сушки $N_{MB} = 0,000343 \text{ с}^{-1}$, средняя скорость за периоды продувки $N_K = 0,000483 \text{ с}^{-1}$.

Наличие периодов продувки не оказало существенного влияния на качественный вид кривой влагосодержания, а температурная кривая имеет пульсирующий характер, максимумы которой соответствуют МВ подводу энергии, а минимумы – продувке.

Удельные затраты энергии при длительности продувки ненагретым воздухом в течение 20 с составили 9,68 МДж/кг, скорость сушки $N = 0,000274 \text{ с}^{-1}$. Средняя скорость МВ сушки $N_{MB} = 0,000201 \text{ с}^{-1}$, средняя скорость в период продувки $N_K = 0,000278 \text{ с}^{-1}$.

Удельные затраты энергии при длительности продувки ненагретым воздухом в течение 30 с составили 8,96 МДж/кг, скорость сушки $N = 0,000224 \text{ с}^{-1}$. Средняя скорость МВ сушки $N_{MB} = 0,000157 \text{ с}^{-1}$, средняя скорость в период продувки $N_K = 0,000233 \text{ с}^{-1}$.

Скорость сушки в периоды продувки ненагретым воздухом с увеличением их длительности уменьшается. Так, при соотношении 10 с МВ – 10 с продувка средняя скорость сушки составляла $4,1 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, при 10 с МВ – 20 с продувка средняя скорость сушки составляла $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, при 10 с МВ – 30 с продувка средняя скорость сушки составляла $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Это объясняется заметным снижением температуры материала в период продувки холодным воздухом.

При увеличении длительности продувки τ_n с 10 с до 30 с удельные энергозатраты практически не изменились.

Результаты по циклической микроволново-конвективной сушке в условиях продувки слоя воздухом, нагретым до температуры $t_{\text{воздуха}} = 50^\circ\text{C}$, получены при начальной температуре зерна составляла $t_{\text{зерна}} = 20^\circ\text{C}$, мощность магнетрона $P = 600 \text{ Вт}$. Длительность периода подвода микроволновой энергии всегда составляла 10 с. Зерновой материал – овес.

Во всех этих опытах средняя скорость сушки при продувке выше, чем при МВ нагреве. При этом увеличение длительности продувки приводит к уменьшению скорости сушки как в период МВ подвода, так и в период продувки, удельные затраты примерно равны. Таким образом, первый режим является предпочтительным.

Данные по сушке нагретым воздухом: при длительности МВ нагрева 10 с и длительности продувки 10 с средняя скорость МВ сушки $N_{MB} = 0,000257 \text{ с}^{-1}$, средняя скорость в период продувки $N_K = 0,000533 \text{ с}^{-1}$; при длительности МВ нагрева 10 с и длительности продувки 20 с средняя скорость МВ сушки $N_{MB} = 0,000124 \text{ с}^{-1}$, средняя скорость в период продувки $N_K = 0,000432 \text{ с}^{-1}$. Т.к. скорость сушки в первом случае была выше, а удельные затраты ниже, то он является предпочтительным.

Сопоставление экспериментальных данных приводит к выводу, что при продувке как нагретым, так и ненагретым воздухом вначале скорость сушки выше в периоды продувки, в конце – значительно усиливается скорость сушки в период МВ нагрева, причем для ненагретого воздуха скорость МВ сушки становится больше, чем в периоды продувки. При использовании нагретого воздуха температура в конце эксперимента температура материала была выше на 10–20 °С, по сравнению с ненагретым.

При одновременном МВ-конвективном подводе исследовалось влияние длительности процесса, скорости продуваемого воздуха, температуры, мощности магнетрона на конечные температуру, влагосодержание и удельные затраты энергии. Материалом для исследования, как и в предыдущих опытах, был овес, масса засыпки – 100 г, начальное влагосодержание 20%.

Удельные затраты энергии при продувке нагретым воздухом с температурой 50 °С увеличиваются (по сравнению с продувкой ненагретым воздухом) на 49 % и на 89 % - при температуре 70 °С.

Увеличение скорости воздуха в 1,86 раз увеличивает скорость сушки в 1,35 раз (за 30 с) и 1,1 раз (за 60 с), способствует снижению затрат энергии в 1,36 раз (за 30 с) и 1,07 раз (за 60 с).

С увеличением продолжительности процесса скорость сушки и температура материала возрастают, а удельные затраты снижаются. Особенно заметно указанные величины изменяются при увеличении длительности сушки от 30 с до 60 с. Однако при $\tau = 60$ с и $\tau = 90$ °С наблюдается перегрев материала.

В табл. 1 приведены данные по сушке при режимах, обеспечивающих наиболее благоприятные характеристики процесса в каждом из исследуемых способов подвода теплоты (микроволновом, микроволново-конвективном циклическом и микроволново-конвективном непрерывном).

Таблица 1. Характеристики процессов сушки при разных способах подвода энергии. Выходная мощность магнетрона 600 Вт.

Режим	Вид и режим подвода энергии	Скорость сушки, с ⁻¹	Конечная температура, °С	Удельные затраты энергии, МДж/кг
I	МВ непрерывный $\tau_{\Sigma} = 30$ с.	$4,5 \cdot 10^{-4}$	81,7	15,79
II	МВ-конвективный, циклический $\tau_{\Sigma} = 130$ с, $\tau_{MB} = \tau_{K} = 10$ с, $t_{B} = 20$ °С, $w_{B} = 1$ м/с.	$4,3 \cdot 10^{-4}$	80,5	9,07
III	МВ-конвективный, одновременный $\tau_{\Sigma} = 60$ с, $t_{B} = 19$ °С, $w_{B} = 0,9$ м/с	$12,7 \cdot 10^{-4}$	71	5,65

Сравнение сушки при микроволновом и при микроволново-конвективном непрерывном подводе показывает, что увеличение скорости продуваемого воздуха и его температуры способствует увеличению скорости сушки. Этот результат отражается зависимостью (1), которая обобщает соответствующие экспериментальные данные:

$$\frac{N_{MB-K}}{N_{MB}} = 1 + 0,0003937 Re^{0,8} \left(\frac{t_B}{t_{o.c.}} \right)^{1,04}, \text{ с}^{-1} \quad (1)$$

где N_{MB-K} – скорость сушки при микроволново-конвективном подводе энергии, N_{MB} – при микроволновом подводе, t_B – температура воздуха, продуваемого сквозь слой материала, $t_{o.c.}$ – температура окружающей среды. Формула справедлива с погрешностью 5,7 % при числах Рейнольдса до $Re = 4500$ и температурах продуваемого воздуха в пределах $t_B = 19 \div 70$ °С.

Зависимость скорости сушки зерна от массы загрузки и полезного теплового потока при микроволновом подводе энергии определена на основе обобщения экспериментальных данных:

$$N_{MB} = 1,58 \cdot 10^{-7} (q_m)^{1,17} \text{ с}^{-1} \quad (2)$$

где q_m - удельный тепловой поток, получаемый как отношение теплоты, поглощенной материалом (полезный тепловой поток), к массе загрузки. Для количественной оценки полезного теплового потока, т.е. теплоты, затрачиваемой на нагрев материала и испарение влаги, рекомендуется использовать соотношение, связывающее выходную мощность магнетрона с КПД микроволновой камеры [6].

Сопоставление основных характеристик (скорости сушки, температур материала, удельных затрат энергии, эффективности использования подведенной энергии) процессов сушки при различных способах подвода энергии, свидетельствует о том, что оптимальным является одновременный МВ-конвективный способ подвода.

ВЫВОДЫ

Оптимальным является одновременный МВ-конвективный способ подвода энергии, при котором достигаются максимальная скорость сушки, минимальные удельные затраты энергии и температура материала не превышает допустимую.

Продувка через слой сушильного агента одновременно с МВ нагревом интенсифицирует межкомпонентный тепло- и массообмен, ускоряет испарение влаги, перемещающейся из объема зерен к их поверхности. В результате существенно (почти втрое) возрастает скорость сушки, снижается продолжительность процесса и удельные энергозатраты (примерно на 40 %).

Список литературы

1. Ауэрман Л. Я., Губиев Ю. К., Пруидзе Э. Г. СВЧ-конвективная сушка зерна пшеницы // Известия вузов, Пищевая технология. 1984. №3. С. 54.
2. Волгушева Н.В. Кінетика сушіння щільного шару дисперсного матеріалу (на прикладі гречки) при різних способах підведення теплоти // Автореф. дисс. канд. Техн. наук. Одеса: ОГАХ, 2005. 12с.
3. Калинин Л. Г., Сердюк Л. В., Овсянникова Л. К., Орлова С. С. Эффективность использования микроволновой энергии для сушки семенного зерна // Хранение и переработка зерна. 1999. №2. С. 9.
4. Юсупова Г. Г. Влияние электромагнитного поля СВЧ на микроскопические грибы и их метаболиты // Хранение и переработка сельхозсырья. 2003. №12. С. 67.
5. Metaxas A.S., Meredith R.J. Industrial Microwave Heating. London: Peter Perigrinus, 1983. 156 p.
6. Бошкова И.Л. Интенсификация процессов тепломассопереноса в растительных материалах при действии микроволнового электромагнитного поля. Автореф. дисс. ... докт.техн.наук. Одесса: ОНАПТ, 2015. 46 с.

УДК 664.8.047:536.24

**КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШИЛКА ДЛЯ
ЖИДКИХ И ПАСТООБРАЗНЫХ ПИЩЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ
CONVECTIVE-RADIATION SPRAY DRYER FOR LIQUID AND PASTE-LIKE
FOOD MATERIAL**

**Игорь Юрьевич Алексанян, Юрий Александрович Максименко,
Юлия Сергеевна Феклунова, Надежда Эдуардовна Пшеничная
Igor Y. Aleksanyan, Yuri A. Maksimenko, Juliy S. Feklunova, Nadezhda E. Pshenichnaya**

*Астраханский государственный технический университет, Россия, Астрахань
Astrakhan state technical university, Russia, Astrakhan
(e-mail: amxs1@yandex.ru)*

Аннотация: Представлена рациональная конструкция распылительной сушилки с конвективно-радиационным энергоподводом для жидких и пастообразных пищевых материалов. Отличительной особенностью предложенного решения является дополнительный радиационный инфракрасный энергоподвод при конвективной распылительной сушке пищевых материалов. Конвективная составляющая позволяет обеспечить высушивание частиц при активном аэродинамическом контакте с сушильным агентом. Радиационная составляющая позволит смягчить температурные режимы сушки.

Abstract: Presents rational design of a spray dryer with convective-radiative energy input for liquid and paste-like food material. During the development of spray dryer taken into account the results of numerous experimental and analytical studies, including analysis of scientific-technical and patent literature. A distinctive feature of the proposed solution is an additional infrared radiation energy input during convective spray drying of food materials. The convective component helps to ensure the drying of the particles with the active aerodynamic contact with a drying agent. Radiation component will mitigate temperature regimes of drying.

Ключевые слова: сушильная техника, процессы и аппараты пищевых производств, распылительная сушка.

Keywords: drying technology, processes and equipment for food production, spray drying.

Рационализации операции сушки жидких и пастообразных пищевых материалов уделяется значительное внимание, так как обезвоживание в большей степени определяет стоимость готового продукта и, кроме того, оказывает влияние на качественные показатели товарной продукции [1,2 и др.]. Распылительные сушильные установки широко применяются в пищевых технологиях при производстве сухих дисперсных материалов. Практический интерес представляют результаты исследований по разработке и внедрению рациональных конструкций распылительных сушилок позволяющих реализовать на практике нестационарные аэродинамические режимы при сушке [3, 4, 5 и др.]. Для ряда жидких пищевых растительных материалов (экстракты, плодово-овощные соки и т.п.) технология сушки распылением применяется ограниченно, так как не обеспечивает надежное, эффективное и качественное высушивание [1].

На основе анализа научно-технической и патентной литературы, результатов комплекса экспериментальных исследований сделан вывод, что перспективным направлением является разработка конструкторского решения для организации процесса распылительной сушки пищевых материалов (рисунки 1 и 2) за счет комбинирования конвективного и радиационного энергоподвода при активном вихревом аэродинамическом контакте продукта и сушильного агента, что позволяет увеличить интенсивность процесса, снизить температуру сушильного агента и, как следствие, температуру продукта для обеспечения качества сухих дисперсных материалов.

Устройство работает следующим образом. Исходный продукт, подвергаемый сушке, подается распылителем 3 в объем сушильной камеры 1. Ввод сушильного агента осуществляется по патрубкам 2 и 4. В сушильной камере 1 осуществляется комбинация прямого тока и перекрестного тока при контакте сушильного агента и продукта, за счет дополнительной перекрестной подачи сушильного агента в щелевые зазоры между перегородками 8. Распыленные частицы продукта при контакте с сушильным агентом и инфракрасным излучением высыхают, отбираются через систему отсоса 5, отделяются от потока отработавшего сушильного агента в циклоне 6 и отбираются через сборники сухого продукта 7.

Благодаря вводу сушильного агента через патрубок 4 по касательной к окружности сушильной камеры 1 и наличию в ней вертикальных прямоугольных перегородок 8, осуществляется дополнительная равномерная подача сушильного агента в щелевые зазоры между перегородками, при этом распыленные частицы продукта, увлекаемые потоками теплоносителя, начинают вращаться относительно оси сушильной камеры и совершают движения по нисходящей спиралевидной траектории. Таким образом, достигается активный вихревой аэродинамический контакт продукта и сушильного агента в сушильной камере, что позволяет увеличить время пребывания распыленных частиц продукта в сушильной камере.

Спиралевидная траектория движения частиц определяет большее время контакта продукта с сушильным агентом в сушильной камере по сравнению с традиционным прямолинейным движением вниз, что позволяет либо уменьшить высоту сушильной камеры при заданной производительности, либо увеличить интенсивность процесса и производительность установки.

Вертикальные прямоугольные перегородки 8 и сушильная камера 1 выполнены одинаковыми по высоте для равномерного подвода сушильного агента и выравнивания температуры сушильного агента в сушильной камере 1, в результате чего достигается увеличение интенсивности процесса сушки.

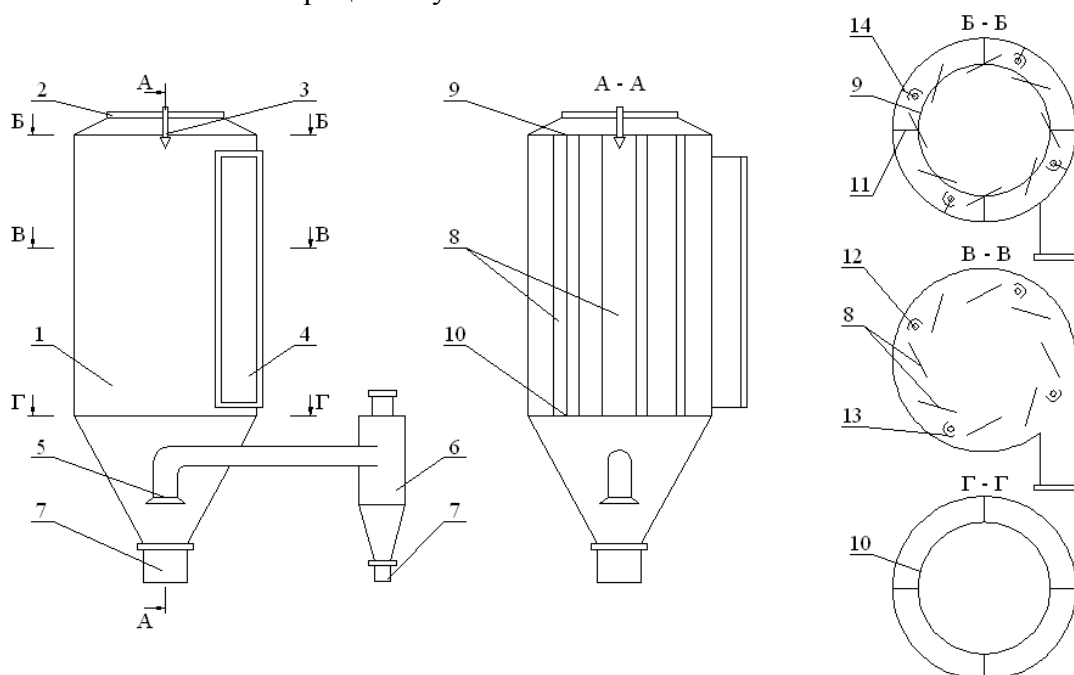


Рис.1. Установка конвективно-радиационной распылительной сушки:

- 1 – сушильная камера; 2, 4 – патрубок для ввода сушильного агента; 3 – распылитель;
 5 – система отсоса; 6 – циклон; 7 – сборник сухого продукта;
 8 – прямоугольные перегородки; 9, 10 – крепления; 11 – стержневые крепежные элементы;
 12 – инфракрасные излучатели; 13 – отражатели; 14 – крепления

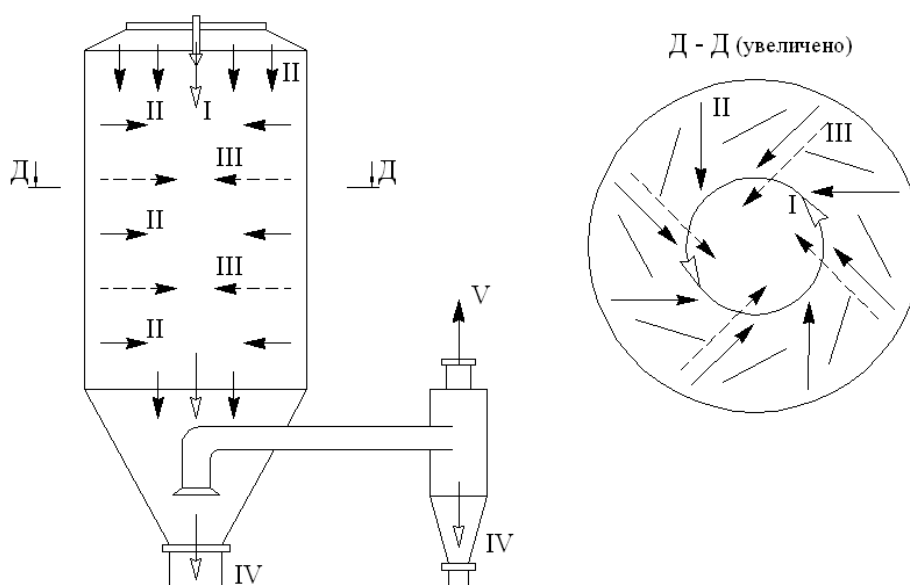


Рис.2. Схема распределения потоков в установке конвективно-радиационной распылительной сушки:

I – исходный продукт; II – сушильный агент; III – инфракрасное излучение; IV – сухой продукт; V – отработавший сушильный агент.

Сушильный агент, проходя через пространство между перегородками 8, 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 налипание частиц продукта на внутреннюю поверхность большого цилиндра сушильной камеры, обеспечивается интенсивное обтекание частиц сушильным агентом и увеличивается интенсивность процесса сушки.

Положительный эффект предлагаемого устройства обеспечивается за счет усовершенствования конструкции сушилки. 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, необходима разработка математических моделей [6], для оперативного управления процессом и качеством продукции, а также автоматизации работы сушильной установки [7].

Конвективная составляющая позволяет обеспечить высушивание частиц при активном аэродинамическом контакте с сушильным агентом. Также конвективный подвод энергии необходим для организации распыления исходного продукта, пневмотранспорта высохших частиц и их отделения от потока отработавшего сушильного агента. Радиационная составляющая позволит смягчить температурные режимы сушки. Конструктивные особенности предлагаемого устройства запатентованы (Заявки на патенты на полезную модель №2014148752/06(078440)РФ и №2015120308). Предложенный принцип организации сушки может быть реализован при конструктивной модернизации действующих установок распылительной сушки. Комбинирование способов энергоподвода при распылительной сушке обуславливает расширение области использования распылительной технологии сушки для получения сухих дисперсных растительных материалов.

Список литературы

1. *Алексаян, И.Ю.* Распылительная сушка растительных экстрактов Теория. Практика. Моделирование [Текст] / И.Ю. Алексаян, 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. *Алексамян, И.Ю.* Инновационные технологии переработки сырья растительного происхождения [Текст] / И.Ю. Алексамян, 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. *Алексамян, И.Ю.* Распылительная сушилка [Текст] / И.Ю. Алексамян, 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. 2011. № 2(52). 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. Серия: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА. 2013. №2 (Август). 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. Серия: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА. 2014. №3 (Июль). С. 21 – 29.

УДК 664.8.022.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК MODELING OF DRYING PROCESS OF FRUIT OSSICLES

**Анатолий Никитович Поперечный, Надежда Александровна Миронова
Anatoly N. Poperechnyi, Nadezhda A. Mironova**

*Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила
Туган-Барановского, Донецк
Donetsk national university of economics and trade named after Mykhayilo
Tugan-Baranovsky, Donetsk
(e-mail: Mironova_nad@mail.ru)*

Аннотация: Выполнено моделирование процесса обезвоживания плодовых косточек, приведены результаты полученных уравнений обобщенных кривых скорости сушки, определены значения температурного коэффициента для различных значений влагосодержания продукта, построены кривые изменения числа Ребиндера и теплового потока, поглощаемого косточками в зависимости от влагосодержания продукта в процессе сушки.

Abstract: Simulation of the process of drying of fruit ossicles, the results obtained by the equations of the generalized drying rate curves, the values of the temperature coefficient for different values of the moisture content of the product, the curves change the number Rebinder and heat flux, depending on the moisture content of the product during the drying process.

Ключевые слова: моделирование сушки, плодовые косточки, кинетика сушки.

Keywords: modeling of drying, fruit ossicles, the drying kinetics.

Моделирование процесса обезвоживания плодовых косточек осуществляли с помощью полученных нами данных кинетики сушки [1] и основного уравнения кинетики сушки, которое позволяет рассчитать тепловой поток, поглощаемый продуктом [2]:

$$q = \rho_0 R_v r_e \frac{du}{d\tau} (1 + Rb), \quad (1)$$

где: ρ_0 - плотность сухого продукта, кг/м³;

R_v - отношение объема частиц продукта к площади испарения;

r_e - удельная теплота испарения влаги продукта, кДж/кг;

$du/d\tau$ - скорость сушки, %/с;

Rb - число Ребиндера.

Первые две составляющие уравнения (1) являются практически постоянными величинами. Остальные три изменяются в процессе сушки и являются функциями влагосодержания продукта и его температуры. Поэтому расчет теплового потока был проведен в три этапа:

- 1) построение обобщенных кривых скорости сушки;
- 2) определение удельной теплоты испарения влаги из продукта;
- 3) построение графиков изменения числа Ребиндера в процессе сушки.

Для каждого исследуемого вида плодовых косточек нами рассчитаны уравнения обобщенных кривых скорости сушки в координатах $(u-u_p) - (du/d\tau)/N$ используя уравнение К. Филоненко [3] по данным [1]. Соответствующие вычисления проведены нами в математическом пакете Mathcad с помощью метода наименьших квадратов. Значения коэффициентов регрессии и показатели статистической оценки соответствующих уравнений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты вычислений коэффициентов регрессии уравнений обобщенных кривых скорости сушки плодовых косточек

Вид косточек	Показатели						
	n	A	B	Стандартное отклонение оценки	Коэффициент корреляции	Критерий Фишера	Критическое значение критерия Фишера
Косточки абрикоса	0,198	11,77	-5,60	0,068	0,959	500,9	3,10
Косточки вишни	0,365	9,59	-2,85	0,065	0,958	364,7	3,14
Косточки черешни	0,403	12,22	-2,78	0,057	0,966	376,9	3,11

Так, для второго периода сушки получены уравнения обобщенных кривых скорости сушки:

$$\text{- для косточек абрикоса } \frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u-u_p)^{0,198}}{11,77 - 5,6(u-u_p)^{0,198}};$$

$$\text{- для косточек вишни } \frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u-u_p)^{0,365}}{9,59 - 2,85(u-u_p)^{0,365}};$$

$$\text{- для косточек черешни } \frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u-u_p)^{0,403}}{12,22 - 2,78(u-u_p)^{0,403}}.$$

Сравнение рассчитанного значения критерия Фишера с критическим для соответствующих степеней свободы свидетельствует об адекватности полученных уравнений.

Плодовые косточки содержат достаточно большую долю связанной влаги, для удаления которой, кроме теплоты парообразования, необходимо подвести теплоту, которая пойдет на разрушение связи влаги с продуктом (она численно равна энергии этой связи).

Для определения энергии связи влаги с продуктом воспользуемся методикой, приведенной в [4].

Для построения графиков изменения числа Ребиндера в процессе сушки воспользуемся формулой (2) [2]:

$$Rb = \frac{c_n}{r_g} \cdot b, \quad (2)$$

где: c_n - удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг·К);

$b=100dt/du$ - температурный коэффициент сушки.

Для определения температурного коэффициента сушки b в координатах t_{cp} - u были построены температурные кривые и с помощью их графического дифференцирования вычислялись значения температурного коэффициента для различных значений влагосодержания продукта.

Для определения удельной теплоемкости плодовые косточки рассматривались как продукт, состоящий из следующих составляющих: воды, масла, белков, углеводов и целлюлозы. Каждая i -тая составляющая имеет свое влияние на общую удельную теплоемкость пропорционально массовой доли ω_i в продукте. В результате формула для определения удельной теплоемкости плодовых косточек приняла следующий вид:

$$c_n = \omega_g c_g + \omega_m c_m + \omega_b c_b + \omega_{угл} c_{угл} + \omega_c c_c,$$

где: c_g - удельная теплоемкость воды;

c_m - удельная теплоемкость масла;

$c_b=c_{угл}=1,41$ кДж/(кг·К) - удельная теплоемкость белков и углеводов [5];

$c_c=1,33$ кДж/(кг·К) - удельная теплоемкость целлюлозы [5].

Удельными теплоемкостями воды и масла задавались как функции среднеобъемной температуры продукта. В первом случае использовались табличные данные из источника [6] (для промежуточных значений температуры удельная теплоемкость воды определялась с помощью интерполяции). Во втором случае использовалось следующее уравнение [7]:

$$c_o = \begin{cases} 1,66(0,439 + 0,00185T_{cp}) & \text{при } 273 < T_{cp} < 363, \\ 1,66(0,275 + 0,0023T_{cp}) & \text{при } 363 < T_{cp} < 423, \end{cases}$$

где T_{cp} - абсолютная среднеобъемная температура продукта.

На основании полученных данных, а также с помощью графического дифференцирования температурных кривых построены кривые изменения числа Ребиндера в зависимости от влагосодержания продукта в процессе сушки (рис.1).

Характер кривых для всех опытов одинаков - в начале процесса сушки число Ребиндера резко уменьшается от начального влагосодержания до влагосодержания 20...25%. Этот участок отражает период максимального расхода теплоты на нагрев продукта. Далее число Ребиндера медленно уменьшается к концу процесса.

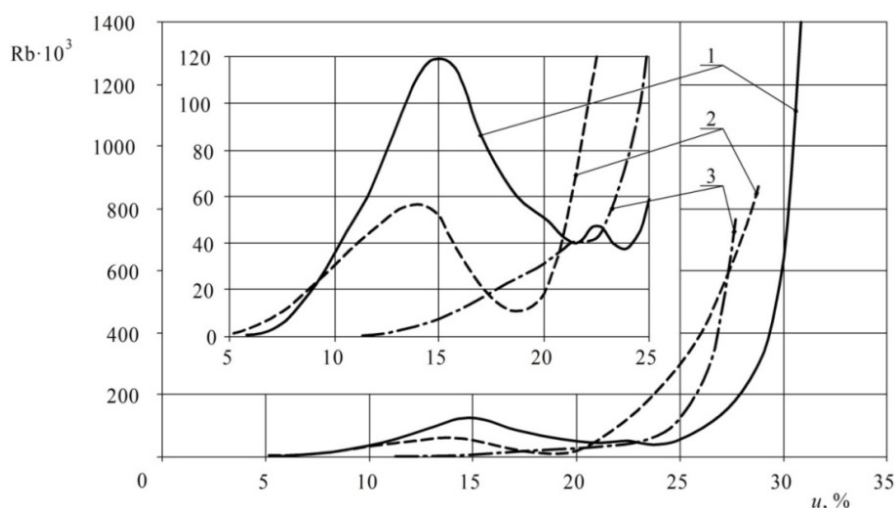


Рис. 1. Изменение числа Ребиндера косточек абрикоса в процессе сушки при различных значениях плотности теплового потока инфракрасного облучения: 1 - 1400 Вт/м²; 2 - 900 Вт/м²; 3 - 400 Вт/м²

Для кривых 1 и 2 при влагосодержании около 15% имеет место локальный максимум, который соответствует началу второго участка интенсивного повышения температуры продукта на соответствующих температурных кривых. Очевидно, крутизна этого экстремума увеличивается при повышении плотности теплового потока инфракрасного облучения.

Результаты, полученные ранее, позволили, используя уравнение (1) рассчитать тепловой поток, поглощаемый плодовыми косточками в процессе сушки.

На рис. 2 приведены графики изменения этой величины в зависимости от влагосодержания продукта при различных значениях плотности теплового потока инфракрасного облучения. Все кривые имеют похожую форму - участок резкого уменьшения теплового потока в начале процесса, соответствует интенсивному прогреву продукта, который сменяется участком плавного уменьшения теплового потока до равновесного влагосодержания. Для плотности теплового потока 1400 Вт/м² имеет место промежуточный горизонтальный участок, который соответствует периоду постоянной скорости сушки.

Снижение величины теплового потока, поглощаемого продуктом, в процессе сушки, можно объяснить повышением температуры продукта и, как следствие, уменьшением температурного напора между ним и излучателями, а также снижением влагосодержания продукта, который уменьшает коэффициент поглощения теплоты.

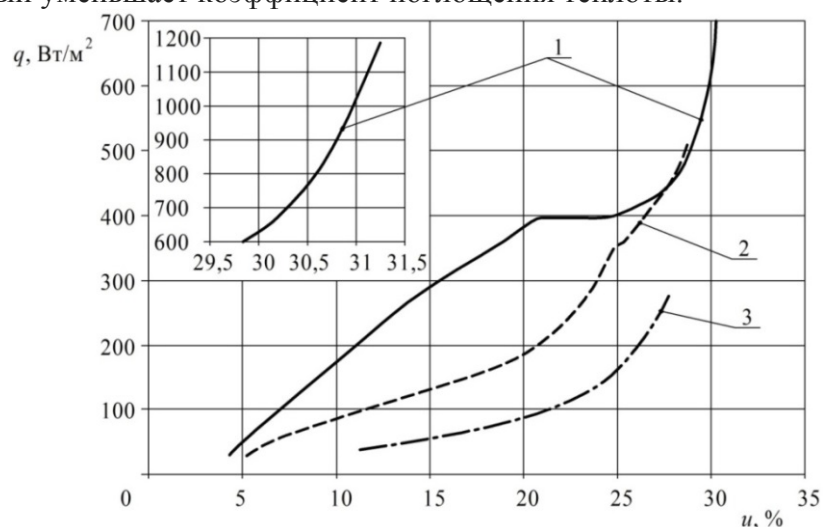


Рис. 2. Изменение теплового потока, поглощаемого косточками абрикоса в процессе сушки, в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения: 1 - 1400 Вт/м²; 2 - 900 Вт/м²; 3 - 400 Вт/м²

Приведенные в работе данные, позволили определить рациональные параметры процесса сушки плодовых косточек в сушилке с инфракрасным излучением.

Список литературы

1. Поперечный А.Н. Миронова Н.А. Кинетика сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое // Научный журнал НИУ ИТМО серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – Россия: Санкт-Петербург, - №1, 2015. - С. 142 –149.
2. Лыков А.В. Теория сушки: учеб. пособие для высших технических учебных заведений. - М.: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Филоненко Г.К. Сушка пищевых растительных материалов. Пищ. пром-ть. - Москва, 1971. - 440 с.
4. Гинзбург А.С. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов: справочник. - М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 280 с.
5. Щербаков В.Г. Биохимия и товароведение масличного сырья: учебник для вузов. - М.: Агропромиздат, 1991. - 304 с.
6. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов. - 10-е изд., перераб. и доп. - Л: Химия, 1987. - 576 с.
7. Гинзбург А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник. - М.: Пищ. пром-сть, 1980. - 288 с.

УДК 536.2

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА ПРИ СУШКЕ ЗЕРНА В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ MATHEMATICAL MODEL OF HEAT AND MASS TRANSFER BY DRYING OF GRAIN IN MICROWAVE FIELD

Ирина Леонидовна Бошкова, Наталья Викторовна Волгушева
Irina L. Boshkova., Natalya V. Volgusheva

Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, г. Одесса
Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine, Odessa
(e-mail: ira_boshkova@mail.ru)

Аннотация: Анализируются математические модели сушки диэлектрических материалов в микроволновом поле. Приведены результаты расчетов температурного поля воды и плотного слоя зерна по уравнению теплопроводности с внутренними положительными источниками теплоты при различных граничных условиях. Представлена модель сушки, учитывающая два внутренних источника теплоты, положительный и отрицательный, и результаты ее апробации.

Abstract: Mathematical models of drying the dielectric material in a microwave field are analyzed. The results of temperature field calculation of water and of grain by the conductivity equation with a positive internal heat sources at different boundary conditions are shown. The model of the drying that takes into account two internal heat source, positive and negative, and the results of its testing is shown.

Ключевые слова: микроволновое поле, внутренние источники теплоты; математическая модель; нагрев; сушка; температурное поле.

Keywords: the microwave field, the internal heat sources; mathematical model; heat; drying; temperature field.

Математическое моделирование тепловлагодпереноса при сушке в микроволновом поле должно отражать причинно-следственные связи между явлениями преобразования

микроволновой энергии во внутреннюю энергию тела и изменением полей температуры и влагосодержания. Анализ существующих теоретических представлений о процессах преобразования энергии микроволнового поля во внутреннюю энергию тела [1-5] свидетельствует об особой сложности моделирования тепловлагоденоса при микроволновом нагреве. В то же время предпринимаются достаточно успешные попытки создания математических моделей [6-8], позволяющие получить решения задач теплопроводности в условиях микроволнового нагрева. Особый интерес представляют модели, базирующиеся на подходах А.В. Лыкова [9], в основе которых лежит уравнение теплопроводности параболического типа с учетом внутренних источников теплоты. Объемный характер нагрева материала в микроволновом поле позволяет рассматривать материал как среду, в которой действуют внутренние положительные источники теплоты. Для проверки соответствия решения [9] физической модели нагрева в микроволновом поле проведены вычисления по зависимости (1), полученной для средней температуры шара в условиях, соответствующих режимам микроволнового нагрева в реальных объектах:

$$\bar{\Theta} = \frac{t(\tau) - t_0}{t_c - t_0} = 1 + \frac{1}{15} Po \left(1 + \frac{5}{Bi} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po}{\mu_n^2} \right) B_n \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (1)$$

где $Po = \frac{q_{v1} R^2}{\lambda(t_c - t_0)}$ - критерий Померанцева, q_{v1} - удельная мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³, t_0 - начальная температура материала, t_c - температура окружающей среды. Решение (1) получено при ГУ III рода. Необходимость проверки соответствия вызвана тем, что для всех решений [9], описывающих температурное поле при действии внутренних источников теплоты, задавалось условие $t_c > t_0$, которое соответствует направлению теплового потока от окружающей среды к поверхности материала, что при микроволновом нагреве выполняется не всегда. Расчетные кривые, отражающие изменение температуры материала, полученные по зависимости (1), приведены на рис.1.

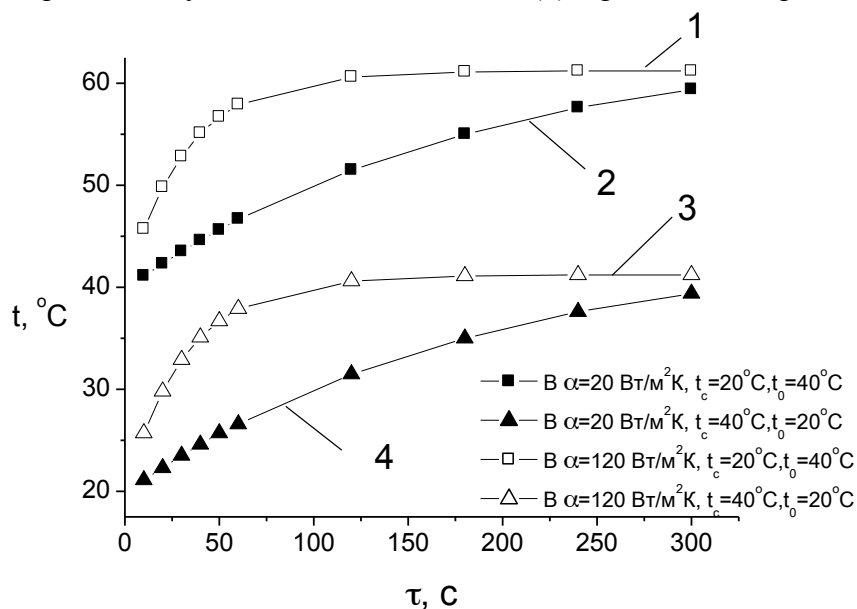


Рисунок 1 – Температура материала (вода) при нагреве в микроволновом поле.

$$q_{v1} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3, R = 0,0025 \text{ м.}$$

Кривые 1,3 - $\alpha = 120 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$, кривые 2,4 - $\alpha = 20 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$

Кривые 1 и 2 получены для условия $t_c < t_0$: $t_c = 20$ °С, $t_0 = 40$ °С. Увеличение коэффициента теплоотдачи от $\alpha = 20$ Вт/(м²К) до $\alpha = 120$ Вт/(м²К) приводит к увеличению температуры воды на одинаковых отрезках времени, что не соответствует реальному процессу. Кривые 3 и 4 получены для условия $t_c > t_0$: в этом случае увеличение коэффициента теплоотдачи, соответственно, увеличение теплового потока от окружающей среды к материалу, приводит к увеличению температуры, что правильно отражает физическую картину зависимости температуры от направлений теплового потока. Таким образом, для аналитического исследования температурного поля и изменений средней температуры материала при условии $t_c < t_0$ необходимы соответствующие математические модели.

Процесс сушки слоя зерна в микроволновом поле целесообразно представить как результат действия двух источников теплоты: положительного q_{v1} и отрицательного q_{v2} . Положительные источники возникают в материале вследствие взаимодействия полярных молекул воды с микроволновым полем, а отрицательные определяются испарением влаги из материала в процессе сушки [10]. Для полуограниченного массива с учетом действия положительного (микроволновое поле) и отрицательного (определяемого потоком испарившейся влаги) получена зависимость при ГУ I рода (2):

$$\begin{aligned}
 t(x, \tau) = & (1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}})t_0 + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \cdot t_{\text{нов}} - \\
 & - \frac{q_{v10}}{cra\gamma^2} \left[e^{-\gamma x} - \frac{1}{2} e^{\gamma^2 a\tau - \gamma x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \gamma\sqrt{a\tau} \right) + \frac{1}{2} e^{\gamma^2 a\tau + \gamma x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \gamma\sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right] - \\
 & - \frac{q_{v20}}{cra\beta^2} \left[e^{-\beta x} - \frac{1}{2} e^{\beta^2 a\tau - \beta x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \beta\sqrt{a\tau} \right) + \frac{1}{2} e^{\beta^2 a\tau + \beta x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \beta\sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right]
 \end{aligned} \quad (2)$$

где a - коэффициент температуропроводности, γ - коэффициент поглощения электромагнитной энергии, β - коэффициент затухания отрицательного внутреннего источника, нижний индекс 0 при удельной мощности показывает, что величина относится к максимальному значению. На рис.2 приведены результаты расчетов температур зерна и воды в зависимости от длительности воздействия МВ поля для начального участка сушки, т.е. при $q_{v20} = 0$. Материал – зерно пшеницы и вода. Исходные данные для расчета следующие: начальные температуры материала и среды равны: $t_c = t_0 = 20$ °С, коэффициент поглощения для воды $\gamma_e = 125$ м⁻¹, коэффициент поглощения для зерна $\gamma_z = 30$ м⁻¹. Расчет температуры воды и зерна при одинаковой эффективности преобразования микроволновой энергии во внутреннюю энергию тела (в этом случае КПД камеры $\eta = 1$) показал, что температурные кривые для воды (линии 3,4) располагаются ниже кривых для зерна (линии 1,2). Это объясняется тем, что для корректного сопоставления температур следует учитывать значение диэлектрических характеристик материала (так, для воды при 20°С $\epsilon'' = 82$, 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 [11]. В соответствии с полученными зависимостями, которые учитывают объем загрузки камеры и вид материала, для зерна массой 100 гр КПД $\eta = 0,47$. В этом случае расчет привел к верному распределению температурных кривых. Температура зерна (линии 5,6) располагаются ниже, чем температура воды, и их значения удовлетворительно коррелируются с экспериментальными.

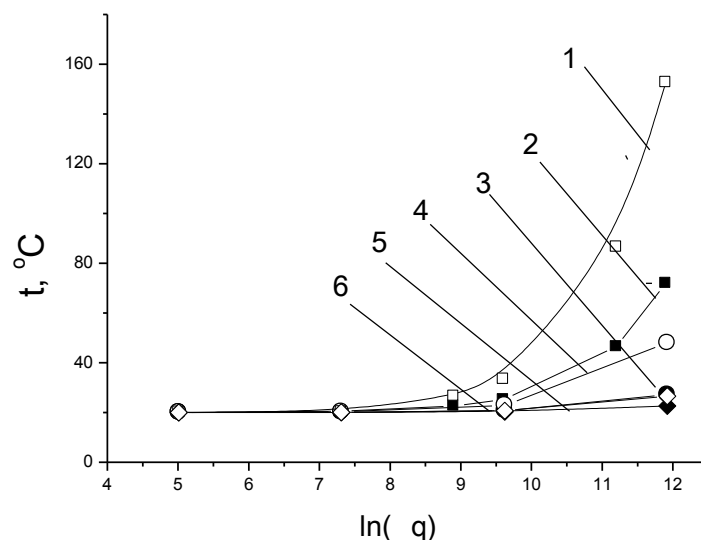


Рисунок 2 – Изменение температуры тела при микроволновом нагреве.

1 – зерно, $\eta = 1$, $\tau = 360$ с; 2 – зерно, $\eta = 1$, $\tau = 60$ с; 3 – вода, $\eta = 1$, $\tau = 60$ с; 4 – вода, $\eta = 1$, $\tau = 360$ с; 5 – зерно, $\eta = 0,47$, $\tau = 60$ с; 6 – зерно, $\eta = 0,47$, $\tau = 360$ с

Расчет изменения температуры по глубине массива также показал соответствие аналитической модели реальному физическому процессу, что демонстрирует возможность описания нагрева материалов в микроволновом поле точными аналитическими методами. Для ГУ III рода получена математическая модель [12], позволяющая проводить аналитические исследования температурного поля в слое зерна при микроволновой сушке.

В рассматриваемых моделях для периода постоянной скорости сушки мощность отрицательных источников теплоты определяется выражением $q_{v2} = \rho \cdot N \cdot r$, где ρ – плотность материала, N – скорость сушки, r – удельная теплота парообразования. Для определения скорости сушки зерна может быть предложена эмпирическая зависимость (3), справедливая при $200 \leq q_m \leq 1285$ Вт/кг с погрешностью $\pm 15\%$ и $\pm 13\%$:

$$N = 1,58 \cdot 10^{-7} (q_m)^{1,17}, \text{ с}^{-1} \quad (4)$$

где $q_m = Q_{пол} / m$ – удельный тепловой поток. Для расчета полезного теплового потока $Q_{пол}$ удобно пользоваться формулой (5), которая учитывает потребляемую от сети электроэнергию P , КПД микроволновой камеры η и КПД магнетрона η_m :

$$Q_{пол} = P \cdot \eta \cdot \eta_m, \text{ Вт} \quad (5)$$

Установлено, что аналитические зависимости для расчета температур материала при сушке, полученные из решения уравнения теплопроводности с учетом двух источников теплоты, удовлетворительно работают в области режимных параметров, соответствующим режимам сушки зерновых: начальное влагосодержание $u = 0,2$ кг/кг, скорость сушки $W = 10^{-5} \dots 10^{-4}$ с⁻¹. Расчет температур по разработанным математическим моделям с учетом двух внутренних источников теплоты, позволяет получать удовлетворительные данные при различном соотношении начальных температур среды и материала, а также при условии $t_c = t_0$.

ВЫВОДЫ

1. Решения задач теплопроводности в условиях действия одного (положительного) или двух (положительного и отрицательного) источников теплоты, основанные на дифференциальном уравнении теплопроводности параболического типа, позволяют получать достоверные данные при значениях удельной мощности внутренних положительных источников теплоты, характерных для условий сушки зерна.

2. Для получения достоверных данных по температурам материала по аналитическим зависимостям, полученным для безразмерной избыточной температуры, требуется выполнение условия $t_c > t_0$ (температура среды выше температуры материала).

Список литературы

1. *Thostenson, E.T., Chou T.W.* Microwave processing: fundamentals and applications // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999. V. 30, № 9. P. 1055-1071.
2. *Newnham, R.E., Jang S.J., Xu M.* Fundamental interaction mechanisms between microwave and matter // Ceramic Transactions. 1991. V. 21. P. 23-48.
3. *Иванников А.Ф.* Математическое моделирование взаимодействия электромагнитного излучения с дисперсными частицами. Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. Наук. М.: Московский гос. технол. ун-т «СТАНКИН», 2009. 24 с.
4. *Campanone L.A., Zaritzky N.E.* Mathematical analysis of microwave heating process // Journal of Food Engineering. 2005. №69. P. 359- 368.
5. *Лыков А.В.* Теория сушки М.: Энергия, 1968. С. 472.
6. *Рыбаков К. И., Семенов В. Е.* Микроволновый нагрев электропроводящих материалов // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т.48, №10-11. С. 997-1005.
7. *Симовьян С. В., Потапов В.А.* СВЧ-нагрев изделий конечной толщины // Изв. вузов. Пищ. Технология. 1982, № 6. С. 62- 65.
8. *Yaron Alpert, Eli Jerby.* Coupled Thermal-Electromagnetic Model for Microwave Heating of Temperature-Dependent Dielectric Media // IEEE transactions on plasma science. 1999. V. 27, № 2. P. 555-562.
9. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. – М., 1967. С. 559.
10. *Волгушева Н.В.* Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты. Дис. ... канд. техн. наук. Одесса: ОГАХ, 2005. 225 с.
11. *Бошкова И.Л.* Интенсификация процессов тепломассопереноса в растительных материалах при действии микроволнового электромагнитного поля. Дис. ... докт. техн. наук. Одесса: ОНАПТ, 2015. 357 с.
12. *Бошкова И.Л., Дементьева Т.Ю.* Аналитическое исследование температурного поля в теле с непрерывно действующими источниками теплоты // Современ. проблемы холод. техники и технологии. О.: ОДАХ. 2012. С. 42-45.

УДК 664.1.033

СУШКА СОЧНОГО ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ ПРИ ЭЛЕКТРОПЛАЗМОЛИЗЕ БИПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ DRYING JUICY FRUIT JUICY AND VEGETABLE RAW MATERIALS IN ELEKTROPLAZMOLIZE BIPOLAR PULSES

**Андрей Яковлевич Папченко, Наталья Андреевна Попова, Мирча Кириллович Болога
Andrei Y. Papcenco, Natalia A. Popova, Mirca K. Bologa**

*Институт прикладной физики Академии наук Молдовы, Кишинёв, Молдова
Institute of Applied Physics of Academy of Sciences of Moldova, Chisinau, Moldova.
(e-mail: andrei.papcenco@mail.ru; natalia.papjva@mail.ru; mbologa@phys.asm.md)*

Аннотация: Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности сушки растительного сырья с применением электроплазмолитических биполярными импульсами с частичным отделением сока. Показано, что увеличение проницаемости клеточных структур при электроплазмолитическом ускорении процесса сокоотдачи и сушки. Установлено, что предварительная обработка сырья электроплазмолитическим и отделение части сока позволяет существенно ускорить процесс сушки.

Abstract: The results of experimental studies on the effectiveness of vegetable raw materials drying using elektroplasmolysis bipolar pulses with a partial separation of juice. It has been shown that increasing the permeability of cell structures during elektroplasmolysis juice output and accelerates the drying process. It was found that pre-treatment of raw materials elektroplasmolysis and separation of the juice could significantly speed up the drying process.

Ключевые слова: электроплазмолиз, биполярные импульсы, растительные сырье.

Key words: electroplasmolysis, bipolar pulses, vegetable raw materials.

Традиционные способы сушки фруктов и ягод: - это солнечно-воздушная сушка и искусственная которая имеет ряд преимуществ: возможность применения в любых климатических зонах; большую степень механизации и автоматизации производственных процессов и нормальные санитарные условия, меньшую продолжительность сушки, более качественные окраски и вкус сухофруктов, меньшие потери полезных веществ при сушке. Наиболее распространены: способ непосредственного соприкосновения сырья с нагретым воздухом или перегретым паром и контактный способ, когда тепло к продукту передается через нагретую технологическим агентом поверхность. Недостатками этих способов сушки являются низкий к.п.д. использования энергоносителей и сравнительно низкое качество продукции.

При сублимационной сушке, воду из плодов и ягод выпаривают под вакуумом и отрицательной температуре. При этом основная часть влаги удаляется благодаря испарению льда без перехода его в жидкое состояние. Поскольку продукт в замороженном состоянии, потери ароматических веществ и витаминов минимальны, биохимические изменения незначительны. Качество сушеных плодов и ягод при сублимационной сушке весьма высокое. Недостатки способа - сложное и дорогостоящее оборудование, значительные энергозатраты и отсутствие обеззараживания продукта [1]. С целью интенсификации и увеличения выхода сока в технологии переработки растительного сырья успешно используется процесс электроплазмолиза [2,3].

Сушка сочного плодовоовощного сырья требует большой длительности процесса и значительных затрат тепловой энергии. Для сокращения продолжительности и удельной энергии сушки используется комбинированная обработка сырья перед процессом сушки. Предлагается на первом этапе электроплазмолиз сырья биполярными электрическими импульсами, с последующим отделением до 25% сока прессованием. Доведение сырья до кондиционных параметров осуществляется конвективной сушкой.

Для проверки эффективности комбинированной обработки растительного сырья использовалась экспериментальная установка схема которой представлена на рис.1.

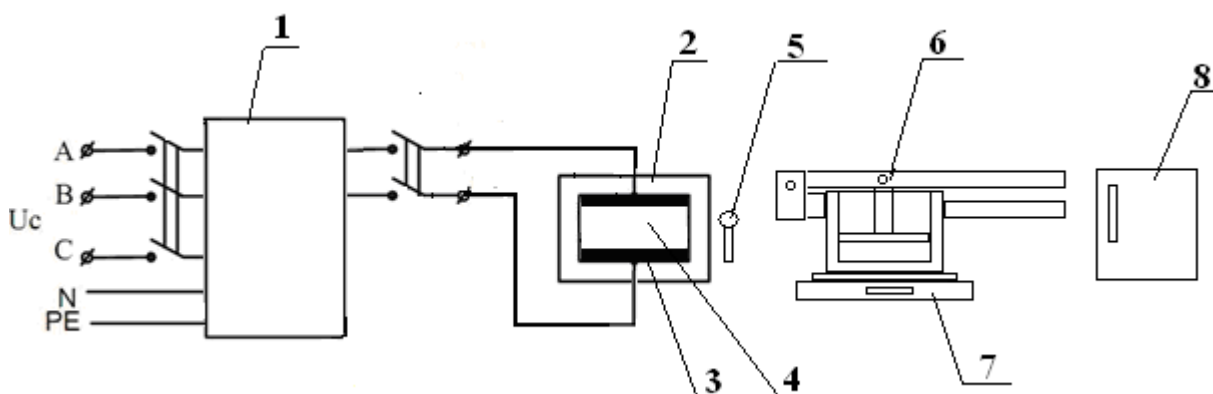


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

1- источник биполярных импульсов; 2- ячейка с электродами 3, межэлектродным пространством 4 и термометром 5; 6 – пресс; 7- весы; 8 – лабораторный сушильный шкаф с естественной конвекцией воздуха

Подготовка и проведение экспериментов проводилось следующим образом. Сырье укладывают в межэлектродное пространство 4 ячейки 2, где осуществляется ее электроплазмолиз из расчета 1 Вт.ч /кг. Далее сырье загружали в пресс 6, где отделяется до 25% сока, затем подвергается сушке при температуре 70°C до влажности 20%.

В качестве объекта исследования использовался виноград сорта «Молдова» и слива сорта «Чернослив».

Исследованы зависимости влагосодержания сырья от режимов и продолжительности сушки рис.2 и 3.

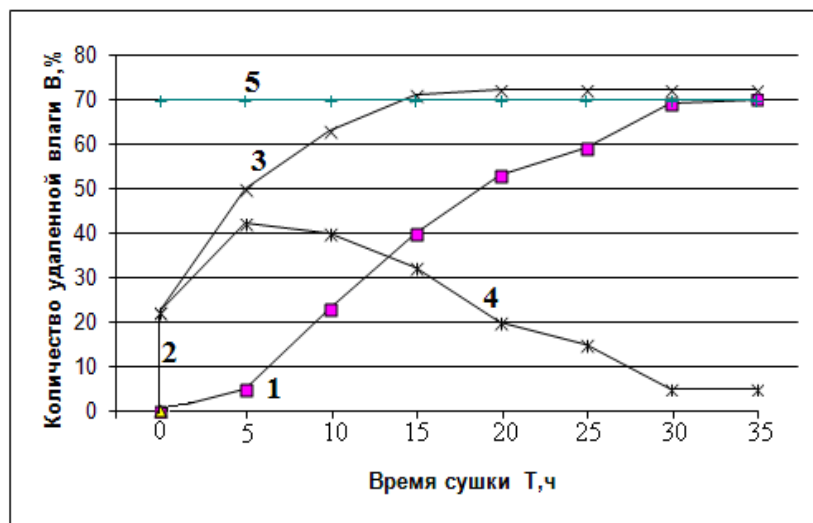


Рис.2 Кинетика сушки слив с предварительной обработкой электроплазмолизом и частичным отделением сока:

1- без обработки сырья электроплазмолизом; 2- электроплазмолиз и отделение 22% сока; 3- сушка после электроплазмолиза сырья и отделения части сока; 4 – разность содержания влаги между кривой 3 и 1; 5- нормируемое значение влаги в готовом продукте.

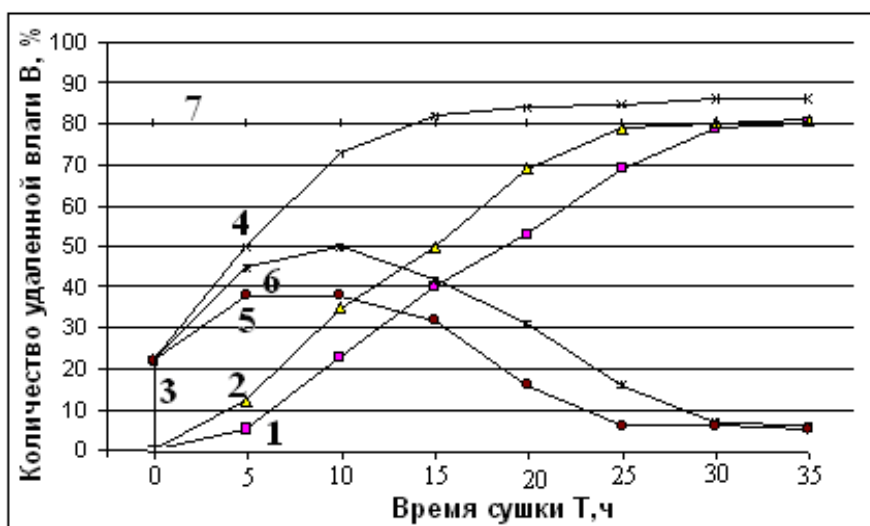


Рис.3 Кинетика сушки винограда сорта «Молдова» с предварительной обработкой электроплазмолизом и частичным отделением сока:

1- без обработки электроплазмолизом и удаления восковой пленки из ягод винограда (контроль 1); 2- без обработки винограда электроплазмолизом с удалением восковой пленки из ягод винограда (контроль 2); 3- отделение 22% сока перед процессом сушки сырья); 4- сушка сырья после электроплазмолиза и отделения части сока; 5– разность количества удаленной влаги между кривой 4 и 1 (контроль 2); 6- разность количества удаленной влаги между кривой 4 и 2 (контроль 1); 7 – нормируемое значение влаги в готовом продукте.

По динамике процесса сушки, кривые 1, 2 и 3, рис.1 видно, что сушка без применения электроплазмолиза биполярными импульсами (кривая 1), достигает нормируемого значения влагосодержания через 35ч, после электроплазмолиза и отделения 22% сока нормируемое значение влагосодержания достигается через 15 ч. Судя по динамике процесса рис.2, кривые 1, 2,3 и 4, без обработки винограда электроплазмолизом и удаления восковой пленки из ягод винограда (кривая 1) по сравнению с сушкой с удалением восковой пленки (кривая 3) продолжается на 2,5 часа дольше. После электроплазмолиза сырья и отделения 22% сока нормируемое значение влагосодержания достигает через 15 ч, а при сушке (кривая 1) без обработки винограда электроплазмолизом и без удаления части сока нормируемое значение влагосодержания достигает через 35 ч.

Следовательно применение биполярных импульсов с отделением части сока обеспечивает существенное ускорение последующей сушки и представляется интересным в части оптимизации и повышения эффективности процесса.

Список литературы

1 Чекрыгина И.М., Букреев В.Г., Еремин А.Д. Способ сушки и обеззараживания фруктов и ягод 2002. ru-patent.info/21/90-94/2194228

2. Попова Н.А., Папченко А.Я., Боблога М.К. Электроплазмолиз винограда с применением биполярных импульсов Электронная обработка материалов . 50 (2014),№6, С. 83-91

3. Жилкин В.М., Грибков А.Н., Муромцев Ю.Л., Оценка результативности процесса подготовки растительных материалов к обезвоживанию. Тамбов. Изд. Тамбовского гос. техн. Университета, 2009. Т.15 №2, с.410-415.

УДК 66.011

МЕХАНИЗМ ДВИЖЕНИЯ КАПЛИ КОНДЕНСАТА В КАНАЛЕ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КАНАЛЬНОГО МЕТОДА НАГРЕВА ПАРОМ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

THE MECHANISM OF MOVEMENT OF THE DROPLETS IN THE DRYING DRUM CHANNEL WHEN USING THE CHANNEL METHOD OF STEAM HEATING OF THE CONTACT SURFACE

**Евгений Владимирович Шувалов, Леонид Иванович Жмакин,
Николай Михайлович Шарпар
Evgeny V. Shuvalov, Leonid I. Zhmakin, Nikolai M. Sharpar**

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow
(e-mail: shuve@yandex.ru, LI_zhmakin@mail.ru, sharpar753@mail.ru)*

Аннотация: В статье рассмотрен процесс движения образующихся конденсатных капель в канале сушильного барабана. Произведен расчет зависимости критического радиуса капли от скорости течения пара в канале. Сделан вывод о наиболее эффективном скорости движения потока пара.

Abstract: The article describes the process of moving condensate droplets formed in the channel of the drying drum. Calculated according to the radius of the droplet tear-off from the flow rate of vapor in the channel. The conclusion about the most effective speed of the steam flow.

Ключевые слова: критический радиус капли конденсата, сушильный барабан, эффективная скорость движения потока пара.

Keywords: critical radius of the droplets, a drying drum, the effective speed of the steam flow.

Из рис.1 видно, что на каплю в потоке пара вдоль оси (O -Y) действуют сила адгезии капли к стенке канал ($F_{адг}$)_y, сила тяжести капли (F_T)_y, центробежная сила от вращения сушильного барабана ($F_{цб}$)_y, подъемная сила ($F_{под}$)_y. Условием равновесия капли на стенке канала является равенство нулю суммы проекций векторов всех сил по оси O -Y :

$$(F_{адг})_y + (F_T)_y + (F_{цб})_y + (F_{под})_y = 0 \quad (1)$$

Рассмотрим в отдельности каждую из действующих на каплю сил:

1. Сила тяжести (F_T)

$$F_T = \rho \cdot V_k \cdot g, \quad (2)$$

где $\rho = 935 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ плотность воды при температуре 130°C; $g = 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ускорение свободного падения

$$V_k = \frac{\pi \times R^3}{3} \cdot (2 + 3 \sin(\beta))$$

здесь V_k - объем капли, в котором R - радиус капли, а β - угол между радиус - вектором капли R , проведенному к точке соприкосновения ее свободной поверхности с ограничивающей ее стенкой и плоскостью поверхности соприкосновения рис.1. Угол β находим из соотношения $\beta = \theta - \frac{\pi}{2}$.

2. Центробежная сила ($F_{цб}$)

$$F_{цб} = \rho \cdot V_k \cdot a, \quad (4)$$

где a - центростремительное ускорение ($a = \frac{V_{цил}^2}{R_{цил}}$), составляющими которого являются: $R_{цил} = 0.25\text{м}$ радиус сушильного барабана; $V_{цил} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ касательная скорость вращения поверхности цилиндра.

3. Проекция силы адгезии на ось O-Y ($F_{адг}$)_y

$$(F_{адг})_y = \sigma_{жг} 2\pi r \cdot \sin(\pi - \theta), \quad (5)$$

где r -радиус площадки соприкосновения капли и стенки ($r = R \times \cos \beta$); поверхностное натяжение между жидкой и газовой фазами ($\sigma_{жг} = 72 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$).

4. Подъемная сила $F_{под}$

Согласно теореме Жуковского подъемная сила (F_i), действующая на замкнутый контур i -того сечения капли при циркуляционном обтекании его потоком вязкой жидкости, прямо пропорциональна ее циркуляции по этому контуру (Γ_i) и скорости (v_i) набегающего потока [1].

$$F_i = \rho v_i \Gamma_i \quad (6)$$

Циркуляция (Γ_i) по замкнутому контуру согласно теореме Стокса [2] равна потоку вихрей через поверхность (S) i -того сечения:

$$\Gamma_i = 2 \cdot \int \omega dS \quad (7)$$

Таким образом, после интегрирования выражения (7) по площади контура i -того сечения при замене в нем выражения угловой скорости циркулирующего потока ω_i через линейную скорость набегающего потока v_i в i -том сечении капли и площади контура через радиус (r_i) i -того сечения получаем зависимость циркуляции потока в этом сечении Γ_i , как функцию от угла (α), определяющего положение данного сечения в объеме капли:

$$\Gamma_i = 4\pi v_i R \sin \alpha \quad (8)$$

Так как внутри вязкого подслоя пограничного слоя существует градиент скорости (∇v) вдоль оси нормальной к поверхности стенки канала, который равен отношению касательного напряжения на стенке (τ_c) и коэффициента динамической вязкости жидкости (μ), то скорость i -том сечении капли находится из выражения:

$$v_i = \nabla v \cdot (y_i + h) = \frac{\tau_c}{\mu} \cdot (y_i + h), \quad (9)$$

$$\tau_c = \frac{C_f}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2$$

где h – расстояние от центра капли до стенки ($h = R \cdot \sin \beta$); $y_i=R$ координата верхней точки сечения капли отсчитываемая от ее центра; V_∞ – скорость потока в ядре; C_f – коэффициент трения ($C_f = 0,0592 \cdot Re^{-0,2}$).

В каналах исследуемого сушильного барабана коэффициент Рейнольдса равен $Re = 2 \cdot 10^5$. Суммарная подъемная сила, действующая на каплю $F_{\text{под}}$, определяется

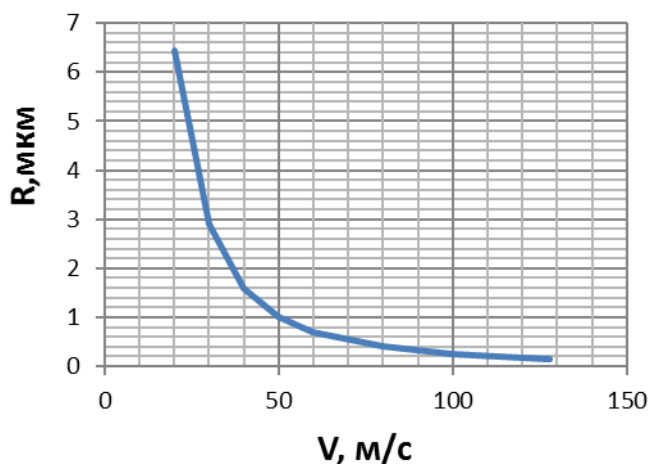


Рис.2 График зависимости отрывного радиуса капли от скорости потока пара в канале сушильного барабана.

вычитанием из подъемной силы, действующей на шаровой профиль радиуса R при его полном обтекании вязкой жидкостью, подъемной силы которая действовала бы на шар на участке смачивания им твердой поверхности (участок a-b рис.1).

Подставляя выражения (10), (5), (4), (2) в выражение (1) и решая полученное уравнение мы находим отрывной радиус капли конденсата с поверхности стенки канала при определенной скорости течения в его ядре и определенном угле смачивания поверхности.

$$F_{\text{под}} = \int_0^\pi F_i d \propto - \int_{(\theta-\frac{\pi}{2})}^{\pi-(\theta-\frac{\pi}{2})} F_i d \propto \quad (10)$$

Наиболее приемлемым гидрофобным материалом для покрытия внутренней поверхности канала является политетрафторэтилен $(C_2F_4)_n$, обладающим значительной термостойкостью и имеющий краевой угол смачивания водой равный $\theta = 115^\circ$. График зависимости отрывного радиуса капли от скорости течения в ядре потока для $\theta = 115^\circ$ представлен на рис.2.

Из графика рис.2 видно, что основной скачок уменьшения отрывного радиуса капель в исследуемом канале приходится на увеличение скорости течения пара с $20 \frac{m}{c}$ до $90 \frac{m}{c}$. Данный диапазон скоростей движения пара лимитирует значение максимального теплового потока, которое можно передавать высушиваемому волокнистому материалу, так как при его превышении скорость уноса капель будет ниже скорости их образования. Дальнейшее же повышение скорости потока будет являться не эффективным и приводящим к дополнительным расходам и износу оборудования.

Список литературы

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1957. 784 с.
2. Соболев А.А. Движение частиц в воздушном потоке // Вектор науки ТГУ. 2011. Т. 17. № 3. С. 82.

УДК 664.723

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В
АППАРАТЕ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ТЕРМОСИФОНОМ
THE DISPERSE MATERIALS DRYING SIMULATION OF THE PROCESS BY DRYER
WITH ROTATING THERMOSYPHON**

**Игорь Витальевич Безбах, Александр Викторович Зыков,
Елена Владимировна Воскресенская
Igor V. Bezbakh, Aleksandr V. Zykov, Elena V. Voskresenskaya**

*Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса,
Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine, Odessa
(e-mail: terma_onaft@rambler.ru)*

Аннотация: Рассмотрены вопросы моделирования процесса сушки в аппарате с вращающимся термосифоном. Представлено уравнение для определения коэффициента массоотдачи в виде зависимости между числами подобия.

Abstract: Some features of simulation of the drying process in the dryer with rotating thermosyphon were considered. The equation for determining the mass-transfer coefficient as a function of similarity between the dimensionless numbers was shown.

Ключевые слова: вращающийся термосифон, моделирование, кинетика сушки.

Keywords: rotating thermosyphon, simulation, the drying kinetics.

Аппарат с вращающимся термосифоном (ВТС) это оригинальное устройство, разработанное в ОНАПТ [1,2] для термообработки сыпучих материалов. Сушилка с ВТС (рис. 1) состоит из корпуса 1, конденсатора 2, парогенератора 3, привода 4., выходной патрубков 5, муфта 6, опора 7. ВТС представляют собой герметично закрытую полость, частично заполненную теплоносителем, в которой реализуется замкнутый испарительно-конденсационный цикл. ВТС осуществляет адресную передачу энергии от внешнего источника к зерновому слою. Также ВТС производит интенсивное перемешивание слоя, что способствует обновлению поверхности контакта фаз и разрушению теплового и диффузионного пограничных слоёв.

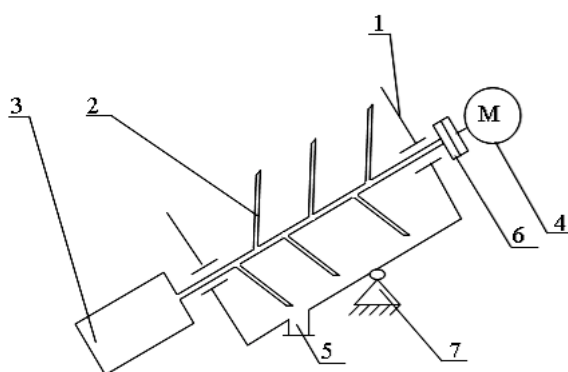


Рис. 1. Схема установки

Расчет и проектирование таких установок требует создания математической модели. В связи с этим перед авторами возникла задача создания математического описания процесса сушки зерна в сушилке с ВТС для анализа ее работы, которое и приведено в данной работе.

Массоотдача слоя дисперсного материала в установке описывается уравнением

$$\frac{dW}{dt} = \beta \cdot F \cdot (p_{\text{пов}} - p_a) \quad (1)$$

где dW – изменение массы влаги во времени; $d\tau$ – приращение времени; β – коэффициент массообмена; F – площадь поверхности дисперсного материала; $p_{\text{пов}}$ – давление пара над поверхностью; p_a – парциальное давление водяного пара в воздухе.

Или используя коэффициент активности воды a_w и давление водяного пара над свободной поверхностью p_n

$$\frac{dW}{d\tau} = \beta \cdot F \cdot (a_w \cdot p_n - p_a) \quad (2)$$

Разделив полученное уравнение на $G_{\text{общ}}$ учитывая, что $G_{\text{общ}} = p_o \cdot \left(\frac{F}{S_{\text{уд}}}\right)$ получим

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \beta \cdot \rho \cdot S_{\text{уд}} \cdot (a_w \cdot p_n - p_a) \quad (3)$$

где ω – влажность материала; ρ – плотность слоя; $S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность

Коэффициент активности воды можно определить по кривым десорбции. Например, для амаранта кривая сорбции описывается уравнением [3].

$$\varphi_1 = e^{\frac{-A}{R \cdot T_1}} e^{-B \cdot U_1} \quad (4)$$

где $B=25$ и $A = 219,17 \cdot e^{0,0121 \cdot T_1}$

Основной проблемой моделирования процесса сушки в аппарате с ВТС является расчет эффективного коэффициента массоотдачи. Коэффициент массоотдачи является не физической константой, а характеристикой, зависящей от физических свойств продукта и гидродинамических условий на границе раздела фаз (ламинарный или турбулентный режим течения), связанных, в свою очередь с физическими свойствами фазы, а также с геометрическими факторами. Таким образом, величина β является функцией многих, переменных, что значительно осложняет расчет или опытное определение коэффициентов массоотдачи. Коэффициент массоотдачи является аналогом коэффициента теплоотдачи в процессах переноса тепла.

Рассмотрим процесс сушки дисперсного материала в сушилке на базе ВТС на примере сушки зерна (рис. 2). Параметр влажности зависит от времени. Процесс рассматриваем как квазистационарный. Моделирование осложняется тем, что имеет место две фазы. Первая – воздух, движущийся в межзерновом пространстве, вторая – объем зерна, внутри сушилки.

Эквивалентный диаметр зерновки $d_{\text{э.з.}}$. Зерно перемешивается нагретыми трубками конденсатора. Диаметр трубок $d_{\text{тр}}$. Площадь поверхности конденсатора F . Температура поверхности конденсатора ВТС – T_n . Окружная скорость трубки модуля (ω).

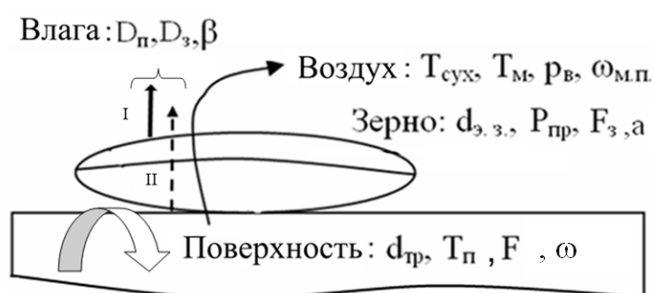


Рис. 2. Схема процесса сушки зерна в сушилке на базе ВТС.

D_n – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе; D_z – коэффициент диффузии влаги внутри зерновки; β – коэффициент массоотдачи; $T_{\text{сух}}$ – температура воздуха; T_m – температура мокрого термометра; p_v – парциальное давление насыщенного пара в воздухе; $\omega_{\text{м.п.}}$ – скорость воздуха в межзерновом пространстве; $d_{\text{э.з.}}$ – эквивалентный диаметр зерновки; $P_{\text{пр}}$ – давление пара над поверхностью материала; F_z – площадь зерна; a – коэффициент теплопроводности зерновки; $d_{\text{тр}}$ – диаметр трубок конденсатора ВТС; T_n – температура поверхности; F – площадь поверхности конденсатора ВТС, ω – окружная скорость конденсатора ВТС

Зерновка нагревается за счет контакта с нагретой поверхностью модуля. Давление пара над поверхностью материала $P_{пр}$. Площадь зерна F_3 . Зерновку омывает поток воздуха. Воздух является влагонносителем. Воздух забирает на себя влагу и охлаждает зерно. В отличие от конвективных сушилок, в которых воздух нагревает зерно. Происходит диффузия водяного пара в воздух. Параметры воздушного потока: коэффициент диффузии водяного пара в воздух D_p ; скорость воздуха в межзерновом пространстве $\omega_{м.п.}$; температура воздуха $T_{сух}$; температура мокрого термометра T_m ; давление парциальное насыщенного пара в воздухе p_v .

Движущая сила процесса сушки в первом периоде – разность парциальных давлений водяного пара над продуктом и в воздухе ($P_{пр} - p_v$).

Таким образом, в первом периоде сушки, определяющими для массоотдачи будут условия на границе раздела фаз – режим движения воздуха снаружи зерновки, площадь зерновки, температура поверхности конденсатора ВТС.

Во втором периоде сушки происходит перенос влаги в стесненных условиях. Определяющий параметр – коэффициент диффузии влаги внутри зерновки D_3 .

Интенсивность процесса массоотдачи напрямую связана с температурой нагрева зерна.

Степень нагрева зерна определяется его теплофизическими свойствами – коэффициентом температуропроводности (a), средней влажностью ($\omega_{ср}$).

Для определения β предлагается использовать уравнение в числах подобия. В данном случае надежным способом получения структур критериальных уравнений является метод анализа размерностей. На основе его общих принципов устанавливаем вид критериального уравнения для расчета коэффициента массоотдачи β .

Коэффициент массоотдачи зависит от температуры поверхности (T), температуры зерна (t), определяющего размера (d), окружной скорости трубки модуля (ω), скорости диффузии (D), температуропроводности (a).

Допустим, что T , d , ω , D , t , a имеют неизвестные показатели степени $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ и запишем:

$$\beta = D^{k_1} \cdot d^{k_2} \cdot \omega^{k_3} \cdot T^{k_4} \cdot t^{k_5} \cdot a^{k_6} \quad (5)$$

Все эти параметры состоят из трех основных размерностей: длины (L), времени (τ), температуры (T). Размерности параметров, входящих в уравнение (4.6), известны, его можно записать:

$$(L \cdot \tau^{-1}) = (L^2 \cdot \tau^{-1})^{k_1} \cdot (L)^{k_2} \cdot T^{k_4} \cdot (L^2 \cdot \tau^{-1})^{k_6} \quad (6)$$

Условия безразмерности данного выражения выводятся непосредственно из строки в размерной матрице (табл. 1).

Таблица 1 – Размерная матрица

	D	d	ω	T	t	a	Уравнение
T				k_4	k_5		$k_4+k_5=0$
τ	$-k_1$		$-k_3$			k_6	$-k_1 - k_3 - k_6 = -1$
L	$2k_1$	k_2	k_3			$2k_6$	$2k_1 + k_2 + k_3 + 2k_6 = 1$

Решаем в символьном виде систему уравнений таблицы 1, подставляем в уравнение (5).

Группируя отдельные величины, получаем критериальное уравнение вида:

$$\frac{\beta \cdot d}{D} = \left(\frac{\omega}{a} \cdot d\right)^{k_3} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{k_5} \cdot \left(\frac{a}{D}\right)^{k_6} \quad (7)$$

Таким образом, получено уравнение вида:

$$Nu_m = f(Pe, \left(\frac{t}{T}\right), \left(\frac{a}{D}\right)) \quad (8)$$

где $Nu_m = \frac{\beta \cdot d_k}{D}$ - число Нуссельта диффузионное;

$Pe_t = \frac{\omega}{a} \cdot d$ - число Пекле тепловое; $\left(\frac{t}{T}\right)$ - симплекс температур;

$\left(\frac{a}{D}\right)$ - симплекс отвечающий за теплофизические свойства материала и воздуха.

Неизвестные коэффициенты в уравнении (7) определены после обобщения экспериментальных данных для таких культур как амарант и пшеница [4,5].

Список литературы

1. O.G. Burdo, I.V. Bezbah. Rotating heat pipes in devices for heat treatment of the food-stuffs. // Applied Thermal Engineering, Volume 28, Issue 4, March 2008, Pages 341-343
2. Gajda S., Zykov A.V., Burdo O.G. Application of heat pipes for bread baking and grain drying heat technologies perfecting. // IV Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators” Minsk, Belarus, September 4-7, 2000
3. С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, И.М. Черноусов, Е.С. Буни. Исследование и анализ гигроскопических свойств семян амаранта // сборник статей «Вопросы современной науки и техники». Университет им. В.И. Вернадского. Воронеж. №4(14). 2008. Том 2. С.197–201
4. Г.Ф. Смирнов, А.В. Зыков, Е.В. Воскресенская. Обобщение экспериментальных данных сушки амаранта, тепловая модель процесса сушки // Наукові праці ОНАХТ, вип.41, том 1, Одеса 2012р., 133–137 с.
5. А.В. Зыков, Е.В. Воскресенская. Моделирование процесса сушки амаранта // Наукові праці ОНАХТ, вип.39, том 2, Одеса 2012р., 355–358 с.

УДК 66.096.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ EXPERIMENTAL STUDY OF DRYING OF DISPERSED MATERIALS IN A CENTRIFUGAL FLUIDIZED BED

Александр Александрович Надеев, Александр Валентинович Бараков,
Владимир Юрьевич Дубанин
Alexander A. Nadeyev, Alexander V. Barakov, Vladimir Y. Dubanin

Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж
Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh
(e-mail: pt_vstu@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрена конструкция установки для сушки дисперсных материалов в центробежном псевдоожигенном слое. Приведены результаты предварительной серии экспериментов по исследованию кинетики сушки.

Abstract: The design of the dryer of loose materials in a centrifugal fluidized bed is considered. The results of preliminary series of experiments to study the kinetics of drying are resulted.

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

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

Конвективная сушка, как известно является одним из самых распространённых теплотехнологических процессов в различных отраслях промышленности. Однако организация данного процесса связана со значительными затратами тепловой энергии, что определяет необходимость выбора наиболее рациональных способов его осуществления и разработку новых эффективных конструкций сушильных установок. Одним из наиболее эффективных способов сушки дисперсных материалов является метод, основанный на использовании принципа псевдоожигения. Данный метод позволяет не только интенсифицировать процессы межфазного тепло- и массообмена, но и организовать перемещение дисперсного материала, что особенно важно при осуществлении непрерывных процессов.

Рассматриваемая сушильная установка с центробежным псевдооживленным слоем представляет собой многосекционный аппарат непрерывного действия с тангенциальным подводом сушильного агента через жалюзийную газораспределительную решётку [1]. Схема одной секции такой установки приведена на рис. 1. Её основным элементом является цилиндрическая камера, образованная двумя коаксиально расположенными цилиндрическими обечайками. Кольцевая камера разделена газораспределительной решёткой 1 на две секции – рабочую 2, в которой осуществляется процесс сушки и газовую 3, которая служит для подачи сушильного агента под решётку. Лопатки решётки изогнуты таким образом, чтобы поток сушильного агента попадал в рабочую камеру под острым углом к горизонту. Для исключения провала частиц и более равномерного газораспределения решётка накрыта металлической сеткой. Такая конструкция имеет незначительное гидравлическое сопротивление и обеспечивает не только равномерное псевдооживление дисперсного материала, но и его перемещение в горизонтальной плоскости.

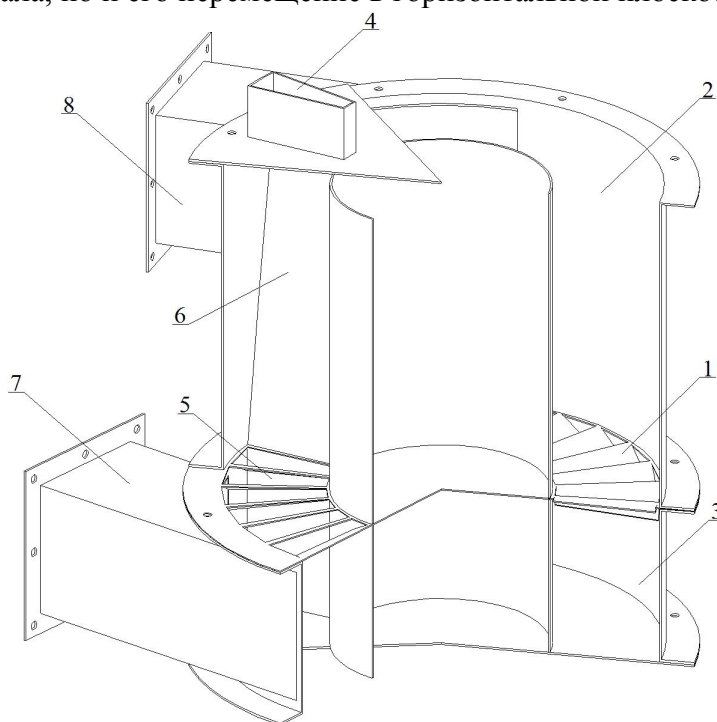


Рис. 1. Схема верхней секции сушильной установки:

*1 – газораспределительная решётка; 2 – рабочая камера; 3 – газовая камера;
4 – загрузочный патрубок; 5 – пересыпной канал; 6 – перегородка; 7 – газоподводящий
патрубок; 8 – газоотводящий патрубок.*

Принцип работы сушильной установки следующий. Влажный дисперсный материал из разгрузочного бункера через патрубок 4 подаётся на газораспределительную решётку и под действием направленного потока сушильного агента псевдооживляется и движется к пересыпному каналу 5. При этом осуществляется процесс его высушивания. Перегородка 6 препятствует перемешиванию влажного и высушенного материала. Из пересыпного канала высушенный материал поступает в следующую секцию, после чего выгружается из установки. Подача сушильного агента в аппарат осуществляется через газоподводящий патрубок 7, выброс в окружающую среду – через газоотводящий патрубок 8.

С целью проверки работоспособности и эффективности данной сушильной установки, была проведена предварительная серия экспериментов. В качестве дисперсного материала использовался силикагель диаметром 2,47 мм и плотностью 1650 кг/м³. В процессе исследования изменяли скорость сушильного агента v_2 и его начальную температуру $t_{2н}$. Всего было исследовано 15 режимов работы установки. Отдельные результаты приведены на рис. 2.

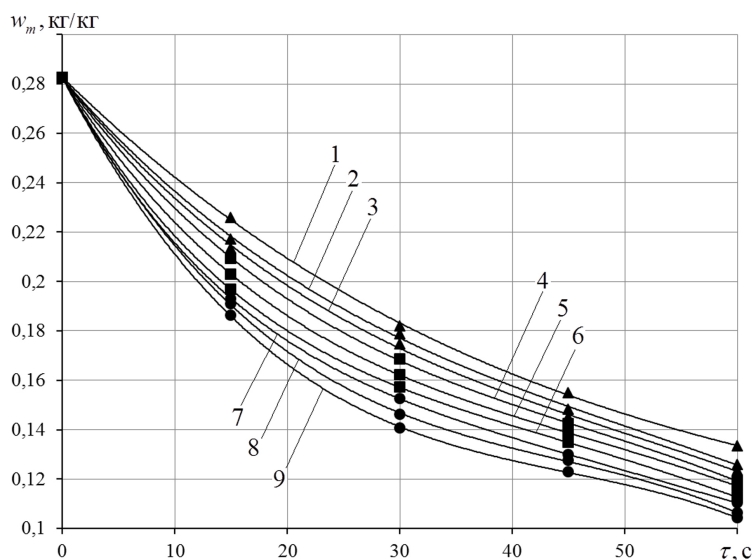


Рис. 2 Экспериментальные кривые сушки:
 ▲ $-v_2 = 2,6 \text{ м/с}$; ■ $-v_2 = 3,0 \text{ м/с}$; ● $-v_2 = 3,3 \text{ м/с}$;
 1, 4, 7 – $t_{2n} = 60 \text{ °C}$; 2, 5, 8 – $t_{2n} = 70 \text{ °C}$; 3, 6, 9 – $t_{2n} = 80 \text{ °C}$.

Проведённые эксперименты показали работоспособность данной сушильной установки, а также высокую интенсивность межфазного тепло- и массообмена. Следует отметить, что при регенерации силикагеля в сушильном шкафу требуется температура более 150 °C [2]. На данной экспериментальной установке максимальная температура сушильного агента составляла 85 °C .

Список литературы

1. Надеев А.А., Агапов Ю.Н., Стогней В.Г. Сушилка термочувствительных сыпучих материалов с центробежным псевдооживленным слоем. Патент на полезную модель № 84519. Кл. МПК - F26B 17/10.10.07.2009.
2. Неймарк И.Е., Шейнфайн Р.Ю. Силикагель, его получение, свойства и применение. Киев: Наукова думка, 1973. 202 с.

УДК 66.047

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГО- И МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ПАСТООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ ENERGY AND RESOURCE DEMAND REDUCTION AT HARD WARE DESIGN OF PASTE DRYING PROCESS

Михаил Андреевич Остапенко, Дмитрий Михайлович Солохин
 Michael A. Ostapenko, Dmitrii M. Solohin

Донецкий национальный технический университет, Украина, Донецк
 Donetsk state technical university, Ukraine, Donetsk
 (e-mail: ost@dgtu.donetsk.ua)

Аннотация: Рассматривается предложение по снижению энерго- и материалоемкости аппаратного оформления процесса сушки паст за счет утилизации паров сушки в испарителе теплового насоса. При этом исключается барометрический конденсатор, тепло паров сушки используется для нагрева химически очищенной воды, уменьшаются потери маточного раствора за счет практически полной конденсации паров сушки в испарителе теплового насоса.

Abstract: Suggestion is examined on the decline energy- and resource-demanding of apparatus registration of process of drying of pastes due to utilization of steams of drying in the vaporizer of heat-pump. A barometric condenser is thus eliminated, warmly steams of drying is used for heating of the chemically cleared water, the losses of uterine solution by a way diminish practically complete devaporation drying in the vaporizer of heat-pump.

Ключевые слова: паста; сушка; модернизация; тепловой насос; снижение энерго- и материалоемкости.

Keywords: paste; drying; modernization; heat-pump; decline of power-hungryness.

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.

Одним из наиболее распространенных аппаратов для сушки пастообразных материалов является вакуум-гребковая сушилка [1].

По принципу действия вакуум-гребковая сушилка является сушилкой контактного типа, в которой передача тепла обрабатываемому материалу осуществляется от нагретой поверхности корпуса, обогреваемого паром.

Основные направления интенсификации сушилок контактного типа следующие:

- увеличение температуры нагретой поверхности;
- увеличение эффективной поверхности контакта между обрабатываемым материалом и нагретой поверхностью;
- снижение парциального давления паров над обрабатываемым материалом.

Увеличение температуры пара в рубашке сопряжено со значительным увеличением энергозатрат, имеет ограничение при сушке термонестабильных материалов и поэтому в дальнейшем не рассматривается.

Увеличение эффективной поверхности контакта может быть достигнуто за счет увеличения геометрической поверхности контакта и улучшения перемешивания материала в сушилке, что связано с разработкой новой конструкции сушилки, т.е. – с увеличением капитальных затрат и времени модернизации.

Наиболее приемлемым направлением снижения энерго- и ресурсозатрат и требующим незначительного времени на внедрение, является снижения парциального давления паров, которое достигается за счет создания вакуума в рабочей полости сушилки. В связи с этим, это направление используется во многих вариантах аппаратного оформления процесса сушки пастообразных материалов [2].

Опыт эксплуатации вакуум-гребковых сушилок позволил установить следующие недостатки:

1. Большой унос сухого продукта из рабочей полости корпуса с парами сушки, приводящий к забиванию трубопроводов и вакуумного насоса и частым остановкам. При этом во многих случаях вакуумный насос отключается и сушка осуществляется без использования вакуума, что является экономически не целесообразным, так как приводит к необходимости увеличения времени сушки и, следовательно, - к увеличению расхода пара.

2. Большая энергоемкость процесса, что связано с потерями тепла паров сушки, которые охлаждаются в барометрическом конденсаторе водой.

3. Потери продукта, уносимого в виде пыли из рабочей полости корпуса сушилки.

4. Потери маточного раствора, пары которого конденсируются в барометрическом конденсаторе, а конденсат вместе с охлаждающей водой сбрасывается в канализацию.

5. Большая металлоемкость и громоздкость трубопроводной обвязки сушилки, что связано с наличием барометрического конденсатора, который для обеспечения удаления воды, подаваемой для охлаждения и конденсации паров сушки, располагается на значительной высоте.

Целью представляемой работы является устранение отмеченных недостатков типового аппаратного оформления сушки паст с использованием вакуум-гребковой сушилки. Для

достижения этой цели нами предлагается следующая модернизация аппаратного оформления:

1. После сушилки установить аппарат для улавливания пыли из паров суши.
2. Перегреватель паров суши исключить и вместо него установить испаритель теплового насоса.
3. Исключить барометрический конденсатор, установленный в типовой схеме перед вакуум-насосом.

Схема аппаратного оформления установки для сушки пастообразных материалов после модернизации показана на рисунке 1.

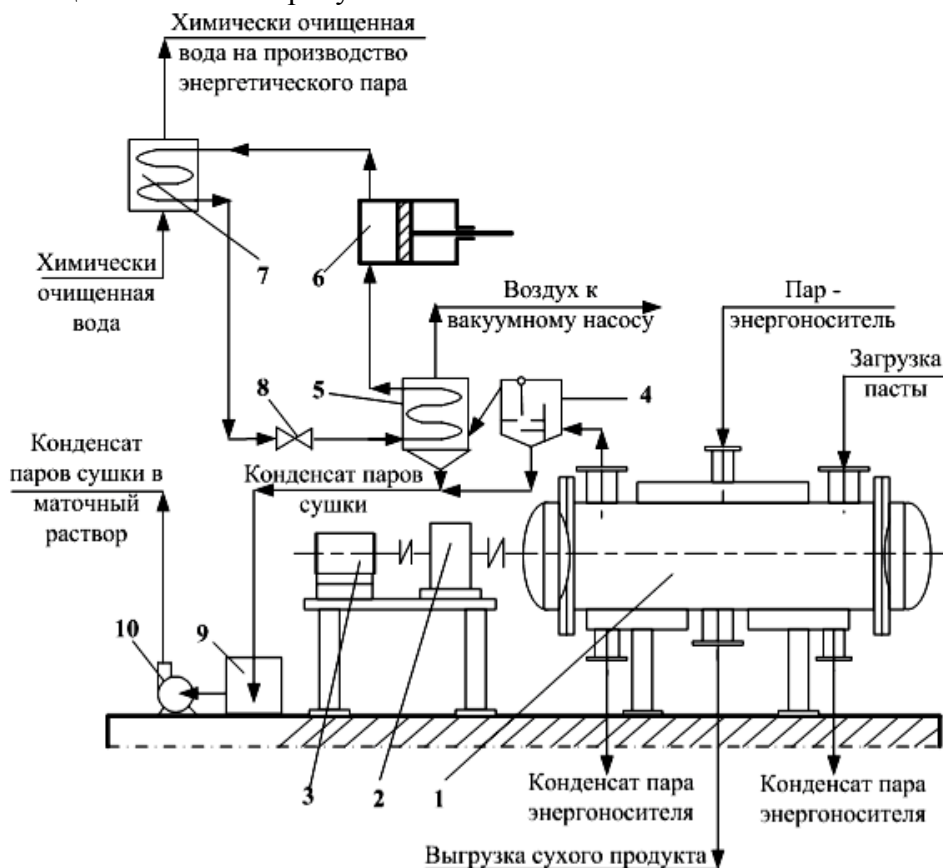


Рисунок 1. Схема аппаратного оформления установки для сушки пастообразных материалов после модернизации

Процесс сушки паст после модернизации аппаратного оформления осуществляется следующим образом. Пары суши из рабочей полости корпуса сушилки 1 поступают в центробежно-инерционный аппарат 4 мокрого типа для очистки от уносимой пыли продукта и затем - в межтрубное пространство испарителя 5 теплового насоса, в котором тепло паров суши отбирается хладагентом, кипящим в трубах испарителя [3]. При охлаждении паров суши влага конденсируется, а воздух откачивается вакуумным насосом.

В межтрубном пространстве испарителя 5 происходит практически полная конденсация паров суши, что исключает необходимость установки барометрического конденсатора перед вакуумным насосом.

Шлам из аппарата 4 (вода с растворенной пылью продукта) и конденсат паров суши, из испарителя 5 стекают в сборник 9, откуда насосом 10 направляются в сборник маточного раствора и затем - в реактор для производства продукта.

Пары кипящего хладагента отсасываются из испарителя 5 компрессором 6, сжимаются, при этом нагреваясь, и направляются в трубное пространство конденсатора 7, где охлаждаются до температуры конденсации химически очищенной водой, проходящей в межтрубном пространстве.

Нагретая химически очищенная вода, выходящая из конденсатора 7, используется для производства энергетического пара.

Жидкий хладагент из конденсатора 7 проходит капиллярный редукционный клапан 8 и направляется в трубы испарителя 5. После клапана 8 давление жидкого хладагента резко снижается, что приводит к его закипанию в трубах испарителя за счет тепла паров сушки.

ВЫВОДЫ

Реализация предложений, по модернизации аппаратного оформления процесса сушки пастообразных материалов в вакуум-гребковой сушилке позволяет:

- обеспечить бесперебойную работу вакуум-гребковой сушилки за счет улавливания частиц пыли, которые уносятся с парами сушки;
- упростить схему трубопроводной обвязки сушилки за счет исключения барометрического конденсатора;
- использовать тепло паров сушки для нагрева химически очищенной воды;
- уменьшить потери маточного раствора путем практически полной конденсации паров сушки в испарителе теплового насоса.

Список литературы

1. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 320 с.
2. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
3. Германович В., Турилин А. Альтернативные источники энергии и энергосбережение. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы. СПб.: Наука и техника, 2014. 320 с.

УДК 664.8.047

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ДИКОРАСТУЩЕГО ПЛОДОВОГО СЫРЬЯ ДОНЕЦКОГО РЕГИОНА INVESTIGATION OF DRYING WILD FRUIT RAW MATERSALS DONETSK REGION

**Анатолий Никитович Поперечный, Владимир Григорьевич Корнийчук,
Сергей Александрович Боровков
Anatoly N. Poperechnyi, Vladimir G. Korniychuk, Sergey A. Borovkov**

*Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского, Украина, Донецк
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky ,
Ukraine, Donetsk
(e-mail: doc.12022007@mail.ru; borovkovsergii@gmail.com)*

Аннотация: Рассмотрены некоторые особенности сушки дикорастущего плодового сырья Донецкого региона, приведены результаты экспериментального исследования процесса сушки измельченной дикорастущей айвы в псевдооживленном слое.

Abstract: Some features of drying raw wild fruit in the Donetsk region , the results of an experimental study of the process of drying the crushed wild quince in a fluidized bed .

Ключевые слова: дикорастущее плодово сырье, сушка, кинетика сушки, размер частиц.
Keywords: wild fruit raw materials, drying, drying kinetics, the particle size.

Одной из основных проблем, которые стоят перед человечеством на современном этапе его развития, является обеспечение населения продуктами питания. Для решения этой проблемы, необходимы разработки новых и совершенствование существующих технологий переработки дешевого пищевого сырья, к которому относится большинство дикорастущих продуктов растительного происхождения. Кроме дешевизны дикорастущего плодового сырья, одним из важнейших факторов является то, что дикорастущие плоды и ягоды

значительно превосходят культурные растения по содержанию витаминов, органических кислот, ферментов, белков, минеральных и многих других необходимых живому организму веществ [1]. Поэтому при сложной экологической обстановке в Донбассе, мы не можем отказываться от такого источника здоровья, как дикорастущее растительное сырье. Использование дикорастущего пищевого позволяет так же частично решить задачу уменьшения закупок дорогого импортного сырья (какао-бобов, многих видов орехов и т.д.) и замену его на дешевое сырье местного происхождения [2]. В настоящее время, потенциал плодового, в том числе и дикорастущего сырья, почти не используется. Так, например, коэффициент использования урожая кизила составляет 0,4. Промышленную переработку этого ценного сырья не организовано.

В связи с этим решение проблемы переработки растительных пищевых продуктов, с учетом потенциала их сбора является актуальным.

Поиск новых способов переработки дикорастущего плодового сырья, максимально сохраняющих природные полезные свойства, стали целью наших исследований.

Порошкообразные сухие продукты из овощей и фруктов уже используются как пищевые и вкусовые добавки в общественном питании, консервной, мясной, пищевоконцентратной и других отраслях пищевой промышленности. Широкие возможности использования порошкообразных пищевых красителей в кондитерской и хлебопекарной промышленности у свеклы, моркови, смородины, шелковицы. Преимуществом порошков является их хорошая восстанавливаемость при добавлении воды, воспроизводимость вкуса и аромата сырья. Сухой порошок можно хранить длительное время. Так, например, томатный порошок при температуре 20° С и относительной влажности 50 ... 60% можно хранить более двух лет.

Использование растительного сырья, как объекта содержащего ценные вещества, связано с решением ряда технологических задач. Накопление компонентов химического состава растений носит сезонный характер, заготовка их возможна в течение короткого периода. В то же время переработка плодов растительного сырья возможна в течение всего года. Поэтому первая из проблем - установление рациональных методов и режимов хранения заготовленной биомассы. Следует также добавить, что из-за многогранного химического состава растений сохранение целевых веществ может быть индивидуальным.

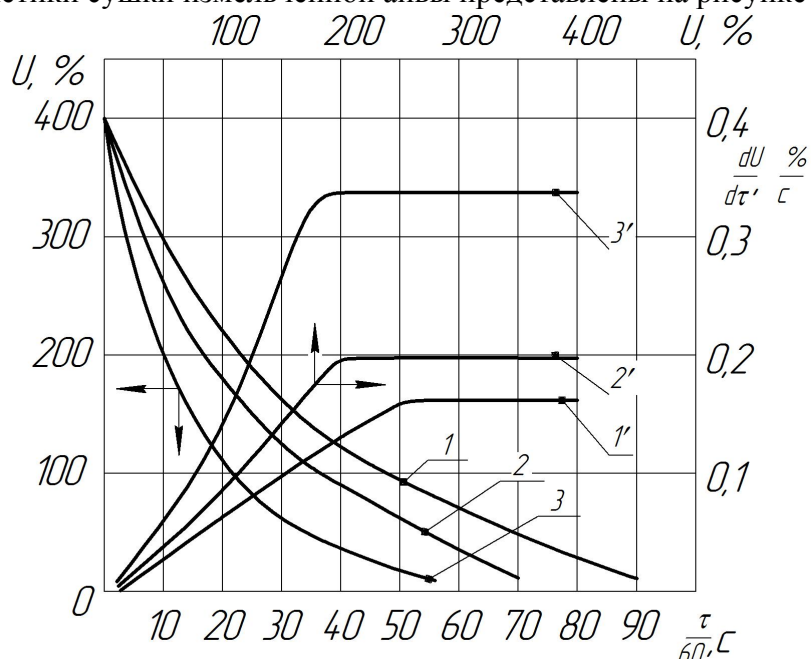
Одним из перспективных методов переработки растительного пищевого сырья является процесс сушки. Консервирование плодов по принципу анабиоза сушкой характеризуется удалением влаги до такой степени, при котором многократно сокращается скорость жизнедеятельности микроорганизмов.

Требования к качеству конечного продукта с заданными характеристиками (низкое влагосодержание, пористость, сохранение биологически активных веществ и их минимальные потери при хранении и т.п.) могут быть реализованы только при использовании определенных способов и режимов обезвоживания. Эти требования требуют также применения энергосберегающих, гибких технологий, которые обеспечивают конкурентоспособность сушеной продукции.

Процесс сушки является одним из наиболее энергозатратных процессов консервирования. Интенсивное перемешивание материала, ускоренный тепло и массообмен, благодаря чему может использоваться сушильный агент при повышенных температурах без значительной потери качества конечного продукта, достигается в сушилках с псевдооживленным слоем (ПОС). Сочетая простоту устройства с высокой удельной производительностью и легкостью автоматизации, эти сушилки нашли широкое применение в промышленности. Сведения об энергоемкости процесса обезвоживания достаточно противоречивы, однако, по имеющимся оценкам [3], она несколько ниже, чем у классических конвекционных сушилок.

Учитывая, выше сказанное, можно сделать вывод о необходимости использования всех возможностей, для снижения энергоемкости процесса сушки дикорастущего плодового сырья. С этой целью на лабораторной установке были проведены исследования сушки

дикорастущей айвы, распространенной в Донецком регионе. В работе [4] представлены данные по кинетике и гидродинамике сушки айвы в псевдооживленном слое. Размеры грани кубиков айвы 6 мм. Время сушки айвы до влагосодержания 10% при температуре сушильного агента 50 °С составило 5400 с, а при температуре 70 °С 3000 с. Результаты исследования кинетики сушки измельченной айвы представлены на рисунке 1.



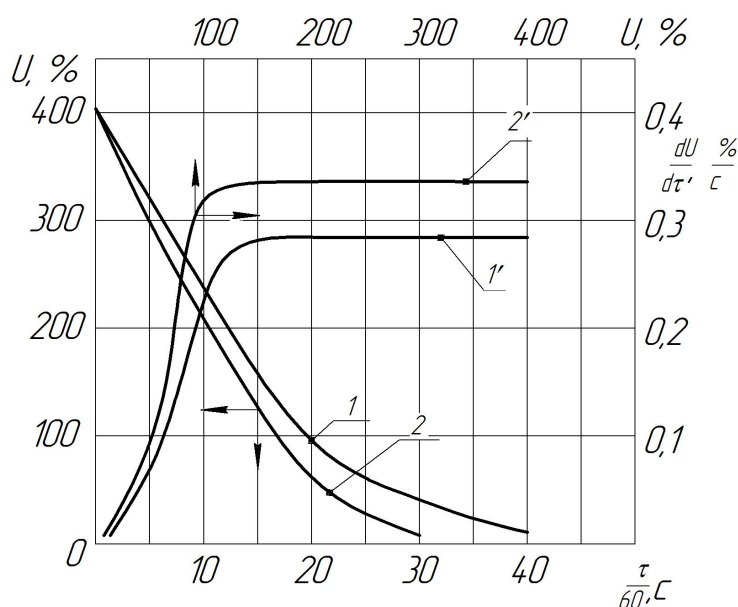
**Рисунок 1. Кривые сушки (1,2,3) и скорости сушки (1',2'3') кубиков айвы 6мм:
1 - 50 °С , 2 - 60 °С , 3 - 70 °С**

Для интенсификации процесса сушки была увеличена поверхность контакта между высушиваемым продуктом и сушильным агентом за счет измельчения айвы в ножевой мельнице. Частицы измельченной айвы в основном были продолговатой формы с размерами до 4 мм. Максимальный размер кусочков измельченных частиц не превышал 6 мм.

Исследования проводились в следующей последовательности. Подготовленная айва измельчалась в ножевой мельнице. Далее ее взвешивали и помещали в цилиндрическую сушильную камеру. После загрузки продукта включали вентилятор и калорифер. Скорость теплоносителя регулировали до образования стойкого псевдооживленного слоя. Через заданные интервалы времени из сушильной камеры делали отбор проб продукта в бюксы, для определения влагосодержания по методу высушивания до постоянной массы согласно ГОСТ 15113.4-77. Отобранные образцы досушивались в сушильном шкафу ШСУ-20 при температуре 100 ± 2 °С. Взвешивание осуществлялось на аналитических электронных весах SNUG II-300.

На основании проведенных предварительных экспериментов окончательные исследования проводились в следующем диапазоне изменения режимных параметров: температура сушильного агента составляла $t = 50-70$ °С; удельная нагрузка материала на газораспределительную решетку $G/S = 11 \dots 33 \text{ кг/м}^2$; скорость теплоносителя $v = 0 \dots 10$ м/с. Результаты исследования кинетики сушки измельченной айвы представлены на рисунке 2. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие выводы:

Процесс удаления влаги протекает практически в два периода – постоянной и убывающей скорости, участки которых четко прослеживаются на кривых удаления влаги и кривых скорости процесса.



**Рисунок 2. Кривые сушки (1,2) и скорости сушки (1',2') измельченной айвы
1 - 50 °С, 2 - 60 °С, 3 - 70 °С**

Начальная стадия процесса – прогрев материала – на графиках не просматривается. Критическая точка, характеризующая переход от периода постоянной скорости к периоду падающей скорости сушки, определяется влажностью плодов айвы около 100 – 120 %, причем положение этой точки слабо зависит от установленного режима сушки.

Продолжительность периода постоянной скорости составляет около 1020 – 1200 с, то есть примерно половину общей продолжительности процесса сушки до влажностного содержания 9...10 %.

Как видно из приведенных выше данных, при сушке измельченной айвы время процесса сокращается при температуре сушильного агента 50 °С; в 1,8, а при температуре сушильного агента 70 °С в 2,25 раза, а значит существенно снижаются затраты энергии на сушку данного продукта.

Полученные результаты будут использованы для определения рациональных параметров сушки плодового дикорастущего сырья.

Список литературы

1. Боряев В.Е. Товароведение дикорастущей плодов, ягод и лекарственно-технического сырья. М.: Экономика, 1991. - 207 с.
2. Поперечный А.Н. Перспективы переработки дикорастущего плодово-ягодного сырья / А.Н. Поперечный, В.Г. Корнийчук, С.А. Боровков // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. VII Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции. Том. 2. Санкт-Петербург, Россия, 2015 – С.106-109.
3. Романков П.Г. Сушка во взвешенном состоянии / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская. - Л.: Химия, 1979. - 272 с.
4. Поперечный А.М. Кинетика сушки айвы в псевдооживленном слое / А.Н. Поперечный, К.В. Курьянов // Проблемы ресурсо-и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК. Международная научно-техническая конференция Материалы конференции. Том. 1. Иваново, Россия, 2014 – С.254-257.

УДК 66.047.75

**АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ КАК ОБЪЕКТОВ СУШКИ В АКТИВНЫХ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ
ANALYSIS OF MATERIALS AS DRYING OBJECTS IN ACTIVE HYDRODYNAMIC
REGIMES**

**Игорь Александрович Попов
Igor A. Popov**

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow
(e-mail: igoralekspopov@ya.ru)*

Аннотация: Проведён анализ дисперсных материалов как объектов сушки в аппаратах с активными гидродинамическими режимами. Объектами являлись материалы, позволяющие исследовать гидродинамическую обстановку в аппарате, оценить данный аппарат как пылеуловитель и как аппарат для сушки волокнообразующих полимеров, учесть трудности, связанные с разделением готового продукта и сушильного агента.

Abstract: Dispersed materials as drying objects in apparatus with active hydrodynamic modes were analyzed. Objects were materials allowing to investigate the hydrodynamic conditions in the apparatus, assess it as dust catcher and as device for drying fiber-forming polymers and consider the difficulties associated with the separation of the finished product and drying agent.

Ключевые слова: активная гидродинамика, дисперсные материалы, сушка, пылеулавливание.

Keywords: active hydrodynamics, disperse materials, drying, dust catching.

Целью работы является анализ дисперсных материалов как объектов сушки в аппаратах с активными гидродинамическими режимами, в том числе со встречными закрученными потоками (ВЗП).

В качестве объектов выбраны материалы, позволяющие исследовать гидродинамическую обстановку в аппарате, оценить данный аппарат как пылеуловитель и как аппарат для сушки волокнообразующих полимеров. [1-5]. Учтено практическое назначение материалов, требуемые производительности сушильных установок и трудности, связанные с разделением готового продукта и сушильного агента.

Объектами исследования являлись тонкодисперсная гидроокись алюминия и поливинилхлорид - ПВХ суспензионный, которые рассматривались как модельные материалы. [4, 5]. В таблице 1 приведены основные свойства выбранных объектов исследования.

Как видно из таблицы 1 эквивалентный диаметр частиц гидроокиси алюминия составляет 39 мкм, а 45 % тонкой фракции имеет $d_q=50$ мкм, следовательно, данный модельный материал позволяет оценить возможность аппарата как пылеуловителя, так как является тонкодисперсным материалом [4, 5].

Таблица 1. Свойства выбранных объектов исследования

Свойства материалов	Гидроокись алюминия	ПВХ суспензионный
1	2	3
Плотность, кг/м ³	1350	1260
Эквивалентный диаметр частиц, мм	0,039.	0,1
Влажность, % начальная требуемая	10 ÷ 20 0,1	28 ÷ 30 0,3
Допустимая температура нагрева продукта, °С	200	100 ÷ 110
Термические характеристики: теплоёмкость, Дж/кг град сухого материала при максимальной гигроскопической влажности	1,17·10 ³ -	1,17·10 ³ 1,59·10 ³
Температуропроводность, м ² /с сухого материала при максимальной гигроскопической влажности	1,21·10 ⁻⁸ -	9,7·10 ⁻⁸ 17,8·10 ⁻⁸
Теплопроводность, Вт/м град сухого материала при максимальной гигроскопической влажности	0,21 -	0,058 0,118
Максимальная гигроскопическая влажность, %	6	10
Границы форм связи влаги		
Температура опыта, °С	90	80
Физико — механическая влага, %	9,3	26,2
Влага полимолекулярной адсорбции, %	1	-
Влага мономолекулярной адсорбции, %	0,3	0,2

Сушка данного материала не исследовалась, так как в работах кафедры ПАХТ МГТУ имени А.Н. Косыгина МГУДТ [4, 5] на примере гидроокиси алюминия (при высушивании его до 2,5%) показано, что для материалов первой группы классификации дисперсных материалов [4, 5] гарантируется высушивание до требуемой конечной влажности в аппарате со встречными закрученными потоками.

Второй из выбранных материалов является более сложным объектом сушки, чем гидроокись алюминия. Исследованный ПВХ суспензионный - это тонкий полидисперсный порошок, получаемый в промышленности главным образом суспензионной полимеризацией. Суспензионный ПВХ по сравнению с эмульсионным обладает лучшими диэлектрическими

свойствами, более высокой водо- и термостойкостью и характеризуется сравнительно узким молекулярно-массовым распределением. Важнейшие технологические свойства ПВХ, такие как термостабильность, температура начала разложения и др. непосредственно связаны со строением его молекул. ПВХ является полимером преимущественно линейного строения. В зависимости от способа получения ПВХ его зёрна могут быть как пористыми, так и монолитными (непористыми). Степень кристалличности суспензионного ПВХ существенно зависит от температуры полимеризации и температуры последующей термообработки. ПВХ является весьма неустойчивым полимером: воздействие тепла, света, радиации и других факторов приводит к деструкции полимера [4].

Анализ экспериментально полученных на установке с весами Мак-Бена-Бакра изотерм сорбции и десорбции паров воды образцами ПВХ и дифференциальной кривой распределения пор по радиусам [4, 5] показал, что допустимая по технологическим требованиям остаточная влажность ПВХ (равная 0,3%), достигается при десорбции влаги из пор радиусом более 80 Å.

Удельная поверхность образца ПВХ равна 1,9 м²/г, при этом зерно исследуемого ПВХ можно представить состоящим из непористых частиц размером примерно в 1 мкм, между которыми имеются поры, способные заполняться в ходе процесса сорбции.

Из анализа сорбционно-структурных характеристик следует, что удалению подлежит вся имеющаяся в ПВХ свободная вода и часть сорбционно-связанной влаги. Основное же количество воды, находящейся в адсорбированном состоянии в моно- и полислоях, удаляться не будет. Следовательно, в процессе сушки из ПВХ удаляется влага, наименее прочно связанная с материалом [4, 5].

Удаление влаги из ПВХ /до остаточной влажности 0,3%/ происходит при относительной влажности воздуха не более 96 %, поэтому ее необходимо контролировать.

Дисперсность ПВХ и содержание различных фракций оценивались с помощью электронного микроскопа. Измерения показали, что распределение частиц по размерам для исследуемых образцов ПВХ довольно узкое, эквивалентный диаметр частиц ПВХ составляет 100 мкм.

Известно, что ПВХ относится к термопластичным синтетическим материалам, для которых характерно, что с понижением температуры тепловое движение частей линейных макромолекул ослабляется и все большую роль начинает играть притяжение между соседними макромолекулами — увеличивается адгезия. При температурах ниже температуры стеклования взаимодействие между макромолекулами оказывается настолько сильным, что они крепко прилипают друг к другу и макромолекулярное вещество становится твёрдым. При нагревании материал снова может размягчиться и стать эластичным.

Можно предположить, что исследуемый суспензионный ПВХ имеет размеры частиц, характерные для суспензии. При этом частицы достаточно прочно соединены в отдельные агрегаты. Таким образом, сорбционная влага в образцах суспензионного ПВХ находится как на поверхности самих частиц, так и в очень тонких порах — в агрегатах между частицами. Удалению по технологическим условиям процесса подлежит влага, которая находится в порах агрегатов частиц.

Для полного анализа свойств материала как объекта сушки необходимо, наряду со структурными характеристиками, знание форм и энергий связи влаги с ним, а также тепловых и адгезионно-когезионных характеристик [4, 5]. Теплофизические характеристики вещества, зависящие от структуры тела, его химического состава, влагосодержания и форм связи влаги, температуры, позволяют судить о величине термического сопротивления материала и оценивать время, необходимое для его прогрева [4-7].

По методике, приведённой в [4, 5], проведён расчёт кинетики сушки ПВХ во взвешенном слое. Данная методика учитывает сложность структуры высушиваемых дисперсных материалов. При расчёте времени сушки условно предполагается, что удаление влаги происходит последовательно — сначала из более крупных пор, а затем из всё более мелких [4, 5].

Общее время сушки материала τ определяется из выражения:

$$\tau = \tau' + \sum_{i=1}^{i=n} \tau_i = \tau' + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\bar{N}_i} \frac{\rho_{ж}}{\rho_0} \int_{r_i}^{r_{i+1}} f_v(r) dr = \tau' + \sum_{i=1}^{i=n} K_i \Delta U_i \quad (1)$$

где \bar{N}_i – средняя скорость удаления влаги из пор радиусом от r_i до r_{i+1} ; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости; ρ_0 — плотность абсолютно сухого материала.

В работе [4] по кинетике сушки модельных материалов определены значения K_i для пор каждой из пяти групп пор, которые в совокупности с зависимостью времени прогрева частиц материалов от тепловых характеристик позволили составить номограмму [4, 5], с помощью которой можно определить время сушки дисперсных частиц во взвешенном слое на основании тепловых и сорбционно-структурных характеристик по формуле:

$$\tau = \tau' + K_1 \Delta U_1 + K_2 \Delta U_2 + K_3 \Delta U_3 + K_4 \Delta U_4 + K_5 \Delta U_5, \quad (2)$$

где $\Delta U_1 \dots \Delta U_5$ — влагосодержание материала, соответствующее заполнению 1 — 5-ой групп пор, то есть пор радиусом: от 1000 Å до 80 Å, от 80 Å до 60 Å, от 60 Å до 40 Å, от 40 Å до 20 Å, менее 20 Å [4].

Время удаления свободной влаги (для ПВХ это время высушивания от $U_{нач} = 28\%$ до максимальной сорбционной, равной 0,54%) при высушивании материала во взвешенном слое τ' принимается равным времени, в течение которого материалу может быть подведено количество тепла, достаточное для его прогрева до температуры испарения и превращения влаги в пар. Это время определяется по графикам в левом нижнем углу номограммы [4]; для исследуемого поливинилхлорида τ' равно примерно 1 секунде.

По формуле Томсона — Кельвина определяется значение относительной влажности воздуха, при которой происходит десорбция влаги из пор разных групп [4, 5];

Количество связанной влаги, которое необходимо удалить из ПВХ для достижения требуемой по технологическим условиям влажности - 0,3%, равно разности между максимальной сорбционной и требуемой остаточной влажностью. Как указывалось выше, удаление влаги до 0,3% происходит из пор более 80 Å, то есть из пор первой группы по классификации [4]. По графикам в правой верхней части номограммы [4] определяется время удаления связанной влаги, равное 1 секунде. Таким образом, теоретическое время сушки ПВХ во взвешенном слое равно примерно 2 секундам.

Комплексный анализ характеристик показывает, что гидроокись алюминия является хорошим модельным материалом для исследования гидродинамики аппарата ВЗП и оценки его как пылеуловителя. Поливинилхлорид позволяет на основе опытов по его сушке оценить аппарат как сушилку для волокнообразных полимеров.

Из анализа свойств дисперсного волокнообразующего материала как объекта сушки с учётом требований, предъявляемых к сушилке со взвешенным слоем материала [4], можно сформулировать основные требования, которым должен удовлетворять аппарат ВЗП, предназначенный для сушки с одновременным пылеулавливанием: 1. обеспечение требуемого времени пребывания материала в аппарате; 2. отсутствие уноса материала; 3. стабильность гидродинамического режима; 4. высокая интенсивность сушки; 5. безопасность работы установки; 6. простота обслуживания; 7. простота конструкции и низкая металлоёмкость; 8. Отсутствие дорогостоящих комплектующих изделий; 9. возможность автоматизации.

Список литературы.

1. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. М.: Энергия, 1978. 479 с.
3. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: Химия, 1987. 205 с.
4. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 319 с.
5. Сажин Б.С. Процессы сушки и промывки текстильных материалов/ Б.С. Сажин, М.К. Кошелева, М.Б. Сажина. М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2013. 301 с.

6. Кошелева М.К., Дорняк О.Р., Аналькова М.С. Выбор параметров процесса сушки капиллярно-пористого материала // Промышленная теплотехника. 2015. Т. 37. № 7. С. 166 – 167.

7. Рудобаишта С.П., Кошелева М.К. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. № 6 (360). 2015.С. 175-180.

УДК 664.724

**АНАЛИЗ ХРАНИМОСПОСОБНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОГО МАСЛИЧНОГО СЫРЬЯ,
ВЫСУШЕННОГО НА ЛЕНТОЧНЫХ СУШИЛКАХ
ANALYSIS OF STORAGE STABILITY OF VEGETABLE OILSEEDS DRIED ON
CONVEYOR DRYERS**

**Максим Васильевич Копылов, Виталий Николаевич Василенко,
Лариса Николаевна Фролова
Maksim V. Kopylov, Vitaly N. Vasilenko, Larisa N. Frolova**

*Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, Воронеж
Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh
(e-mail: kopylov-maks@yandex.ru, vvn_1977@mail.ru, fln-84@mail.ru)*

Аннотация: Рассмотрен процесс сушки растительного масличного сырья с использованием антиокислителя и влияние его на хранимоспособность при различной влажности исследуемого материала.

Abstract: The process of drying of vegetable oil raw materials with the use of the antioxidant and its effect on storage capacity for different humidity of the test material.

Ключевые слова: масличное сырье, ленточная сушилка, пересыпающийся слой.

Keywords: oil-bearing raw material, a belt drier, presuposes layer.

В настоящее время в агропромышленном комплексе России масложировая отрасль занимает ведущее место в пищевой промышленности. Основным сырьем для производства растительных масел являются масличные семена (подсолнечник, соя, рапс, рапс, амарант, сафлор и др.), которым уделяется большое внимание к повышению их качества. Для того чтобы сохранить зерно, его следует просушить, т. к. в системе технологических операций по послеуборочной обработке семян и зерна наиболее энергоемкой и ответственной с точки зрения обеспечения качественной сохранности материала является сушка. В результате возникает задача в разработке оборудования и наиболее рациональных режимов сушки семян в процессе их хранения.

В процессе исследований разработана технология, в которой для замедления процесса окисления в масличных культурах в процессе сушки добавлялся антиокислитель – аноксомер (Е323). В РФ он разрешён, не оказывает отрицательного воздействия на организм и обычно добавляется в растительные масла, способен выдерживать высокие температуры.

В ходе проведенных исследований на хранимоспособность (рис. 1) исследуемого сырья (семена амаранта) с добавлением аноксомера при сушке установлено, что без использования аноксомера кислотное число в исследуемый период увеличилось с 3,8...15,3 мг КОН/г, что делает их непригодным для дальнейшего использования. При добавлении 2 % аноксомера исследования показали аналогичный характер изменения кислотности, что и без использования аноксомера [1].

Наиболее оптимальные результаты были достигнуты при использовании 5 % аноксомера, при этом кислотность не превышала 3,8 мг КОН/г. При большем использовании аноксомера 7 %, изменение кислотного числа было таким же что и при 5 %.

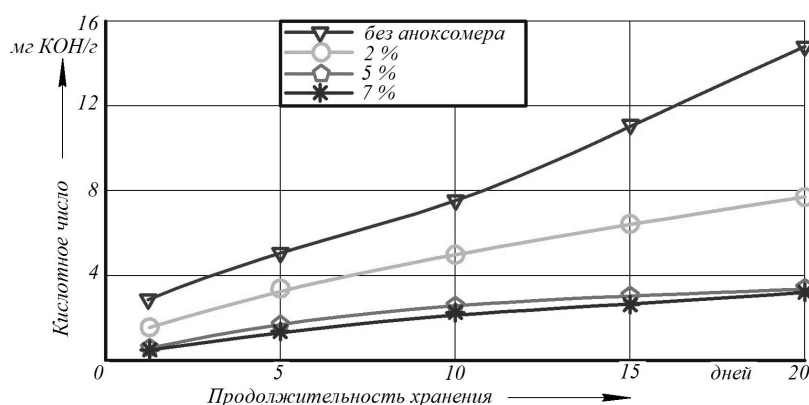


Рис. 1. Зависимость кислотного числа в амаранте от продолжительности хранения при различной влажности исходного сырья

Также для достижения рациональной влажности масличных культур в диапазоне 7...14 % была разработана энергосберегающая конструкция сушилки (рис. 2) для подсушки семян масличных культур. Данная конструкция дает возможность проводить равномерную сушку за счет применения мягких, щадящих режимов плавного пересыпания при максимальном сохранении оболочек обрабатываемого материала, интенсифицировать процесс сушки вследствие ведения его в соответствии с основными кинетическими закономерностями за счет использования комбинированных гидродинамических режимов слоя продукта.

Представленная сушилка (рис. 2) работает следующим образом. Величина вертикального перемещения П-образных направляющих 22 изменяется путем регулирования угла наклона струбины 19 за счет поворота боковой крышки 14, которая затем жестко крепится с помощью болтов к барабану 15. Таким образом, регулируется амплитуда «бегущей волны» ленты 7 в месте ее контакта с ворошителем. Изменение длины регулировочных шпилек 20 и 21 в струбине 19 позволяет установить заданный шаг «бегущей волны» ленты 7 в месте ее контакта с ворошителем [2].

При этом величина шага и амплитуды «бегущей волны», определяемая положением П-образных направляющих 22, формируется в зависимости от физико-механических свойств высушиваемого продукта (угла естественного откоса, адгезии, состояния поверхности, гранулометрического состава и т. д.) (рис. 3). После этого в загрузочный бункер 2 подают влажный исходный продукт. Включается регулируемый привод ротационного питателя 3, и влажный продукт поступает в сушилку на поверхность гибкой перфорированной ленты 7. Регулируемый привод ротационного питателя 3 позволяет обеспечить заданный темп подачи продукта на ленту 7, что особенно важно при сушке различных видов продуктов.

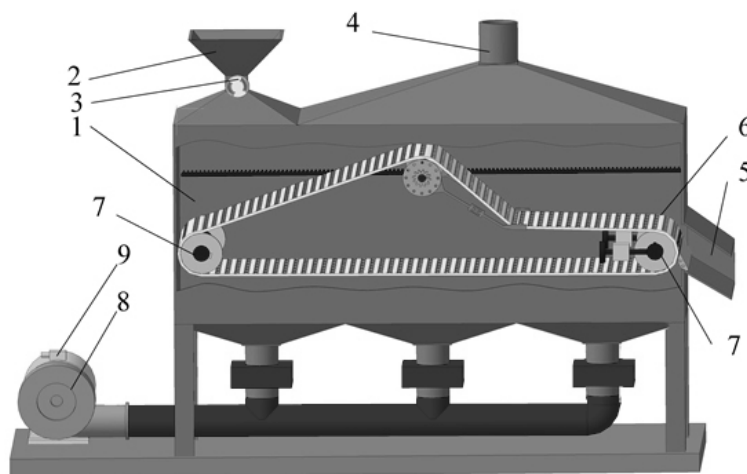


Рис. 2. Ленточная сушилка:

1 – корпус; 2 – бункер загрузки; 3 – ротационный питатель; 4, 5 – патрубки; 6 – выгрузочный лоток; 7 – лента; 8, 9 – барабаны

Одновременно включается привод, который с помощью приводного барабана 8 приводит в движение ленту 7. Режим работы приводного барабана 8 может меняться в зависимости от требуемого режима сушки: он может совершать как непрерывное движение; так и периодическое движение с выстоями. При этом влажный продукт, находящийся на ее поверхности, начинает вместе с ней перемещаться. Одновременно через секционированные патрубки 4 под соответствующие участки ленты 7 и находящегося на ее поверхности продукта подается теплоноситель с заданными параметрами. Теплоноситель поступает под соответствующие участки ленты 7, пронизывает в вертикальном направлении перфорированную ленту 7 и слой высушиваемого продукта на ней, поступает в патрубок 5 и удаляется из сушилки.

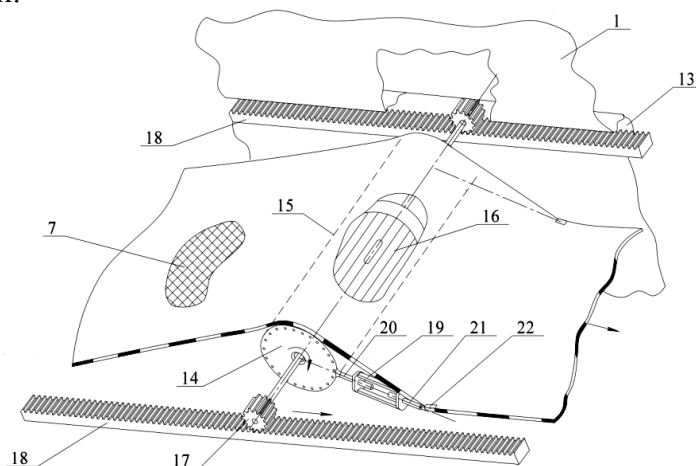


Рис. 3. Ворошитель: 1 – корпус; 7 – лента; 13 – паз; 14 – крышка; 15 – барабан; 16 – электродвигатель; 17 – зубчатое колесо; 18 – зубчатая рейка; 19 – трубуцина; 20, 21 – шпильки; 22 – направляющие

Экспериментальные исследования кинетики процесса позволили установить рациональные режимы сушки, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Рациональные режимы сушки

Производительность, кг/мин	Температура воздуха в секциях, °С:			Продолжительность сушки, ч	Расход воздуха, м ³ /ч
	Первой	Второй	Третьей		
8,3	45...50	50...55	55...65	3	5000

Таким образом, была разработана технология сушки масличных культур с добавлением антиоксиданта (аноксомера) и конструкция сушилки для ее реализации, были подобраны рациональные режимы сушки, заключающиеся в продолжительности проведения процесса сушки – 3 часа, расходе воздуха – 5000 м³/ч, и распределением температур по секциям от 45...65 °С.

Список литературы

1. Остриков, А.Н. Оценка хранимоспособности масличного сырья высушенное в плотном пересыпающемся слое [Текст] / А.Н. Остриков, В.Н. Василенко, М.В. Копылов // Труды четвертой международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2011» 20-23 сентября 2011 г / Московск. гос. агроинженерн. универ. им. В.П. Горячкина. – Москва, 2011г. – С. 78-81.

2. Пат. 2338980 Российская Федерация, МПК F26B17/04, С1. Ленточная сушилка. [Текст] / А.Н. Остриков (RU), М.А. Горбунов (RU), А.В. Коростелев (RU), В.Н. Василенко (RU); заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Воронежская государственная технологическая академия" (RU); пат. поверенный – № 2007114397/06; заявл. 16.04.2007; опубл. 20.11.2008.

СЕКЦИЯ 5. «ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ»

УДК 661.63.001

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОНВЕРСИИ
ФОСФОГИПСА
ANALYSIS OF OPPORTUNITIES FOR INTEGRATED TECHNOLOGIES CONVERSION
PHOSPHOGYPSUM**

**Леонид Леонидович Товажнянский, Петр Алексеевич Капустенко,
Светлана Ивановна Бухкало, Ольга Петровна Арсеньева,
Александр Юрьевич Перевертайленко
Leonid L. Tovazhnyanskyu, Petr A. Kapustenko, Svetlana I. Buhkhalo,
Olga P. Arsenyeva, Aleksandr Yu. Perevertaylenko**

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

Аннотация: Рассмотрены основные возможности повышения энергоэффективности процессов конверсии фосфогипса, в виде интеграции отдельных технологических процессов в состав производственного комплекса и выбора эффективного и надежного теплообменного оборудования. Стратегия выбора технологии конверсии фосфогипса должна основываться на требованиях рынка и охраны окружающей среды.

Abstract: The approaches of energy efficiency increasing, total site process integration and correct selection of effective and safe heat exchange equipment for phosphogypsum conversion processes were discussed. The strategy of selection of phosphogypsum conversion technology should be based on market demands.

Ключевые слова: комплексные технологии, теплообменные системы, конверсия фосфогипса, повышения эффективности.

Keywords: complex technology, heat exchange system, conversion of phosphogypsum, efficiency enhancement.

Фосфогипс является многотоннажным и весьма обременительным отходом производства многих отраслей промышленности, например, производства фосфорной кислоты и удобрений. Негативное влияние отвалов фосфогипса на окружающую среду проявляется в загрязнении атмосферного воздуха, подземных и поверхностных вод, почвенно-растительного покрова вредными веществами, просачивающимися даже через экран, а также в результате вымывания их атмосферными осадками и пыления [1, 2]. Возможности повышения энергоэффективности процессов конверсии фосфогипса [2], на наш взгляд, связаны с интеграцией отдельных технологических процессов в состав производственного комплекса с учетом типа энергозатрат и перспектив выбора эффективного и надежного теплообменного оборудования. Стратегия выбора технологии конверсии фосфогипса также должна основываться на требованиях рынка.

По уровню энергозатрат процессы конверсии фосфогипса можно разделить на три основные группы: 1) низкие; 2) с потреблением низкопотенциальных энергоносителей; 3) с потреблением высокопотенциальных энергоносителей (топливостойкие). К процессам первой группы относится, прежде всего, применение фосфогипса в сельском хозяйстве. Здесь, в крайнем случае, энергозатраты связаны со снижением уровня радиоактивности фосфогипса или его очисткой. К энергозатратным с потреблением низкопотенциальных энергоносителей относятся, например, процессы производства автоклавных гипсовых вяжущих (а -

полуhydrата). К энергозатратным с потреблением высокопотенциальных энергоносителей (сжигаемого топлива) относятся процессы производства обжиговых вяжущих (β -полуhydrата) и некоторые технологии комплексной переработки фосфогипса: получение цементного клинкера и серной кислоты, сульфата аммония, мела и концентрата редкоземельных элементов, серной кислоты и агломерата для дорожного строительства, серной кислоты и извести, а также другие. Проведенный анализ процессов производства обжиговых вяжущих (Knauf, Rhone-Poulenc, Nissan, CERPHOS и др.) позволяет нам составить обобщенную функциональную схему (рис. 1).

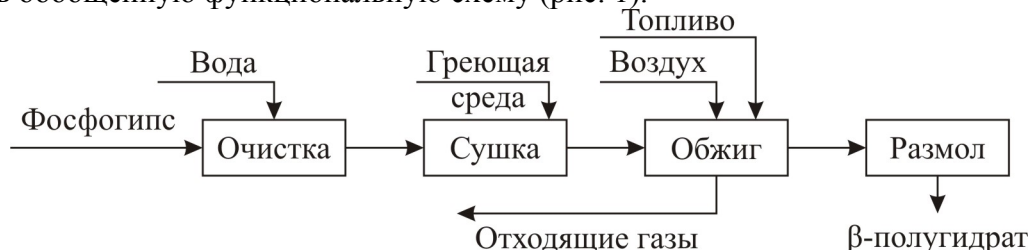


Рис. 1. Функциональная схема обжиговых вяжущих с потреблением высокопотенциальных энергоносителей

В комплексных технологиях конверсии фосфогипса также имеет место стадия высокотемпературной обработки материалов. Так, в производстве сульфата аммония, строительного мела и концентратов редкоземельных элементов обжигу подвергается карбонат кальция, в результате чего получается окись кальция, принимающая участие в ряде химических реакций.

Например, такие технологии, как совместное получение серной кислоты и строительных материалов (цементного клинкера или агломерата для дорожного строительства) [2] включают в себя процессы термического разложения фосфогипса, проходящие при очень высоких температурах, достигающих 900–1200 °С (рис. 2). Учитывая то, что для производства вяжущих в промышленных масштабах применяется, в основном, (β -полуhydrат), можно сказать, что рассмотренные технологии конверсии фосфогипса являются энергозатратными с потреблением высокопотенциальных энергоносителей, то есть требуют сжигания топлива для проведения соответствующих процессов. В настоящее время именно технологии конверсии фосфогипса, отнесенные к третьей группе по энергозатратности, могут кардинально решить проблему его более или менее полного использования. Однако здесь возникает еще одно существенное препятствие в конверсии фосфогипса – рост цен на энергоносители. Следовательно, технологии конверсии фосфогипса должны быть, прежде всего, энергоэффективными.

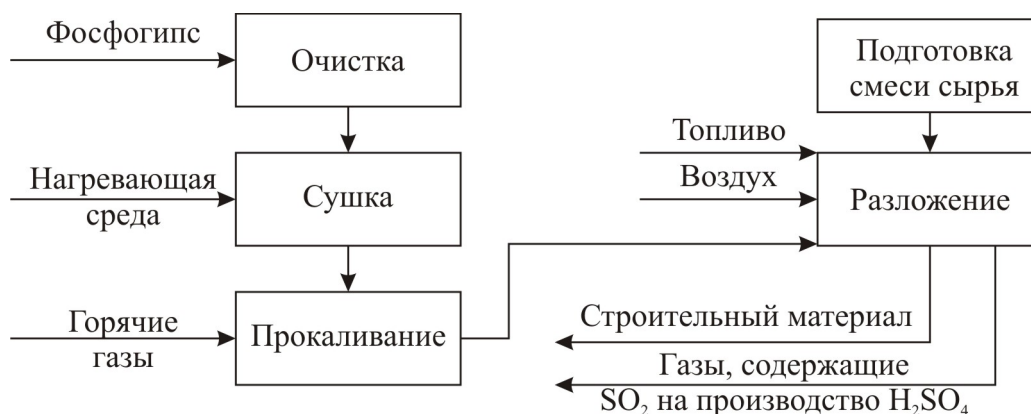


Рис. 2. Функциональная схема конверсии фосфогипса с применением стадии термического разложения

Концепции повышения энергоэффективности вышеупомянутых технологий, на наш взгляд, могут быть связаны со следующими основными особенностями проведения конверсии.

1. Повышение эффективности процессов самой комплексной технологии.
2. Интеграция отдельных технологических процессов в производственный комплекс, желательно, безотходный [3–6].
3. Организация правильного выбора эффективного и надежного теплообменного оборудования с учетом особенностей конкретного процесса.

Примером реализации первой концепции может служить процесс получения серной кислоты и цементного клинкера, разработанный компаниями Lurgi G.m.b.H и Babcock-BSH (Германия). Для разложения фосфогипса был предложен реактор с циркулирующим кипящим слоем, температура циркулирующего кипящего слоя составляла 950–1100 °С. Отходящими горячими газами реактора осуществлялся непрямой нагрев сырьевой смеси в противоточной вращающейся печи до 450 °С. Отходящие газы из печи с температурой 200–250 °С использовались как греющая среда в сушилке сырьевой смеси. Такая каскадная противоточная схема рекуперации отходящих горячих газов из реактора разложения позволила снизить расход тепла на 30 % по сравнению с процессами разложения фосфогипса, которые применялись в промышленности в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого столетия. Подобная схема рекуперации тепла может быть применена и в производстве обжиговых вяжущих (*b* -полугидрата), где тепло отходящих газов может быть использовано для подогрева воздуха, поступающего на стадию обжига.

Интеграция технологической системы конверсии фосфогипса в состав производственного комплекса фосфорсодержащих удобрений предполагает функционирование этой системы вместе с другими химико-технологическими системами производственного комплекса. Эффективно использовать энергетические ресурсы в таких комплексах позволяют специальные методы интеграции тепловых процессов. Если количество энергии, выработанной технологической системой превосходит потребности самой системы, то энергия может быть экспортирована в другую систему и, наоборот, если имеется потребность, она может быть импортирована из другой системы комплекса. Примером реализации подобной концепции может служить технология производства из фосфогипса серной кислоты и агломерата, который может быть использован в дорожном строительстве. Технология разработана Флоридским институтом исследования фосфатов компанией Davy McKee Ltd. (США). В этой технологии тепло отходящих газов предусмотрено использовать для получения пара и электроэнергии, излишки которых можно экспортировать за пределы производства. Тепло отходящих газов может быть также использовано на подогрев воды для теплоснабжения помещений производственного комплекса и/или прилегающих к комплексу жилых районов. Последовательности чередующихся нагревов и охлаждений на всех этапах производства, от первичной переработки сырья до получения конечного продукта, требует широкого использования теплообменников и интеграции потоков. В этой связи выбор эффективного теплообменного оборудования для нагрева, охлаждения и рекуперации имеет первостепенное значение для экономичной работы всего производства в целом.

Комплексная переработка фосфогипса с извлечением редкоземельных элементов (РЗЭ) является перспективной и выгодной по следующим причинам: извлечение РЗЭ из отвалов фосфогипса является, прежде всего, переработкой техногенных образований; существует устойчивая тенденция увеличения спроса и стоимости РЗЭ; комплексные методы переработки фосфогипса позволяют кроме концентратов РЗЭ получать другие продукты для различных отраслей народного хозяйства. Суммируя проведенные разными авторами исследования, можно констатировать, что существует возможность создание высокотехнологичного экологически чистого производства по переработке отвалов фосфогипса с целью извлечения редкоземельных элементов и получения чистого гипса в пределах интеграция отдельных технологических процессов в производственный

комплекс [7]. Можно констатировать, что в ближайшей перспективе по рыночным и экономическим причинам основным способом хранения останется временное складирование фосфогипса в инженерно-технических сооружениях, выполненных в соответствие с действующими требованиями. В связи с этим необходимо дальнейшее развитие методов и материальной базы гидромеханического мониторинга состояния инженерно-технических объектов складирования фосфогипса, а также систематизация, обобщение и анализ данных обследования действующих объектов. Таким образом, из представленных материалов можно сделать следующие выводы: реализация энергосберегающих мероприятий конверсии фосфогипса в сочетании с тепловой интеграцией технологических систем производственных комплексов фосфорсодержащих удобрений позволяют превратить фосфогипс из обременительного отхода производства в продукцию или, по крайней мере, сырьё для производства продукции; стратегия выбора технологии конверсии фосфогипса должна основываться на требованиях рынка, как, например, с учетом спроса на РЗЭ; следует отметить, что при определении экономической эффективности и рентабельности таких производственных комплексов капитальные вложения и эксплуатационные расходы следует рассчитывать для единого производства фосфорной кислоты и удобрений на ее основе, фосфогипса и продуктов его переработки, а также ряда других выбранных продуктов.

Список литературы

1. Гумницький Я., Малик Ю., Мальований М. Хемічне перероблення фосфогіпсу для охорони довкілля від шкідливого антропогенного забруднення // Пр. Наук. наук т-ва ім. Шевченка. – Л., 2001. – Т. 7: Екол. зб.: Екол. проблеми природокористув. та біорозмаїття Львівщини. – С.131–134.

2. Товажнянский Л.Л., Мешалкин В.П., Капустенко П.А., Бухало С.И., Арсеньева О.П., Перевертайленко А.Ю. Энергоэффективность комплексных технологий конверсии фосфогипса // Теоретические основы химической технологии, М.: 2013, т. 47, № 3, с. 279–285.

3. Production of phosphoric Acid. Booklet 4 of 8. General Product Information on Phosphoric Acid. European Fertilizers Manufactures Association, 1997. 20 pp.

4. Kuehle K.H., Knoesel K.R. // Condensed Papers of the Second Intern. Symp. on Phosphogypsum. Miami. 10–12 December 1986. P. 133–140.

5. Knoesel K.R., Lutz R. // Seminar on Phosphogypsum Utilization. Istanbul, Turkey. 1987. 28 p.

6. Akhmetov A.S., Yarosh E.B. Technical and economical characteristics of phosphogypsum conversion to sulfuric acid and plasters. Technology of Fertilizers, Leningrad, 1992, p.10–13.

7. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Бухало С.И., Перевертайленко А.Ю., Арсеньева О.П. Эффективные компоненты теплообменных систем для процессов конверсии техногенных отходов // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2011. Вип. 21. – С. 3–12.

УДК 66.047

**БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОБЕЛКОВОГО ГИДРОЛИЗОВАННОГО ПРОДУКТА И
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ
BIOTECHNOLOGICAL ASPECTS OF OBTAINING A HIGH-PROTEIN HYDROLYZED
PRODUCT AND OPTIMIZATION OF SPRAY DRYING MODES**

**Анатолий Андреевич Долинский, Надежда Алексеевна Шаркова,
Эдуард Константинович Жукотский, Анна Валериевна Декуша,
Татьяна Яковлевна Турчина
Anatoliy A. Dolinsky, Nadezhda A. Sharkova, Eduard K. Zhukotsky,
Anna V. Dekusha, Tatyana Y. Turchina**

*Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины, Украина, Киев
Institute of engineering thermophysics of Ukraine national academy of sciences, Ukraine, Kyiv
(e-mail: sharkova2007@ukr.net)*

Аннотация: Рассмотрены биотехнологические аспекты получения высокобелкового гидролизованного продукта, показано влияние дискретно-импульсного ввода энергии на гидратацию и растворимость различных белков, композиционного состава и ферментов на кинетику гидролиза, приведены результаты исследований и выбора теплотехнологических режимов распылительной сушки.

Abstract: Considered biotechnological aspects of producing high protein hydrolyzed product, the paper shows the effect of discrete input pulse energy for hydration and solubility of various proteins and enzymes composite structure on the kinetics of the hydrolysis, the results of research and selection heat technology spray drying modes.

Ключевые слова: дискретно-импульсный ввод энергии, белки, растворимость, гидролиз, распылительная сушка.

Keywords: discrete-pulse input of energy, proteins, solubility, hydrolysis, spray drying.

Современное состояние исследований в области теплофизики, био- и нанотехнологий позволило выйти на наномасштабный уровень воздействия на сложные по химическому составу и свойствам гетерогенные системы и научиться управлять процессами их термовлажностной обработки перед высушиванием, в процессе распылительной сушки и получать продукты и препараты с заданными функциональными свойствами [1].

Подготовка к процессу гидролиза предусматривает гидратацию и растворение белков. Проведенные нами исследования показали, что индекс их растворимости отличается в десятки раз. Применение метода дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) позволяет рационально, экономно и направленно использовать вводимую в гетерогенную систему энергию. За счет диссипации вводимой энергии и ее полезной реализации непосредственно в окрестности дисперсных частиц и локально на поверхности каждой белковой частицы обеспечивается повышение растворимости растительного белка на 25% и сокращение времени восстановления высокобелковых продуктов с различной структурой и свойствами в несколько раз. А за счет большей раскрываемости их поверхностей повышается эффективность последующей структурной модификации белковых соединений различной природы [2].

Комплекс исследований биотехнологических процессов, проведенный с целью создания нового высокобелкового гидролизованного продукта с определенным аминокислотным составом включал:

- определение функциональных свойств 4 различных видов высокобелковых продуктов животного и растительного происхождения, обусловленных структурной организацией, молекулярной массой и т.д.;

- изучение кинетики процесса гидролиза исследуемых белков в зависимости от каталитического воздействия 4 видов протеолитических ферментных препаратов микробной и растительной природы при изменении их массового соотношения, гидромодуля, длительности процесса гидролиза.

Проведенные исследования позволили выбрать два наиболее физиологически и биологически ценных исходных высокобелковых продукта: изолят соевого белка (ИСБ) и концентрат сывороточного белка (КСБ), которые существенно отличаются структурой, фракционным составом, молекулярной массой, аминокислотным составом, растворимостью, и 2 вида наиболее эффективных ферментных препарата [3,4].

На рис. 1 представлены кинетические зависимости процесса гидролиза водных растворов КСБ и ИСБ ферментами микробной (ФМ) и растительной природы (ФР) (кривые 1-4), а также белковой композиции ИСБ+ КСБ композицией ФМ+ ФР (кривая 5).

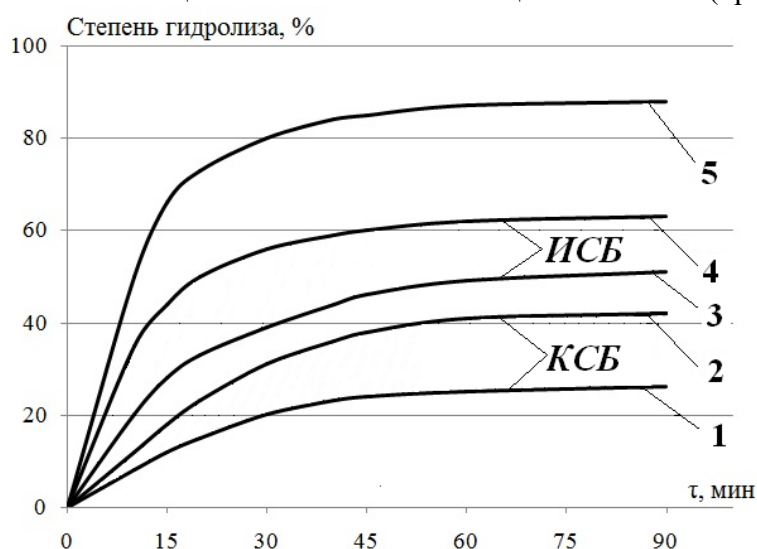


Рис. 1. Кинетика ферментативного гидролиза водных растворов белков разными ферментными препаратами: 1 – КСБ/ФР, 2 – КСБ/ФМ, 3 – ИСБ/ФР, 4 – ИСБ/ФМ, 5 – белковая композиция ИСБ +КСБ/композиция ферментов ФМ+ФР.

Как видно из рис. 1, максимальная степень гидролиза КСБ (кривые 1, 2) с использованием фермента ФР составляет 26%, ФМ – 42%. Степень гидролиза белков ИСБ (кривые 3, 4) с использованием фермента ФР составляет 51% и фермента ФМ – 63%. И только при сочетании в единой композиции в определенном соотношении белков животного и растительного происхождения и под действием комплекса ферментов ФР+ФМ (кривая 5) был получен наилучший результат: за тот же период времени степень гидролиза составила 88%.

Как показали исследования, в результате ферментативного гидролиза данной белковой композиции образуется смесь свободных аминокислот и пептидов с разной молекулярной массой, основная часть которых находится в диапазоне 3-6 кДа. Полученный новый высокобелковый гидролизованный продукт сбалансирован по составу незаменимых аминокислот и, как показано на рис. 2, наиболее приближен к составу «идеального» белка.

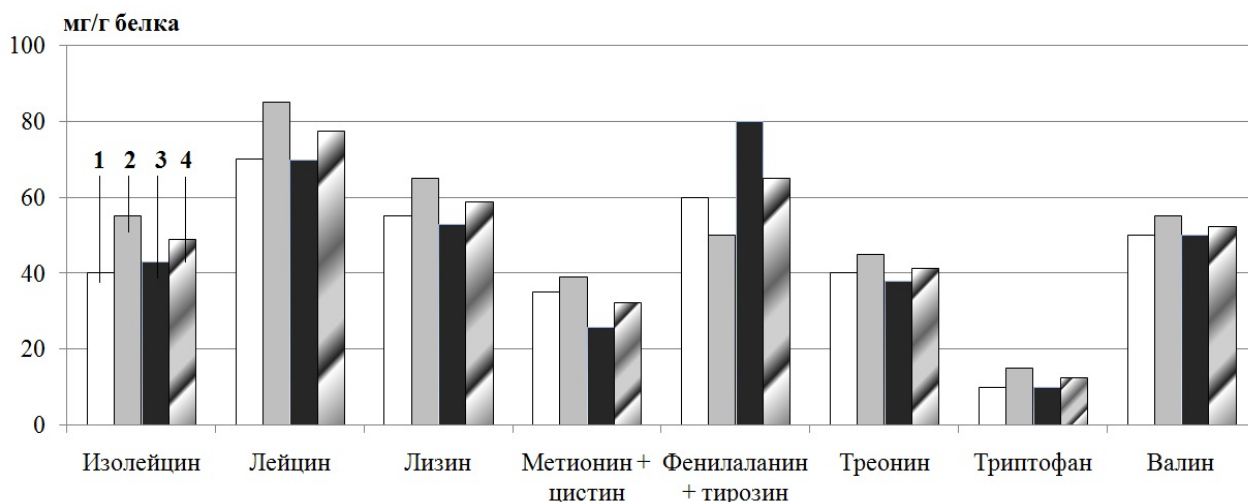


Рис. 2. Содержание незаменимых аминокислот:
1 – идеальный белок, 2 – КСБ, 3 – ИСБ,
4 – белковая композиция ИСБ+КСБ/композиция ферментов ФМ+ФР.

Таким образом, проведение направленной деструкции различных белков расширяет возможности их структурирования и создания новых белковых композиций. Используя высокую активность аминокислот, обусловленную не только их размерами (0,464-0996 нм), но и химической активностью этих природных соединений, можно регулировать биохимические, физиологические, иммунологические процессы в организме [5].

Для получения концентрата гидролизованного белкового продукта в сухой форме были проведены исследования по определению рациональных теплотехнологических режимов распылительной сушки.

Исследования кинетики сушки капель растворов белковых композиций с разным соотношением белков растительного и животного происхождения, которые проводились на экспериментальном стенде в потоке теплоносителя на системе «капля-парогазовая среда» [6], позволили получить термограммы сушки и оценить морфологические, термопластичные и адгезионные свойства высушенных частиц в потоке теплоносителя и после их охлаждения до 40-20°C.

Было установлено, что за счет термостойкости и высоких структурирующих способностей белкового материала при сушке целесообразно процесс сушки проводить при температуре теплоносителя 180-195°C, что при определенном соотношении белков растительного и животного происхождения позволяет не только получить сухую прочную с плотной структурой частицу, но и сократить время ее сушки в 1,5 раза [7-9].

С учетом результатов исследований кинетики сушки капель растворов процесс распылительной сушки гидролизованных белковых композиций проводился в трех режимах температур теплоносителя: **I режим:** $T_{вх} \leq 185^\circ\text{C}$ и $T_{вых} \leq 8^\circ\text{C}$; **II режим:** $T_{вх} \leq 190^\circ\text{C}$ и $T_{вых} \leq 87^\circ\text{C}$; **III режим:** $T_{вх} \leq 195^\circ\text{C}$ и $T_{вых} \leq 92^\circ\text{C}$.

Исследования процесса распылительной сушки белковых композиций проводились на экспериментальной распылительной сушилке ИТТФ НАН Украины РЦ-1,3, производительностью 10 кг/час по испаренной влаге.

Как показали исследования, лучшие условия для высушивания белковой композиции наблюдались во **II** и **III** диапазонах температур теплоносителя: основная масса порошка своевременно поступала в приемную емкость, а осевший на стенках камеры порошок легко осипался при периодическом простукивании. По завершении процесса сушки стенки камеры в таких опытах были чистыми, а выход порошка составлял 93-95%. Такие партии сухого белкового продукта сохраняли свои структурно-механические характеристики до 1 года.

Опытные партии продукта были исследованы по показателям конечной влажности и структурно-механическим характеристикам, приведенным в таблице 1.

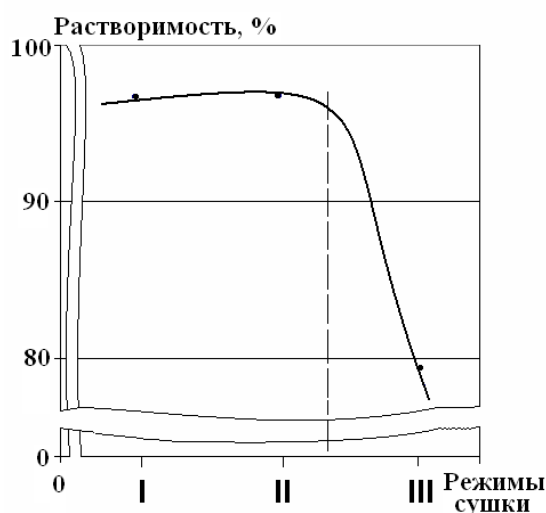
Таблица. 1. Характеристики опытных партий порошков гидролизованного белкового продукта, полученных при разных температурных режимах распылительной сушки

Температурные режимы	Характеристика порошка	Влажность $W_{\text{кон}}$, %	Угол естественного откоса, β°	Насыпная плотность ρ , кг/м ³	Средний размер частиц $\delta_{\text{ср}}$, мкм
I	Белый, склонен к комкованию и отложениям в камере	4,5	35	300	16
II	Белый, однородный, сыпучий	4,0	37	280	12
III	Желтоватого оттенка, однородный, сыпучий	3,8	38	270	10

Анализ показателей конечной влажности $W_{\text{кон}}$ и угла естественного откоса β° (табл.1) показал, что повышение температурных режимов сушки (**II** и **III** режимы) способствует снижению влажности порошка до 3,8% и улучшению его сыпучих свойств, о чем свидетельствует увеличение выхода порошка из камеры сушилки.

Учитывая высокую степень дисперсности полученных порошков и низкую их насыпную плотность (табл.1), характерную для порошкообразных белковых продуктов, полученных методом распыления, важно отметить, что для повышения насыпной плотности и улучшения сепарационных свойств таких порошков содержание сухих веществ в исходном растворе следует увеличить в 2-3 раза.

Анализ полученных данных показал, что повышение температурных режимов сушки способствует увеличению выхода продукта из сушилки и улучшению некоторых его характеристик. Однако, чрезмерное температурное воздействие, как известно, негативно отражается на качественных характеристиках высушенных пищевых продуктов. Так, сухой концентрат гидролизованного белкового продукта, высушенный при температуре теплоносителя на входе в сушильную камеру до 195°C (**III** температурный режим), отличался желтоватым оттенком (табл.1) и существенным снижением растворимости, как показано на рис. 3.

**Рис. 3. Растворимость [%] порошков белкового продукта, полученных при различных температурных режимах распылительной сушки**

Таким образом, наилучшие результаты по выходу порошкового продукта и его качеству были получены в условиях **II** температурного режима распылительной сушки.

Установленные рациональные температурные режимы распылительной сушки были использованы при наработке опытных партий сухой формы концентрата гидролизованного

белкового продукта, которые исследовались по физико-химическим, органолептическим и микробиологическим характеристикам.

Выводы

Проведенные исследования направленной деструкции комплексов различных белков и ферментов показал возможность их наноструктурирования и создания новых высокобелковых продуктов, приближенных по аминокислотному составу к «идеальному» белку.

Установленные теплотехнологические режимы распылительной сушки позволили получить концентрат гидролизованного белкового продукта высокого качества для специального и лечебно-профилактического питания людей с повышенной белковой недостаточностью.

Список литературы

1. Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине – К.; Академперіодика. 2014. – 768 с.
2. Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ : Тематический сборник статей / под общ. ред. А.А. Долинского; Институт технической теплофизики НАН Украины. – К.: Академперіодика. – 2015. – 464 с.
3. *Толстогузов В.Б.* Новые формы белковой пищи. – Агропромиздат, 1987. – 203 с.
4. *Шаркова Н.А.* Особенности производства гидролизованных белковых продуктов / Н.А. Шаркова, Э.К. Жукотский, А.В. Декуша, С.А. Иванов // Промышленная теплотехника, 2013. – Т. 35, №7. – С. 187–190.
5. *Чекман И.С., Сыровая Л.О. Новикова И.В. и др.* «Аминокислоты – наноуровневые молекулы: клинично-лабораторные исследования» / Харьков, 2014. – 154 с.
6. *Долинский А.А., Малецкая К.Д.* Распылительная сушка: В 2-х т. Т. 1 Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. – Киев: Академперіодика, 2011. – 376 с.
7. *Шаркова Н.О.* Дослідження кінетики сушіння крапель водних розчинів білкових композицій / Н.О. Шаркова, Е.К. Жукотський, Т.Я. Турчина і др. // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2013. – Вип. 43, Т.2. – С. 50–52.
8. *Турчина Т.Я.* Исследование влияния состава белковых композиций на кинетику их сушки в диспергированном состоянии / Т.Я. Турчина, Э.К. Жукотский, А.В. Декуша // Сб. материалов 5-й Межд. науч.-практ. симпозиума «Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов)». (СЭТТ-2014), г. Иваново (Россия), 2014. – Т.1, Секция 3. – С. 271–274.
9. *Турчина Т.Я.* Дослідження впливу процесів структуроутворення на ефективність зневоднення складних колоїдних систем методом розпилювання / Т.Я. Турчина, Э.К. Жукотский // Промышленная теплотехника, 2014. – Т.36, № 5. – С. 27–33.

УДК 677.02.001.5

**ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ
ОБОРУДОВАНИИ ОТДЕЛОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА
TECHNOLOGY MODIFICATION TEXTILE MATERIALS NANOPARTICLES OF
SILVER ON PROCESSING EQUIPMENT FINISHING PRODUCTION**

**Константин Иванович Кобраков*, Дмитрий Николаевич Кузнецов*,
Елена Борисовна Караваева*, Владимир Ильич Родионов**
Konstantin I. Kobrakov*, Dmitry N. Kuznetsov*, Elena B. Karavaeva*,
Vladimir I. Rodionov****

* *Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва*

**Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow*

(e-mail: occd@mail.ru)

** *ООО Эдельхаус, Россия, Москва*

***ООО Edelhaus, Russia, Moscow*

(e-mail: vladimirir@yandex.ru)

Аннотация: Приведены обобщенные данные по разработке на основе результатов проведенных исследований норм технологических режимов обработки тканей различных типов наномодифицирующим раствором, а также примеры апробации разработанных технологий в опытно-промышленном масштабе.

Abstract: Adduce generalized data for the development based on the results of the research working of technological modes of processing various types of fabrics nano-modifying solution, as well as examples of inculcation the developed technologies into pilot commercial scale.

Ключевые слова: наномодифицирующий препарат, биоцидные материалы, наноразмерные частицы серебра, комплексообразование.

Keywords: nano-modifying drug, biocide materials, nanosized silver particles, complexation.

Текстильные материалы, обладающие биоцидными свойствами используются для решения ряда важных задач: защита человека от неблагоприятных внешних биологических воздействий (белье, чулочно-носочные изделия, верхняя одежда для населения, обмундирование для служащих МЧС РФ, личного состава ВС РФ, работников АЭС и т.п.), одежда для медицинского персонала, постельное белье для медицинских учреждений, спортивная одежда и экипировка, элементы фильтрующих устройств и т.д. Обработка текстильных материалов фунгицидными препаратами позволяет получить материалы, не подвергающиеся действию плесневых грибов при длительном хранении или эксплуатации в условиях повышенной влажности и температуры.

Опыт создания и эксплуатации материалов указанного типа, безусловно, свидетельствует о том, что из антибактериальных препаратов, использующихся для получения биоцидных текстильных материалов наиболее эффективными являются препараты содержащие наноразмерные частицы серебра.

Достоинством препаратов на основе наночастиц серебра для пропитки текстильных материалов являются: полный спектр антимикробного действия (бактерии, вирусы, грибы) и подавление патогенной микрофлоры (споры), высокая биоцидность, в т.ч. способность подавлять наиболее адаптированные к внешним воздействиям микроорганизмы, отсутствие деструктирующего влияния на обрабатываемые материалы, экологическая безопасность.

В последние десятилетия разработано и предложено несколько вариантов технологии модифицирования текстильных материалов из натуральных и синтетических волокон наноразмерными частицами серебра.

Однако, предлагаемые технологии, как правило, не обеспечивают необходимую устойчивость (сохранение) биоцидных свойств к действию многократных влажных обработок (стрика). В ряде существующих методов для создания дополнительных «центров адсорбции» проводят предварительную активацию поверхности текстильных материалов, например обработку плазмой или используют некоторые специальные технологические операции в дополнение к стандартной технологической цепочке.

Целями настоящей работы является изучение химизма закрепления наноразмерных частиц серебра на волокнистых материалах и разработка на основе полученных результатов эффективной технологии процесса, позволяющей использовать имеющееся на предприятиях оборудование и не вводить новых технологических стадий обработки.

В ходе выполнения работы разработан рабочий наномодифицирующий раствор, представляющий собой воднополимерный раствор наночастиц серебра с наиболее вероятным диапазоном размеров частиц от 1,5 до 4,0 нм. Гидрозоль обладает кинетической и агрегативной устойчивостью, нелетуч, пожаро- и взрывобезопасен, по токсичности относится к 4-му классу опасности (малоопасные вещества).

В результате проведения комплекса исследований, в который вошли: спектрофотометрическое изучение взаимодействия синтезированных азокрасителей с ионами и наноразмерными частицами серебра; разработка методик крашения шерстяной, полиамидной, хлопчатобумажной ткани синтезированными красителями с предварительной, последующей или одновременной обработкой наномодифицирующим препаратом; изучение характеристик поверхности шерстяной, полиамидной, хлопковой ткани до и после крашения синтезированными красителями и обработки наномодифицирующим препаратом; изучение устойчивости полученных окрасок образцов к действию таких физико-химических факторов, как сухое и мокрое трение, стирка, действие пота; изучение влияния влажных обработок на количество серебра закрепленного на образце ткани и фунгицидные свойства наномодифицированного материала, были разработаны рекомендации к нормам технологических режимов обработки хлопчатобумажной, шерстяной и полиамидной тканей, а также трикотажных шерстяных полотен и изделий из них. Осуществлен и обоснован выбор технологического оборудования. Определены оптимальные концентрации рабочих растворов препарата на основе наносеребра с учетом природы обрабатываемых тканей.

Полотна, ткани и изделия из них могут подвергаться модификации как одновременно с процессом крашения, так до и после него. В основном это определяется особенностями базовой технологии по изготовлению той или иной продукции.

Модифицирование наноразмерными частицами серебра различных тканей следует проводить с использованием оборудования, предназначенного для крашения, белиenia, промывки и других мокрых обработок. Для тканей и полотен – это джиггеры, роликовые машины периодического действия (например, джиггер фирмы «Goller» модели «JU»), оборудование для крашения и отделки фирмы «Bruckner»).

Для изделий (или полуфабриката изделий) также используют оборудование, предназначенное для их крашения (например, КТ-100) или промышленные стиральные машины.

Модифицирование трикотажных изделий, изготовленных из пряжи со значительным (до 100%) содержанием шерсти, следует проводить на оборудовании, предназначенном для химчистки и имеющем устройства для прокачки и очистки рабочего раствора, например, с использованием трехбачковых машин серии ЕМ. Это связано с тем, что такие изделия нельзя подвергать значительным механическим воздействиям и обрабатывать при повышенной температуре.

Многофакторность процесса комплексной обработки тканей красителями и наночастицами серебра, а именно, изменение мезопористой структуры ткани в условиях крашения, конкурентная адсорбция на волокнах ткани красителя и наночастиц, а также влияние на эти процессы природы ткани, типа красителя, концентрации рабочего раствора

наномодифицирующего препарата, температурно-временных условий обработки определяет «индивидуальные» нормы технологического режима при модификации ткани определенного вида.

Разработанные рекомендации прошли опытно-промышленную апробацию на ряде предприятий отрасли: Брянский комвольный комбинат, Павло-Посадский комвольный комбинат, ООО «Заречье-сервис», ООО «СаНова», ООО «Ника-текстиль», ООО «Эдельхаус» и совместном Российско-Венгерском предприятии NaNOVO kft.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, задание № 4.143.2014/К

УДК 66.011:678.74.4.33:66.047

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕЩЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ И СУШКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ СИНТЕЗА ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИМЕРОВ
USING THE COMBINED DRYING AND POLYMERIZATION PROCESSES FOR DEVELOPMENT OF ENERGY- AND RESOURCE SAVING TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF WATER SOLUBLE POLYMERS SYNTHESIS**

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

*Ивановский государственный химико-технологический университет – ИГХТУ,
Россия, Иваново*

*Ivanovo State University of Chemistry and Technology – ISUCT, Russia, Ivanovo
(e-mail: lipin.a@mail.ru)*

Аннотация: Показана эффективность применения совмещенных процессов полимеризации и сушки на заключительной стадии получения водорастворимых полимеров акрилового ряда. На примере полиакриламида и сополимера метакрилата натрия с метакриламидом выявлены общие закономерности протекания таких совмещенных процессов.

Abstract: The efficiency of using the combined processes of polymerization and drying in the final stages of water-soluble acrylic polymers synthesis was shown. Investigation of polyacrylamide and copolymer of sodium methacrylate with methacrylamide showed the general mechanisms of the combined processes.

Ключевые слова: акриламид, метакрилат натрия, метакриламид, (со)полимеризация, сушка, совмещенный процесс, полиакриламид, сополимер

Keywords: acrylamide, sodium methacrylate, methacrylic acid amide, (co)polymerization, drying, combined process, polyacrylamide, copolymer.

Потребности в водорастворимых полимерах различных видов, в том числе и на основе производных акриловой и метакриловой кислот, неуклонно возрастают. Это обуславливает необходимость значительного повышения эффективности производства таких полимерных материалов.

Среди способов синтеза водорастворимых полимеров важное место занимает полимеризация в концентрированных водных растворах. Этот способ позволяет сократить расход мономера за счет исключения образования латекса и потерь с водой, более полно использовать теплоту реакции, а также уменьшить энергозатраты на последующей стадии сушки. Однако при практической реализации синтеза в концентрированных водных растворах появляются определенные трудности, вызванные протеканием полимеризации на заключительной стадии в высоковязкой среде. Они связаны с существенным замедлением

скорости реакции ввиду возрастания роли диффузионных процессов. Диффузия лимитирует не только реакции обрыва цепи и инициирования, но и все элементарные реакции. Скорость полимеризации снижается настолько, что в ряде случаев не удается достигнуть требуемых степеней превращения мономеров. Одним из путей преодоления этих трудностей является совмещение процесса полимеризации до глубоких степеней превращения с удалением растворителя из форполимера. В комплексе эти процессы изучены мало, поэтому задача исследования совмещенных полимеризационных и массообменных процессов, протекающих на финальной стадии синтеза водорастворимых полимеров акрилового ряда блочно-растворным способом весьма актуальна.

Для исследований были выбраны полиакриламид и сополимер метакрилата натрия с амидом метакриловой кислоты (метакриламидом).

При экспериментальных исследованиях нами синтезировался форполимер полиакриламида путем полимеризации акриламида в концентрированном водном растворе в изотермическом режиме при температуре 30 °С. Однако было показано [1, 2], что в этих условиях максимальное значение степени превращения мономера составляет 80%. Дальнейшая полимеризация, с одновременным удалением растворителя из реакционной массы, осуществлялась в сушильной камере с естественной конвекцией. Такой совмещенный процесс проводился при температурах 90÷105 °С. На рис. 1 представлены экспериментальные данные изменения основных параметров процесса во времени.

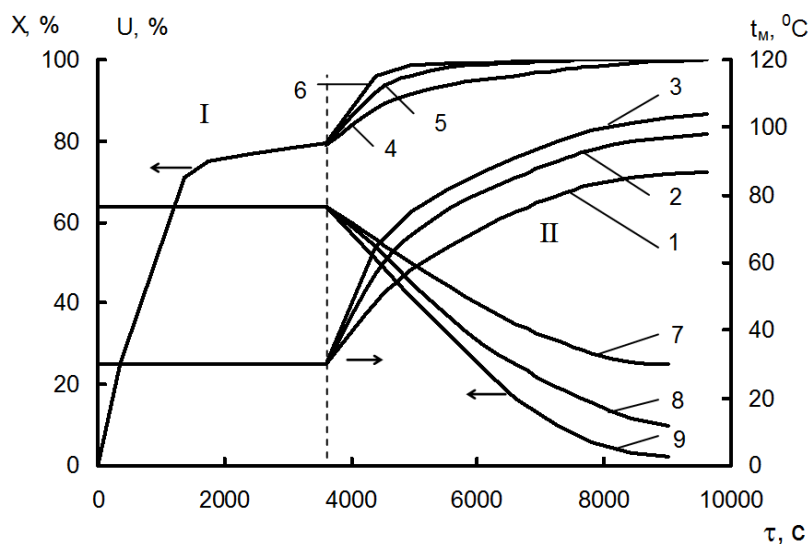


Рис. 1. Изменение температуры (1,2,3), степени превращения мономера (4,5,6) и влажности реакционной массы (7,8,9) в процессе синтеза полиакриламида. Температура сушки: 1,4,7 – 90 °С; 2,5,8 – 100 °С; 3,6,9 – 105 °С

Начальный участок кинетических кривых (4, 5, 6) характеризует полимеризацию в емкостном реакторе в концентрированном водном растворе в изотермических условиях. Второй участок соответствует совмещенному процессу полимеризации и сушки. Кинетических кривые на этом участке иллюстрируют тот факт, что повышение температуры процесса приводит к дальнейшему протеканию реакции полимеризации. Это обусловлено возрастанием скоростей трансляционной и сегментальной диффузии.

Установлено, что при совмещенном процессе синтеза полиакриламида полимеризация существенно опережает процесс сушки. Это достигается за счет того, что сушка осуществляется при естественной конвекции воздуха. Нагрев материала осуществляется от источников ИК-излучения. В таких условиях полимеризационные процессы опережают диффузионные. Повышение температуры со 100 °С до 105 °С сокращает время сушки до влажности 10 % приблизительно в 1,3 раза (кривые 7, 8, 9).

Для установления общих закономерностей протекания совмещенного процесса полимеризации и сушки у разных водорастворимых полимеров нами были проведены

исследования совмещенного процесса при синтезе сополимера метакрилата натрия с метакриламидом. Для этого нами синтезировался форполимер путем сополимеризации натриевой соли метакриловой кислоты с метакриламидом в водной среде при общей концентрации мономеров 6,75 моль/л. Сополимеризация проводилась в изотермическом режиме при температуре 60 °С. Концентрация инициатора (персульфат калия) составляла 0,002 моль/л. Как и в случае с полиакриламидом, при достижении 70% конверсии мономера реакция сополимеризации практически останавливалась вследствие увеличения вязкости реакционной массы. Поэтому дальнейшая сополимеризация совмещалась с сушкой форполимера и осуществлялась в сушильной камере с естественной конвекцией. Процесс осуществлялся при температурах 60, 70, 90 и 105 °С. Изменение влажности в процессе сушки определялось гравиметрическим методом. Для этого контрольную навеску высушивали до постоянного веса при температуре 140 °С. На рис. 2 представлены экспериментальные данные изменения основных параметров процесса во времени.

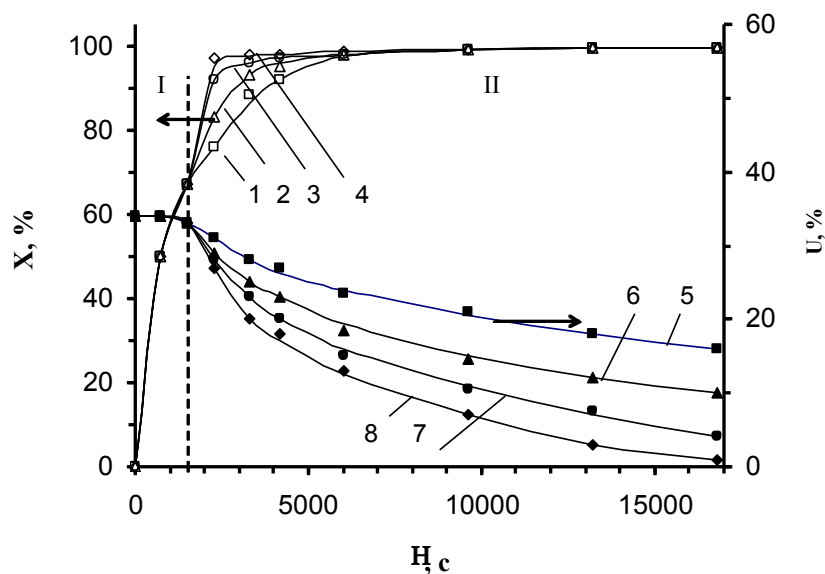


Рис. 2. Изменение степени превращения (1, 2, 3, 4) и влажности (5, 6, 7, 8) в процессе синтеза сополимера метакрилата натрия с метакриламидом. Температура сушки: 1, 5 – 60 °С, 2, 6 – 70 °С, 3, 7 – 90 °С, 4, 8 – 105 °С

Начальный участок кинетических кривых (1, 2, 3, 4) характеризует полимеризацию в емкостном реакторе в концентрированном водном растворе в изотермических условиях. Второй участок соответствует совмещенному процессу сополимеризации и сушки. За первые 1800 с сушки при указанных температурах степень превращения достигала значений, соответственно, 90, 93, 96 и 98 %, вязкость 1%-ного водного раствора продукта 1050, 900, 710 и 430 сСт, а влажность 28, 25, 23 и 20 %. Дальнейшее высушивание в течение 13500 с приводит к незначительному повышению степени превращения. Во всех опытах она достигала величины 99,5%, вязкость 1%-ного водного раствора полимера практически не изменялась. Влажность продукта снижается до 16, 10, 4 и 1%, соответственно при температурах сушки 60, 70, 90 и 105 °С.

Таким образом, кривые на рис. 1, 2 иллюстрируют общие закономерности протекания совмещенного полимеризационно-десорбционного процесса у исследуемых полимеров. В обоих случаях повышение температуры процесса способствует протеканию реакции (со)полимеризации практически до 100 % конверсии мономера. Кроме того, создание определенных условий синтеза: сушка при естественной конвекции воздуха при подводе теплоты от источников ИК-излучения, позволяет добиться ускорения полимеризационных процессов по сравнению с диффузионными.

Проведенные исследования показали, что применение совмещенных процессов полимеризации и сушки на заключительной стадии получения водорастворимых полимеров

акрилового ряда весьма эффективно. Этот приём позволяет сократить общее время технологического цикла и получать (со)полимер с требуемыми качественными показателями.

Работа выполнена в лаборатории “Тепломассоперенос в химически реагирующих средах” НИИ Термодинамики и кинетики химических процессов ИГХТУ.

Список литературы

1. *A. A. Lipin, A. V. Shibashov, and A. G. Lipin. Kinetics of Polymerisation of Acrylamide in a Concentrated Aqueous Solutions // Russian Journal of Applied Chemistry. 2015. V. 88. N 1. P. 97–102.*

2. *Липин А.А., Шибашов А.В., Липин А.Г. Моделирование процесса полимеризации акриламида в концентрированных водных растворах // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2014. Т. 57. Вып. 12. С. 85-87.*

УДК 536.241

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОКОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ОБРАЗЦОВ MATHEMATICAL MODEL OF THERMOCONTACT INTERACTION OF TWO CAPILLARY AND POROUS SAMPLES

**Ольга Роальдовна Дорняк, Виктор Михайлович Попов,
Наталья Анатольевна Анашкина
Olga R. Dornyak, Victor M. Popov, Natal'ya A. Anashkina**

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

*Voronezh state forestry engineering University named after G. F. Morozov, Russia, Voronezh
(e-mail: etgvglta@mail.ru)*

Аннотация: Предложена нестационарная сопряженная математическая модель контактного теплового и механического взаимодействия слоев капиллярно-пористых материалов на основе механики многофазных систем.

Abstract: The non-stationary interfaced mathematical model of contact thermal and mechanical interaction of layers of capillary and porous materials on the basis of mechanics of multiphase systems is offered.

Ключевые слова: теплопроводность, идеальный и неидеальный теплообмен, капиллярно-пористые материалы, многофазные системы.

Keywords: heat conductivity, ideal and nonideal heat exchange, capillary and porous materials, multiphase systems.

В расчетных методиках тепловых режимов контактной и адсорбционно-контактной сушки капиллярно-пористых материалов в подавляющем большинстве случаев используются условия идеального температурного контакта, заключающиеся в равенстве температур и тепловых потоков на условной границе контактирующих тел [1-4]. В реальности эти условия могут не выполняться, что связано со сложной геометрией поверхностей образцов контактной пары.

Если контактная пара подвергается температурному и механическому воздействию, то процесс развития температурного поля имеет нестационарный характер. Для исследования термоконтактного поведения материалов необходимо решать в общем случае сопряженную задачу для напряженно-деформированного и теплового состояния материалов.

Математическое моделирование температурной проводимости в зоне контакта еще более усложняется, если в пористой системе образцов присутствует жидкая фаза. При термическом воздействии, например, в сушильных процессах концентрация воды будет

уменьшаться, что приведет к изменению физико-механических характеристик материалов контактной пары.

В данной работе представлена математическая модель нестационарного термоконтактного взаимодействия капиллярно-пористых образцов, содержащих две фазы – твердую и газообразную. Контактная пара образована двумя слоями из материалов с разными структурными и теплофизическими свойствами. Слои подвергаются сжатию и помещаются в среду с температурой T_c . Начальная температура образцов имеет значение T_0 .

Выделим три характерных зоны деформирования и теплопередачи изучаемой системы: верхний слой высотой h_1 из пористого материала первого типа; нижний слой высотой h_2 из пористого материала второго типа; промежуточный слой толщиной h , сформированный за счет неровностей профиля поверхностей образцов (рис. 1). Слой толщиной h содержит фрагменты 1 и 2 материала, а также зоны, заполненные газом (воздухом). При сдавливании величина h уменьшается за счет деформаций фрагментов в зоне контакта и вытеснения газообразной фазы в этой области. Области (21) и (22) не содержат твердой фазы из материала 2-го и 1-го типа соответственно.

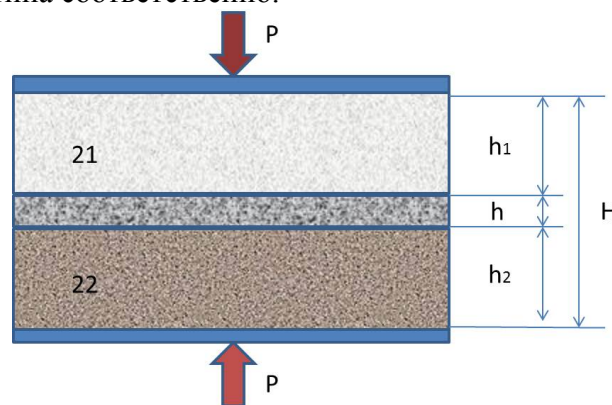


Рис.1. Расчетная схема.

Материал промежуточного контактного слоя высотой h предлагается рассматривать как самостоятельную гетерогенную среду, состоящую из двух фаз - твердой и газообразной. Твердая фаза является двухкомпонентной, она содержит фрагменты из вещества первого и второго материала с разными физико-механическими свойствами.

Математическая модель термоконтактного взаимодействия сформирована на основе методологии механики гетерофазных систем [5]. Уравнения записаны для теплофизических переменных, усредненных по объемам V_1 - первой (газообразной) фазы и V_2 - второй (твердой) фазы, причем усреднение для микроуравнений проведено отдельно по объему первого и второго материала V_{21} и V_{22} ($V_{21}+V_{22}=V_2$) [5-6]. Модель включает

- уравнения сохранения массы для газообразной фазы

$$\frac{\partial(\rho_1^o \alpha_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x^k} (\rho_1^o \alpha_1 v_1^k) = 0; \quad (1)$$

для твердой компоненты первого материала

$$\frac{\partial(\rho_{21}^o \alpha_{21})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x^k} (\rho_{21}^o \alpha_{21} v_{21}^k) = 0; \quad v_{21}^k \equiv \frac{\partial u_{21}^k}{\partial t}; \quad (2)$$

для твердой компоненты второго материала

$$\frac{\partial(\rho_{22}^o \alpha_{22})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x^k} (\rho_{22}^o \alpha_{22} v_{22}^k) = 0; \quad v_{22}^k \equiv \frac{\partial u_{22}^k}{\partial t}; \quad (3)$$

- уравнения сохранения количества движения фаз, записанные в квазистатическом приближении

для газообразной фазы

$$-\alpha_1 \nabla p_1 = \frac{\alpha_1 \mu_1 (\vec{v}_1 - \vec{v}_{21})}{K_{21}} + \frac{\alpha_1 \mu_1 (\vec{v}_1 - \vec{v}_{22})}{K_{22}}; \quad (4)$$

для твердой компоненты первого материала

$$\nabla \sigma_{21f}^k - \alpha_{21} \nabla p_1 + \frac{\alpha_1 \mu_1 (\vec{v}_1 - \vec{v}_{21})}{K_{21}} + \vec{R}_{21(22)}^\tau = 0; \quad (5)$$

для твердой компоненты второго материала

$$\nabla \sigma_{22f}^k - \alpha_{22} \nabla p_1 + \frac{\alpha_1 \mu_1 (\vec{v}_1 - \vec{v}_{22})}{K_{22}} + \vec{R}_{22(21)}^\tau = 0; \quad (6)$$

- уравнения теплопроводности

для газообразной фазы

$$c_{p1} \rho_1^o \alpha_1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{\partial}{\partial x^k} \left(\alpha_1 \lambda_1 \frac{\partial}{\partial x^k} T_1 \right) + Q_{\Sigma 1(21)} + Q_{\Sigma 1(22)}; \quad (7)$$

$$Q_{\Sigma i(j)} = s_{ij} \alpha_{ij}^\Sigma (T_i|_{\Sigma i_j} - T_i) \quad ; i, j = 1, 21, 22;$$

для твердой компоненты первого материала

$$c_{p21} \rho_{21}^o \alpha_{21} \frac{dT_{21}}{dt} = \frac{\partial}{\partial x^k} \left(\alpha_{21} \lambda_{21} \frac{\partial}{\partial x^k} T_{21} \right) + Q_{\Sigma 21(1)} + Q_{\Sigma 21(22)}; \quad (8)$$

для твердой компоненты второго материала

$$c_{p22} \rho_{22}^o \alpha_{22} \frac{dT_{22}}{dt} = \frac{\partial}{\partial x^k} \left(\alpha_{22} \lambda_{22} \frac{\partial}{\partial x^k} T_{22} \right) + Q_{\Sigma 22(1)} + Q_{\Sigma 22(21)}; \quad (9)$$

- уравнения состояния

$$\alpha_1 + \alpha_{21} + \alpha_{22} = 1; \quad (10)$$

$$p_1 = \rho_1^o T_1 B_1; \quad (11)$$

$$\frac{\rho_{21}^o}{\rho_{21_0}^o} = 1 + \beta_{p21} (p_{21} - p_0) + \beta_{T21} (T_{21} - T_{21_0}); \quad (12)$$

$$\frac{\rho_{22}^o}{\rho_{22_0}^o} = 1 + \beta_{p22} (p_{22} - p_0) + \beta_{T22} (T_{22} - T_{22_0}); \quad (13)$$

- реологические уравнения, связывающие фиктивные напряжения и полные деформации в твердой фазе материалов 1-го и 2-го типа:

$$\sigma_{21f}^{kl} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_{21f}}{\mu_{21} \alpha_{21}}} \left[\tilde{\lambda}_{21f} I_1(\varepsilon_{21}) \delta^{kl} + 2\mu_{21f} \varepsilon_{21}^{kl} + \nu_{21f} p_1 \delta^{kl} - \left(\tilde{\lambda}_{21f} + \frac{2}{3} \mu_{21f} \right) \beta_{T21} \theta_{21} \delta^{kl} \right] \quad (14)$$

$$\sigma_{22f}^{kl} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_{22f}}{\mu_{22} \alpha_{22}}} \left[\tilde{\lambda}_{22f} I_1(\varepsilon_{22}) \delta^{kl} + 2\mu_{22f} \varepsilon_{22}^{kl} + \nu_{22f} p_1 \delta^{kl} - \left(\tilde{\lambda}_{22f} + \frac{2}{3} \mu_{22f} \right) \beta_{T22} \theta_{22} \delta^{kl} \right] \quad (15)$$

$$\nu_{21f} = \frac{\tilde{\lambda}_{21} + \frac{2}{3} \mu_{21f}}{\tilde{\lambda}_{21} + \frac{2}{3} \mu_{21}}; \quad \nu_{22f} = \frac{\tilde{\lambda}_{22} + \frac{2}{3} \mu_{22f}}{\tilde{\lambda}_{22} + \frac{2}{3} \mu_{22}}$$

- соотношения Коши для макродеформаций твердой фазы:

$$\varepsilon_2^{kl} = \alpha_{21} \varepsilon_{21}^{kl} + \alpha_{22} \varepsilon_{22}^{kl}; \quad \varepsilon_{21}^{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_{21}^l}{\partial x^k} + \frac{\partial u_{21}^k}{\partial x^l} \right); \quad \varepsilon_{22}^{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_{22}^l}{\partial x^k} + \frac{\partial u_{22}^k}{\partial x^l} \right). \quad (16)$$

Уравнения (1-16) должны быть дополнены начальными и граничными условиями.

Анализ предложенной нелинейной сопряженной нестационарной математической модели может быть проведен только с использованием численных методов. Результаты такого исследования позволят оценить влияние многочисленных теплофизических факторов на величину термического сопротивления двухслойного образца и выделить те режимы внешнего воздействия, которые допускают приближение идеального температурного контакта.

Список обозначений: B – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кгК); c – теплоемкость, Дж/(кгК); u – перемещение, м; P – усилие сдвливания образцов, Н; I_1 – первый инвариант тензора; K_j – коэффициент проницаемости газовой фазой пористой системы материала j ($j=21, 22$), м; p – давление, Па; T – температура, К; t – время, с; V – объем, м³; v – скорость, м/с; s_{ij} – удельная поверхность раздела фаз i и j , м⁻¹; x^k – декартовы координаты ($k=1,2,3$), м; α – объемное содержание фазы; α_{ij}^Σ – коэффициент теплоотдачи между фазами i и j , Вт/(м²К); β_{pi}, β_{Ti} – характеристики компонент твердой фазы; σ^{kl} – тензор напряжений, Па; δ^{kl} – единичный тензор; ϵ^{kl} – тензор деформаций; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК); $\tilde{\lambda}, \mu$ – коэффициенты Ламе; θ – разность между текущей температурой и некоторым ее начальным значением, К; ρ – плотность, кг/м³;

Нижние индексы относятся: 1, 2 – к газообразной и твердой фазам, 21 и 22 – компоненты твердой фазы; f – к эффективным (фиктивным) значениям; 0 – к начальным значениям; c – к окружающей среде; Σ_{ij} – к границам раздела фаз i и j .

Верхние индексы: k, l – обозначения компонент тензоров; $^\circ$ – истинное значение физической величины.

Список литературы

1. Лыков А.В. Теплообмен. М.: Энергия, 1971. 560 с.
2. Павлюкевич Н. В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах. Минск : Ин-т тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАНБ, 2003. 140 с.
3. Рудобахта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: КолосС, 2010. 478 с
4. Байков В. И. Теплофизика. В 2 т. Т. 2. Термодинамика необратимых процессов, теория конвективного теплообмена, перенос энергии теплового излучения, процессы переноса и фазовые превращения в твердых телах / В. И. Байков, Н. В. Павлюкевич, А. К. Федотов, А. И. Шнип. – Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2014. 371 с.
5. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
6. Дорняк О.Р. Теплообмен в ненасыщенных коллоидных капиллярно-пористых анизотропных материалах. Автореф. дис... докт. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 2007. 32 с.

УДК 66.047.7; 66.047.55

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРОЦЕССА СУШКИ ПАСТООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ СТОЧНЫХ ВОД DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF DRYING PASTY WASTEWATER

Ирина Викторовна Постникова, Сергей Владимирович Воробьев,
Валерьян Николаевич Блиничев
Irina V. Postnikova, Sergey V. Vorobyev, Valeryan N. Blinichev

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

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы разработки энерго- и ресурсосберегающей сушилки активного ила, образующегося при очистке сточных вод. Представлены результаты лабораторных исследований процесса сушки разных по форме образцов ила при различных температурах сушильного агента. На основании исследований разработана принципиальная технологическая схема процесса сушки и конструктивное оформление процесса.

Abstract: This article examines the development of energy-and resource-saving dryers of sludge from wastewater treatment. Presents the results of laboratory studies of different drying process to form sludge samples at various temperatures of the drying agent. Based on research developed the concept and making a constructive process.

Ключевые слова: Ленточная сушилка, сушка паст, активный ил, конвективная сушка, кинетика сушки.

Keywords: Belt dryer, drying of pastes, activated sludge, convective drying, kinetics of drying

Введение

Активный ил - это биомасса, образовавшаяся в процессе очищения сточных вод. Состоит активный ил из различных аэробных и анаэробных бактерий, а также одноклеточных организмов таких как: амеба протей, инфузория туфелька, грибы актиномицеты, коллатки, зооглея, солнечники, бодо (жгутиковые), сувойка и черви нематоды.

Чтобы убить остатки потенциально опасных микроорганизмов, остановить процесс гнилости, а также уничтожить яйца гельминтов достаточно будет обычной термической обработки – сушки активного ила, причем температура сушки не должна быть ниже 75⁰С.

При сушке отходов очистки сточных вод необходимо решить следующие задачи:

- обеспечить замкнутый цикл по сушильному агенту, так как выброс в атмосферу отработанного воздуха запрещен по санитарно-гигиеническим соображениям;
- получить в результате сушки твердые гранулы ила с конечной влажностью не больше 10%, пригодные для дальнейшей утилизации.

Высокотемпературная сушка, т.е. сушка при температуре больше 180-200⁰С приводит к образованию пыли высушенного ила, который может образовывать взрывоопасную смесь с сушильным агентом.

Таким образом, необходимо предложить такую схему сушки активного ила, которая бы позволила обеспечить замкнутый цикл движения сушильного агента, выдержать оптимальный температурный режим сушки при минимальном расходе топлива и полной конденсации удаленной влаги.

Основная часть

Исследование процесса сушки твердых отходов сточных вод (активного ила) проводилось в сушильной камере (сушильном шкафу) с автоматическим поддержанием заданной температуры с отклонением в пределах $\pm 2^{\circ}\text{C}$. В сушильной камере имелся небольшой осевой вентилятор, создающий продольную продувку высушиваемых образцов.

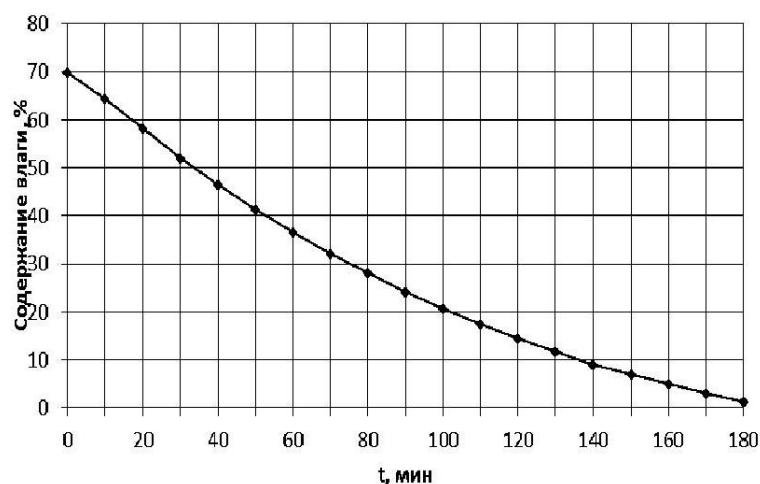
Исследования осуществлялись в два этапа.

На первом этапе исследовалось влияние формы высушиваемого образца на кинетику сушки.

На втором этапе определялось влияние температуры сушильного агента на скорость сушки.

Для того, чтобы исключить или уменьшить влияние кондуктивного (контактного) теплообмена за счет теплопроводности, высушиваемые образцы выкладывались на сетку, имеющую очень малую поверхность контакта с образцами.

На рис.1 представлена кинетика сушки пасты, сформированной в виде пластины высотой 15 мм и с размерами в плане 50 x 50 мм при температуре 75 °С.



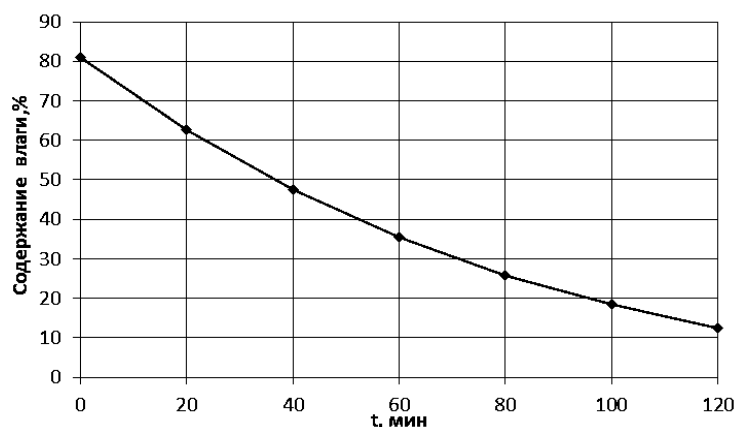
**Рис.1 - Кинетика сушки материала при температуре 75 °C
образец представляет собой пластину высотой 15 мм и размерами 50x50 мм**

Анализ кинетики сушки плоской пластины материала показывает, что, несмотря на наличие мелких частиц в пасте и небольшую температуру воздуха, сушка материала протекает от начальной влажности 70% до 10%, практически, в первом периоде сушки. Это свидетельствует о том, что в высушиваемом материале находятся открытые поры и скорость диффузионного подвода влаги из пор материала больше скорости ее испарения с поверхности.

В то же время необходимо отметить, что даже при небольшой высоте образца сушка его с 70% до 10% влажности осуществлялась в течение длительного времени – 135 минут.

На рис.2 представлена кинетика сушки образца пасты, сформированного в виде цилиндра диаметром 30 мм и длиной 100 мм.

Анализ кинетической кривой сушки образца в виде цилиндра при той же температуре 75°C показывает, что время сушки цилиндрических образцов до конечной влажности равной 10%, меньше по сравнению с образцом пластинчатой формы, даже несмотря на большую начальную влажность материала.



**Рис. 2 - Кинетика сушки материала при температуре 75 °C
образец представляет собой цилиндр диаметром 30 мм и длиной 100 мм**

Поэтому для интенсификации процесса сушки нами проведены исследования процесса сушки образцов материала цилиндрической формы уже при большей температуре, равной 150 °C.

На рис.3 представлена кинетика сушки двух образцов пасты цилиндрической формы с диаметром цилиндров 30 и 60 мм, длиной 100 мм при температуре 150 °C.

Анализ кинетических кривых сушки, представленных на рис. 3 показывает, что даже при большей температуре сушки процесс удаления влаги из пастообразного материала от

начальной влажности 70% до конечной 10% протекает, в основном, в первом периоде сушки для обоих исследуемых образцов. Этот факт свидетельствует о том, что в данном высушиваемом материале в процессе сушки не образуется плотной корки на поверхности высушиваемого образца, препятствующей диффузионному подводу к ней влаги из внутренних слоев материала.

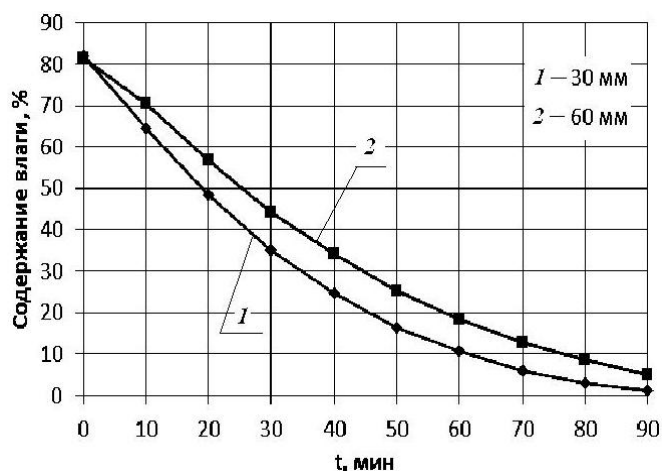


Рис. 3 - Кинетика сушки образцов диаметром 30 и 60 мм при температуре 150 °С

Анализ экспериментальных данных по кинетике сушки образцов двух диаметров свидетельствует о том, что время сушки образцов диаметром 30 мм до конечной влажности составляет уже 52 минуты, а время сушки образцов диаметром 60 мм составляет около 65 минут.

Учитывая интенсификацию процесса сушки за счет многократного поперечного обдува материала, сформированного в виде цилиндров с большой скоростью сушильного агента, можно принять, что при температуре 150⁰С оптимальное время сушки материала цилиндрической формы диаметром 60 мм будет составлять 60 минут.

Авторами были разработаны принципиальные технологические схемы процесса сушки и определены габариты сушилки для низкотемпературной (80⁰С) и относительно высокотемпературной (150⁰С) сушки ила. Основными аппаратами в данных схемах являются: ленточная сушилка, абсорбер-конденсатор, топка для нагрева сушильного агента и топка для сжигания высушенных гранул.

Абсорбер со слоем орошаемой насадки выбран для конденсации избыточной влаги в отходящем потоке сушильного агента как наиболее простой в изготовлении конденсатор. При этом обеспечиваются санитарные требования по очистке отходящих газов от остаточной пыли и дурнопахнущих примесей.

Нагрев сушильного агента осуществляется в газовой топке, т.к. использование калориферов экономически нецелесообразно, вследствие больших габаритных размеров.

Тепловой и материальный расчет ленточной сушилки твердых отходов сточных вод показывает, что при начальной температуре теплоносителя, равной 80⁰С, технологически целесообразно разбивать сушилку на три зоны сушки с отдельным подводом и отводом теплоносителя в каждую зону, а при температуре 150⁰С, разбивка сушилки на зоны уже экономически не целесообразна, вследствие невозможности достижения высокого влагосодержания выходящего теплоносителя (соответственно, низкой конечной его температуры) во второй и третьей зонах.

Поэтому при начальной температуре воздуха, равной 150⁰С, горячий воздух подается противотоком в сушилку (при поперечно-противоточном движении по сечению сушилки), меняя направление движения в каждой секции, что позволит достичь его низкой температуры и высокого влагосодержания на выходе из сушилки и существенно снизить затраты охлаждающей и конденсирующей воды в контактном абсорбере-конденсаторе.

Воздух движется противоточно-поперечно высушиваемому материалу, максимально насыщаясь испаряемой влагой. Благодаря выбранной цилиндрической форме высушиваемой пасты, в сушилке организуется активный гидродинамический режим сушки, когда в каждой секции материал обдувается горячим воздухом с переменной скоростью (рис.4), что позволяет реализовать высокие коэффициенты тепло- и массопередачи. Таким образом, в одной секции материал обдувается воздухом, проходящим снизу-вверх, а в следующей секции – сверху-вниз.

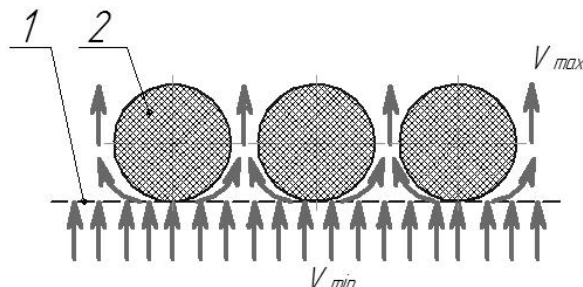


Рис.4 Схема обдува материала горячим воздухом
1 – транспортирующая сетка (решетка), 2 – высушиваемый материал

К тому же, выгодно производить сушку исходного материала, сформированного на ленте в виде цилиндров, т.к. поверхность сушки при этом может быть в 3 раза больше, чем для сплошного слоя высушиваемого ила и имеется возможность многократного обдува высушиваемого материала горячим воздухом, что, в свою очередь, повышает коэффициент массопередачи. Кроме того, сопротивление сплошного слоя материала на продув горячим воздухом в десятки раз больше, чем сопротивление слоя материала в виде цилиндров, расположенных на ленте с определенным шагом.

Исследования процесса сушки твердых отходов сточных вод показали, что после сушки до 10% конечной влажности получаются достаточно прочные цилиндры, не пылящие и достаточно легко снимаемые с мелкой сетки или решетки. Поэтому в качестве рабочего органа ленты можно использовать воздухопроницаемую сетку с малым гидравлическим сопротивлением.

Для экономии топлива, расходуемого на нагрев сушильного агента в газовой топке, авторы предлагают использовать теплоту сгорания высушенного ила. Теплотворная способность высушенного до равновесного влагосодержания активного ила составляет ≈ 3000 кДж/кг (определена в лаборатории микроанализа Института химии растворов РАН г. Иванова). Проведенные нами расчеты показывают, что при сжигании твердых отходов можно получить до 45% необходимого для сушки тепла.

Выводы

- На основании проведенных экспериментальных исследований и расчетов разработаны принципиальные схемы сушки активного ила при 80 и 150⁰С.
- Предложено конструктивное оформление процесса сушки активного ила.
- Рассмотрены вопросы экологической безопасности процесса сушки с применением замкнутой схемы циркуляции сушильного агента.
- Предложен способ экономии расхода воды для охлаждения отработанного сушильного агента и конденсации в нем паров воды.
- Предложен способ экономии расхода топлива для нагрева сушильного агента.

Список литературы

1. Б.С. Сажин. Основы техники сушки, М.: Химия, - 1984, 320 с.
2. РТМ 26-01-13-67 «Применение ленточных и вальцеленточных сушилок, М.:НИИХиммаш, 1968.
3. А.Л. Левченко. Расчет и конструирование оборудования силикатных производств. М.: Химия, 2001 г.

УДК 546.32-39:661.49.431

**ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА
ПОЛУЧЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРОДУКТА НА
СТЕКЛОВОЛОКНИСТОЙ МАТРИЦЕ ДЛЯ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ
WAYS OF INTENSIFICATION OF PROCESS OF OBTAINING OF
NANOCRYSTALLINE REGENERATIVE PRODUCT ON THE GLASS FIBER MATRIX
FOR LIFE SUPPORT SYSTEMS**

**Тамара Викторовна Гладышева*, Николай Федорович Гладышев*,
Станислав Иванович Дворецкий**, Роман Викторович Дорохов*,
Екатерина Алексеевна Рябова*, Вадим Павлович Беляев*
Tamara V. Gladysheva, Nikolay F. Gladyshev, Stanislav I. Dvoretzky, Roman V. Dorokhov,
Ekaterina A. Ryabova, Vadim P. Belyaev**

**Научно образовательный центр «ТГТУ» - ОАО «Корпорация «Росхимзащита»,
Россия, Тамбов*

**Research and Education Center, Tambov State Technical University & ОАО Korporatsiya
Roskhimzashchita, Russia, Tambov
(e-mail: tamaris55@mail.ru)*

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

Аннотация: Исследованы пути интенсификации процесса получения нанокристаллического регенеративного продукта, осажденного на стекловолоконистой матрице. Определены основные факторы, влияющие на качество целевого продукта. Показана возможность получения продукта для регенерации воздуха в потоке осушенного декарбонизованного воздуха при атмосферном давлении и температуре 100 -140 °С.

Abstract: The ways of intensification of the process of obtaining nanocrystalline regenerative product deposited on a glass fiber matrix were explored. The main factors affecting the quality of the target product are determined. The possibility of obtaining a product for regeneration air flow dried decarbonizing air at atmospheric pressure and a temperature of 100 -140 °С is shown.

Ключевые слова: нанокристаллический регенеративный продукт, надпероксид калия, стекловолоконистая матрица.

Keywords: nanocrystalline regenerative product, potassium superoxide, glass fiber matrix

Химическая регенерация воздуха в средствах защиты органов дыхания и системах жизнеобеспечения человека осуществляется при участии надпероксидов и пероксидов щелочных металлов (калия, натрия, лития) в течение многих десятилетий [1-3]. Достоинством этих соединений является очистка загрязненного воздуха от диоксида углерода CO₂ при одновременной поставке кислорода. Наибольшее применение получил регенеративный продукт на основе надпероксида калия, который производят промышленным способом из порошка KO₂ в формованном виде (гранулы, блоки, таблетки).

Технология изготовления регенеративных продуктов непрерывно совершенствуется с целью повышения их сорбционных и кинетических характеристик.

На смену гранулам различного размера, цилиндрам, таблеткам и спрессованным дискам приходят регенеративные продукты нового поколения в виде пластин, образованных из стекловолоконистой пористой матрицы (стекломата), наполненной нано- и микрокристаллами KO₂ [3-6]. Стекломат толщиной 1-2 мм состоит из хаотично переплетенных волокон диаметром от 0,1 до 3,0 мкм. Надпероксид калия образуется при диспропорционировании кристаллического дипероксосольвата пероксида калия K₂O₂·2H₂O₂,

полученного из раствора системы $\text{KOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$. Состав твердых продуктов разложения $\text{K}_2\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}_2$ уточнен методом спектроскопии КР [7]. Установлено, что эти продукты представляют собой преимущественно механические смеси надпероксида калия KO_2 с $\text{KOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и в отдельных случаях с KOH .

Внешний вид и микрофотография поверхности пластины регенеративного продукта РП представлены на рис. 1.

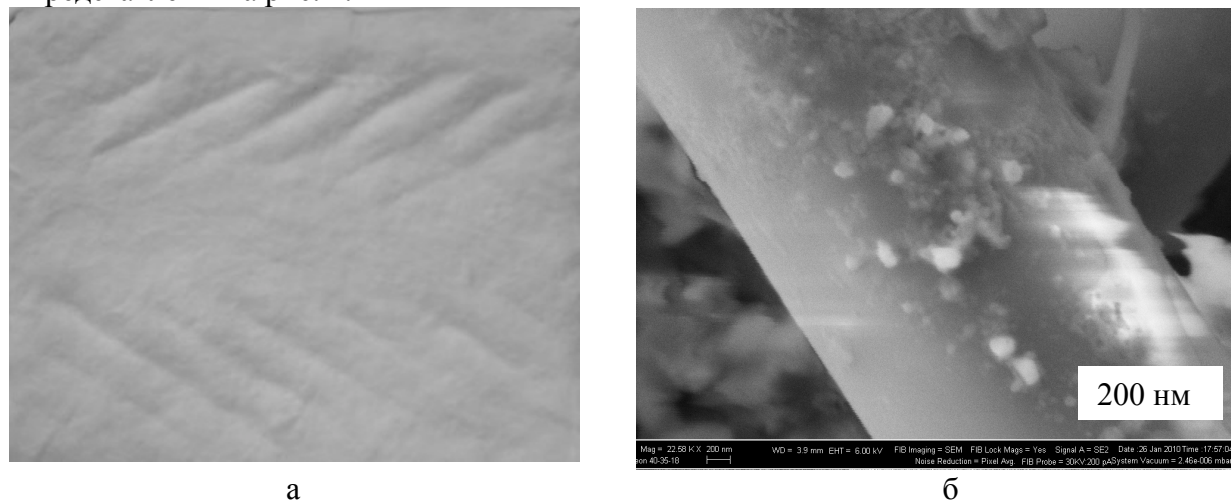


Рис. 1. Внешний вид (а) и СЭМ-изображение (б) сегмента поверхности пластины регенеративного продукта.

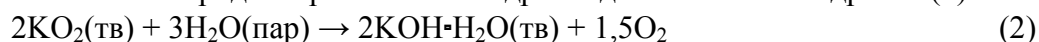
Процесс получения РП на стекловолоконистой матрице включает следующие технологические операции:

- взаимодействие 50 %-ного раствора пероксида водорода H_2O_2 и кристаллического гидроксида калия KOH ;
- нанесение полученного промежуточного аддукта - дипероксосольвата пероксида калия $\text{K}_2\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}_2$ в растворе на пористую стекловолоконистую матрицу;
- дегидратация и диспропорционирование дипероксосольвата пероксида калия при нагревании (реакция 1):

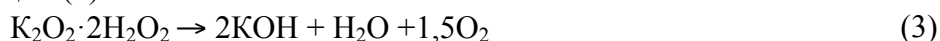


Сложность обеспечения протекания реакции (1) до конца с получением продукта высокого качества обусловлена рядом факторов:

- надпероксид калия активно реагирует с водяным паром, в результате чего выделяется весь активный кислород с образованием гидроксида калия и его гидратов (2):



В объеме стекловолоконистой высоковлажной матрицы толщиной 1-2 мм создается барьер для полного удаления свободной влаги, поскольку реакция синтеза целевого продукта на поверхности матрицы протекает быстрее, чем в слое материала. Как следствие, реакция (1) сопровождается частичным гидролитическим разложением KO_2 и образованием щелочи в образце по реакции (3):



Не менее значимым фактором, осложняющим успешное протекание реакции (1), является низкая термическая устойчивость (менее 45°C) раствора пероксосольвата $\text{K}_2\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}_2$, поэтому соотношение KO_2 и KOH в составе конечного продукта на пористой матрице регулируется параметрами технологического процесса (температура, давление, скорость эвакуации паров воды из зоны реакции и др.).

Изучены различные лабораторные способы подвода тепла: сушка в вакууме (при давлении 10^{-2} мм.рт.ст.) с ИК-нагревом; нагрев сопротивлением, основанный на различной проводимости сухой матрицы и матрицы, увлажненной щелочным раствором пероксида водорода; в токе осушенного декарбонизованного и нагретого воздуха при температуре не

выше 140 °С; в СВЧ-поле с подачей осушенного воздуха; в СВЧ-поле с подачей осушенного воздуха и одновременным воздействием вакуума [3].

Регенеративный продукт, полученный в вакууме с нагревом в ИК-диапазоне, содержал наибольшее количество активного кислорода – 22,9 %; в СВЧ-поле – 18,6 %; нагревом сопротивлением – 18,2 %; в токе осушенного и нагретого воздуха – 19,1 %.

Проведен расчет энергозатрат на производство одного килограмма пластин РП (табл. 1). Для способа в вакууме с нагревом в ИК-диапазоне он составил (кВт·ч) – 44,86; в СВЧ-поле – 21,7; нагревом сопротивлением – 20,2; в токе осушенного и нагретого воздуха – 22,1, в СВЧ-поле с подачей осушенного воздуха и одновременным воздействием вакуума – 144,9.

Наибольшие энергозатраты наблюдаются при получении продукта в вакууме с ИК-нагревом и в СВЧ-поле с подачей осушенного воздуха и одновременным воздействием вакуума, в остальных трех способах наблюдаются примерно равные значения.

Для промышленного процесса получения регенеративного продукта на матрице наиболее простым в технологическом оформлении является сушка при атмосферном давлении в потоке нагретого и осушенного воздуха. Интенсификация процесса достигается за счет регулирования скорости потока и температуры сушильного агента. Кроме того, для этого способа возможно применение известного промышленного оборудования с организацией непрерывного процесса получения пластин РП. Для протекания реакции (1) достаточно поддержание температуры сушильного агента в диапазоне 100 - 140 °С. При более высоких температурах возможно взаимодействие щелочного раствора со стекловолнистой матрицей с образованием побочных продуктов (силикатов) и снижение качества целевого продукта.

Предложенная технология позволяет решить задачу создания экологически чистого и ресурсосберегающего химического производства, единственными «отходами» которого являются пары воды и кислород, образующиеся при сушке матрицы, пропитанной щелочным раствором пероксида водорода.

Список литературы

1. *Вольнов И.И.* Перекиси, надперекиси и озониды щелочных и щелочноземельных металлов. М.: Наука, 1964. 121 с.
2. *Вольнов И.И.* Перекисные соединения щелочных металлов. М.: Наука, 1980. 160 с.
3. *Гладышева Т.В., Гладышев Н.Ф., Дворецкий С.И.* Нанокристаллический регенеративный продукт. Синтез. Свойства. Применение. М.: Изд. дом «Спектр», 2014. 120 с.
4. *Гладышев Н. Ф., Гладышева Т. В., Путин Б. В. и др.* Регенеративный продукт и способ его получения. Патент 2225241 РФ, МПК А62D9/00. 10.03.2004.
5. *Гладышев Н. Ф., Гладышева Т. В., Симаненков Э. И. и др.* Способ получения регенеративного продукта. Патент 2472556 РФ, МПК А62D9/00. 20.01.2013.
6. *Гладышев Н. Ф., Гладышева Т. В., Путин С. Б., Симаненков Э. И. и др.* Разработка нанокристаллического материала для регенерации воздуха и изделий на основе этого материала // Российский химический журнал (журнал Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). 2013. Т. LVII, № 1. С. 130.
7. *Карелин А.И., Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В.* Данные спектроскопии КР о фазовом переходе CO_2 в смеси с КОН на матрице из стекловолнистого волокна // Журнал неорганической химии. 2014. Т. 29, № 4. С. 517.

УДК 666.972.16:66.018.8

КОРРОЗИЯ БЕТОНА С ГИДРОФОБИЗИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ CORROSION OF CONCRETE WITH THE WATER-REPELLING ADDITIVES

**Варвара Евгеньевна Румянцева, Иван Васильевич Караваев,
Виктория Сергеевна Коновалова, Светлана Андреевна Логинова
Varvara E. Roumyantseva, Ivan V. Karavaev, Victoriya S. Konovalova, Svetlana A. Loginova**

*Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State Polytechnical University, Russia, Ivanovo
(e-mail: varrym@gmail.com, ivakaa@gmail.com, kotprotiv@yandex.ru,
sl79066171227@yandex.ru)*

Аннотация: Рассмотрены основы снижения водопоглощения бетона посредством введения в его состав гидрофобизирующих добавок. Проведены исследования коррозионной стойкости образцов цементного камня с добавками стеарата кальция в растворах различной степени агрессивности. Изучено изменение прочностных характеристик цементного камня под действием агрессивных сред.

Abstract: The basics of decrease in water absorption of concrete by adding the water-repelling additives to his composition are considered. Researches of corrosion resistance of cement stone samples with additives of calcium stearate in solutions of various degree of aggressiveness are conducted. Change of the strength characteristics of a cement stone under the action of aggressive environments is studied.

Ключевые слова: коррозия бетона, гидрофобизирующие добавки, водопоглощение.

Keywords: corrosion of concrete, water-repelling additives, water absorption.

Изначально, бетон, как и все остальные строительные материалы, гидрофилен, то есть притягивает воду. Гидрофильность бетона – первооснова всех разрушительных процессов, возможных в нем. Вода – главный враг бетона, именно она провоцирует начало и развитие различного рода коррозионных процессов в цементном камне. Уменьшив количество воды, способной проникать в бетон, можно значительно увеличить долговечность бетона.

Очень актуальна проблема водопроницаемости для различных строений из бетона, заглубленных в грунт (фундаменты, подвалы, погреба и т. д.). Известно, что большинство бетонов представляют собой пористо-капиллярную структуру, которой свойственна очень высокая степень водопоглощения (до 37-44 %) [1]. Основная часть пор в бетоне представлена двумя видами: капиллярными и гелевыми, которые образуют открытую пористую систему, легко заполняемую водой. При выдерживании в воде, гелевые поры заполняются полностью, а капиллярные – почти полностью, так как в них вовлекается некоторое количество воздуха. Воздушные же поры остаются полностью заполненными воздухом.

Степень водопоглощения бетона оценивается количеством воды в %, удерживаемым бетонным образцом, и отнесенным к объему или весу образца. При насыщении бетона водой существенно изменяются его физико-механические и структурные свойства: увеличиваются линейные размеры, плотность и теплопроводность, происходят структурные изменения в материале. Высокое водопоглощение отрицательно сказывается на морозостойкости бетона.

Для уменьшения водопоглощения прибегают к гидрофобизации бетона. Гидрофобизирующие добавки придают стенкам пор и капилляров в бетоне гидрофобные (водоотталкивающие) свойства. Можно также полагать, что гидрофобизирующие добавки создают в капиллярной структуре бетона дополнительную резервную пористость для миграции вытесняемой льдом воды при замерзании.

Гидрофобизирующие добавки известны науке давно, но только в 1937 г. советский ученый К.А. Андрианов разработал принципиальные основы промышленного производства одной из их разновидностей – силиконов [2]. С тех пор кремнийорганические гидрофобизаторы (силиконы) широко применяются во многих отраслях промышленности, в том числе и для придания водостойких качеств строительным материалам.

Наиболее известными химическими добавками среди водоотталкивающих материалов являются соли жирных кислот, например, стеараты и олеаты щелочных и щелочно-земельных металлов. При использовании таких добавок в результате реакции мыла с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ образуется нерастворимый стеарат кальция, который закрывает поверхность пор [3].

Коррозионная стойкость исследовалась на образцах-таблетках размером 50x5 мм, изготовленных из портландцемента марки ПЦ500-ДО с водоцементным соотношением В/Ц = 0,3. Марка цемента по водонепроницаемости W4, W6, W8 регулировалась гидрофобизирующей добавкой стеаратом кальция и перед началом эксперимента определялась согласно методике, описанной в патенте РФ №2187804 «Способ определения водонепроницаемости цементных материалов».

Образцы погружались в водный раствор MgCl_2 объемом 3000 см³, разных концентраций, приведенных в таблице 1, откуда с периодичностью 7 суток отбирались пробы для титрования, объемом 10 см³. Концентрация раствора корректировалась во времени. На момент погружения возраст образцов достиг 28 суток.

Концентрации агрессивной среды приняли в соответствии с СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии» по таблице В3 приложения В, по разной степени агрессивности жидкой неорганической среды (слабоагрессивная, среднеагрессивная, сильноагрессивная).

В ходе проведения опыта установлено, что равновесная концентрация катионов кальция достигается после 14 суток пребывания образца в коррозионной среде (рис. 1-3), тогда как для образцов без гидрофобизирующих добавок состояние равновесия наступает после 50 суток [4]. После достижения равновесия изменения концентрации не происходит вследствие затрудненности проникания коррозионной среды вглубь бетона.

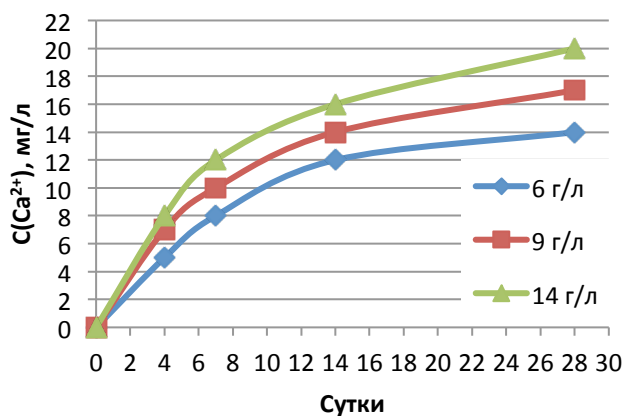


Рис. 1. Равновесные кривые концентрации катионов кальция в растворе MgCl_2 разной концентрации образцов из цемента марки по водонепроницаемости W4

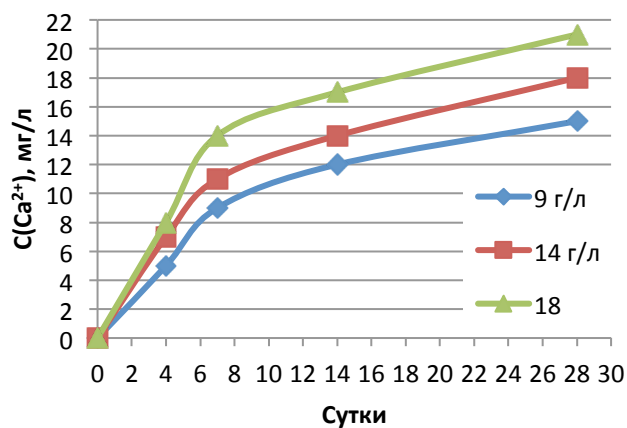


Рис. 2. Равновесные кривые концентрации катионов кальция в растворе MgCl_2 разной концентрации образцов из цемента марки по водонепроницаемости W6

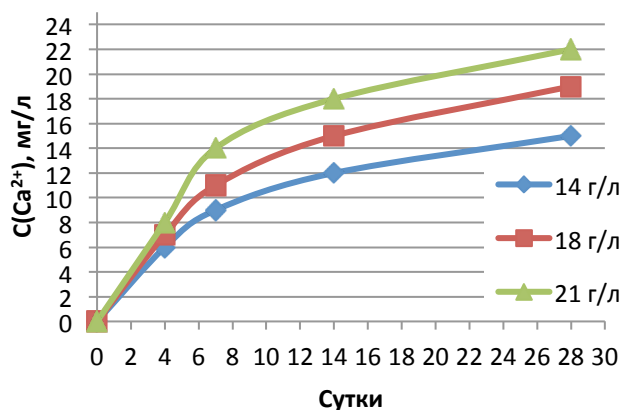


Рис. 3. Равновесные кривые концентрации катионов кальция в растворе $MgCl_2$ разной концентрации образцов из цемента марки по водонепроницаемости W8

При жидкостной коррозии образцов на портландцементе на начальном этапе происходит увеличение прочности, что может быть объяснено наполнением пор и пустот в бетоне новообразующимися продуктами коррозии. Прочность бетона увеличивается лишь на какое-то время и превышает прочность бетона, не подвергающегося воздействию агрессивной среды. Чем медленнее протекает процесс коррозии, тем позднее наступает потеря прочности бетона. У хорошо проницаемого для жидкости бетона точка перелома кривой прочности и начало видимого разрушения в сильно агрессивной среде наступает в течение недель или месяцев. Обычно же перелом кривой прочности наступает по истечении нескольких лет [5].

Таблица 1. Изменения прочности образцов при воздействии агрессивной среды

Концентрация гидрофобизирующей добавки, %	Концентрация $MgCl_2$ в растворе, г/л	Расчетное напряжение разрушения, МПа
0,3	-	63,39
	6	58,18
	9	34,27
	14	33,84
0,5	-	25,63
	9	30,65
	14	34,61
	18	50,48
0,7	-	49,2
	14	29,19
	18	45,85
	21	38,28

Установлено [6, 7], что при введении в качестве гидрофобизирующих добавок стеаратов щелочных и щелочно-земельных металлов, в начальные сроки, прочность на осевое сжатие понижается (в 2-5 раз), по сравнению с негидрофобизированными образцами бетона. В дальнейшем, при затвердевании прочность бетонов на сжатие значительно увеличивается (в 20-40 раз), однако обоснования такому действию добавок на данный момент не найдено. Повышение расчетного напряжения разрушения (таблица 1) может быть связано со структурно-фазовыми превращениями, происходящими в цементном камне при воздействии агрессивной среды.

Список литературы

1. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов. / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. М.: Стройиздат. 1979. 344 с., ил.
2. Ружинский, С. Все о пенобетоне. 2-е изд., улучшенное и дополн. / С. Ружинский, А. Портник, А. Савиных. СПб, ООО «Строй Бетон», 2006, 630 с.: ил.
3. Добавки в бетон / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, М. Коллепарди [и др.] Под ред. В.С. Рамачандрана; Пер с англ. Т.И. Розенберг и С.А. Болдырева; Под ред. А.С. Болдырева и В.Б. Ратинова. М.: Стройиздат. 1988. 575 с.: ил.
4. Румянцева, В.Е. Ингибирование коррозии железобетонных конструкций / В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, Н.М. Виталова // Строительство и реконструкция. 2014. №4 (54). С. 65-71.
5. Москвин, В.М. Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезем заполнителя / В.М. Москвин, Г.С. Рояк. М.: Изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. 1962. 210 с.
6. Мороз, М.Н. Мелкозернистые бетоны на карбонатно- и глиношлаковых вяжущих, гидрофобизированных стеаратом цинка / М.Н. Мороз, А.В. Петухов, В.И. Калашников // Молодой ученый. 2014. №13. С. 59-61.
7. Мороз, М.Н. Морозостойкость гидрофобизированных бетонов / М.Н. Мороз, В.И. Калашников, А.В. Петухов // Молодой ученый. 2014. №19. С. 222-225.

УДК [677.494.674;677.017.632]+546.763+546.814

**МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ОКСИДАМИ В УСЛОВИЯХ
МИКРОВОЛНОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ
SURFACE MODIFICATION OF TEXTILE MATERIALS SEMICONDUCTOR OXIDES
UNDER CONDITIONS OF MICROWAVE IRRADIATION**

**Вячеслав Михайлович Баранцев, Татьяна Евгеньевна Платова,
Николай Владимирович Богданов
Vyacheslav M. Barantsev, Tatiana Ye. Platova, Nikolay V. Bogdanov**

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow
(e-mail: vmb53@mail.ru, teplatova@mail.ru, bogdonic@rambler)*

Аннотация: Рассмотрены вопросы золь-гель синтеза полупроводниковых оксидов на полиэфирных волокнах в условиях микроволнового излучения.

Abstract: Considered are the issues of the Sol-gel synthesis of semiconductor oxide on polyester fibers under conditions of microwave radiation

Ключевые слова: золь-гель синтез, микроволновое излучение, оксид олова, химические волокна.

Keywords: sol-gel synthesis, microwave radiation, tin oxide, chemical fibers.

В практике получения и регулирования свойств твердофазных материалов различного целевого назначения: сорбентов, катализаторов, активных элементов солнечных батарей и сенсорных датчиков широко используются химические методы формирования металлосодержащих низкоразмерных структур. Одним из возможных химических процессов, приводящих к получению на поверхности полимерных субстратов тонких структурированных слоев, является гидролитическая поликонденсация комплексных солей определенной группы металлов в результате термической дегидратации коллоидных растворов их гидроксидов [1,2].

Использование подходов синергетики и новых представлений, связывающих свойства материалов с их фрактальной структурой, самоорганизующейся вблизи неравновесных фазовых переходов для изучения объектов супрамолекулярной химии явилось логичным развитием идей и представлений, изложенных в работах Пригожина и Стенгерса [3]. Наиболее простым случаем, когда формируются сильно неравновесные состояния твердого тела, являются процессы, происходящие при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом. В этом случае реализуется классическая открытая система, подвергающаяся притоку энергии извне.

Перспективы использования энергии сверхвысокочастотного излучения в процессах создания и высокотемпературной обработки материалов связаны с его отличительными особенностями. Объемное поглощение излучения в сочетании с специфическими свойствами микроволнового нагрева – селективностью, безинерционностью, наличием интенсивных электромагнитных полей, является основой для развития нового подхода к созданию покрытий различного функционального назначения, основанного на управлении их микроструктурой [4].

В работе рассмотрена возможность реализации основных положений теории и практики формирования наноструктурированных покрытий приведенных выше на примере микроволнового синтеза полупроводниковой пленки оксида олова на поверхности полиэфирного волокна. Образцы нитей и ткани из полиэфирного волокна плюсовали водными растворами хлоридов олова в сочетании с хлоридами других металлов и активаторами процесса их гидролиза. После удаления избытка плюсовочного раствора при различной степени отжима влажные образцы подвергали нагреванию в микроволновой печи при частоте 24,5 МГц и различной мощности излучения. Параллельно термофиксация образцов осуществлялась в условиях конвективного прогрева горячим воздухом.

Опыт использования энергии микроволнового излучения в процессах подготовки, крашения и заключительной отделки текстильных материалов показал эффективность его применения и возможность интенсификации различных технологических этапов отделочного производства. В основе активирующего действия электромагнитного поля на диффузию и сорбцию различных реагентов и красителей и их фиксации волокнообразующим полимером лежит свойство жидкой фазы преобразовывать энергию излучения в тепловую [5]. На начальной стадии обработки высокие диэлектрические свойства воды способствуют быстрому повышению температуры в ограниченном реакционном объеме тонкой пленки раствора солей, что способствует резкому увеличению концентрации раствора и интенсификации реакции гидролиза. К моменту полного удаления физически связанной воды на поверхности полимера образуется гидроксидная фаза, формирование структуры которой осуществлялось в условиях высокой скорости зарождения частиц и малой скорости их роста на стадии образования геля.

Термическая дегидратация гидроксидов переходит в стадию твердофазной химической реакции, когда эволюция микроструктуры происходит в нестационарных условиях активного взаимодействия излучения с веществом. Температура в поверхностном слое может достигать 200°C и более, на этой стадии происходит быстрое разложение гидроксидов, кристаллизация и стабилизация оксидной фазы. Таким образом, существуют необходимые условия для формирования на поверхности волокон ультрадисперсного слоя полупроводниковых оксидов и образования композиционного материала, который в условиях диссипации энергии и самоорганизации приобретает ряд свойств, которые трудно получить, используя традиционные способы формирования структуры.

Еще одной предпосылкой образования низкоразмерной системы является возможность проведения процесса в ограниченном реакционном объеме. Тонкая пленка низкоконцентрированного раствора на поверхности индивидуальных волокон существенно ограничивает массу исходных реагентов и толщину оксидного слоя.

Для того чтобы система перешла в особый режим, при котором образуются пространственно-организованные структуры, необходимо, чтобы внешнее воздействие

достигло некоторого критического значения. Термическая дегидратация гидроксида олова переходит в стадию твердофазной химической реакции, когда эволюция микроструктуры происходит в нестационарных условиях активного взаимодействия излучения с веществом. Таки образом существуют необходимые условия для формирования на поверхности полиэфирных волокон ультрадисперсного слоя полупроводникового оксида олова и образования композиционного материала, который в условиях диссипации энергии и самоорганизации приобретает ряд свойств, которые трудно получить, используя традиционные способы формирования структуры вещества.

Микрофотографии поверхности исходного и модифицированного образцов полиэфирного волокна (рис.1) позволяют оценить морфологию и толщину слоя оксидной пленки, которая соответствует одному микрометру.

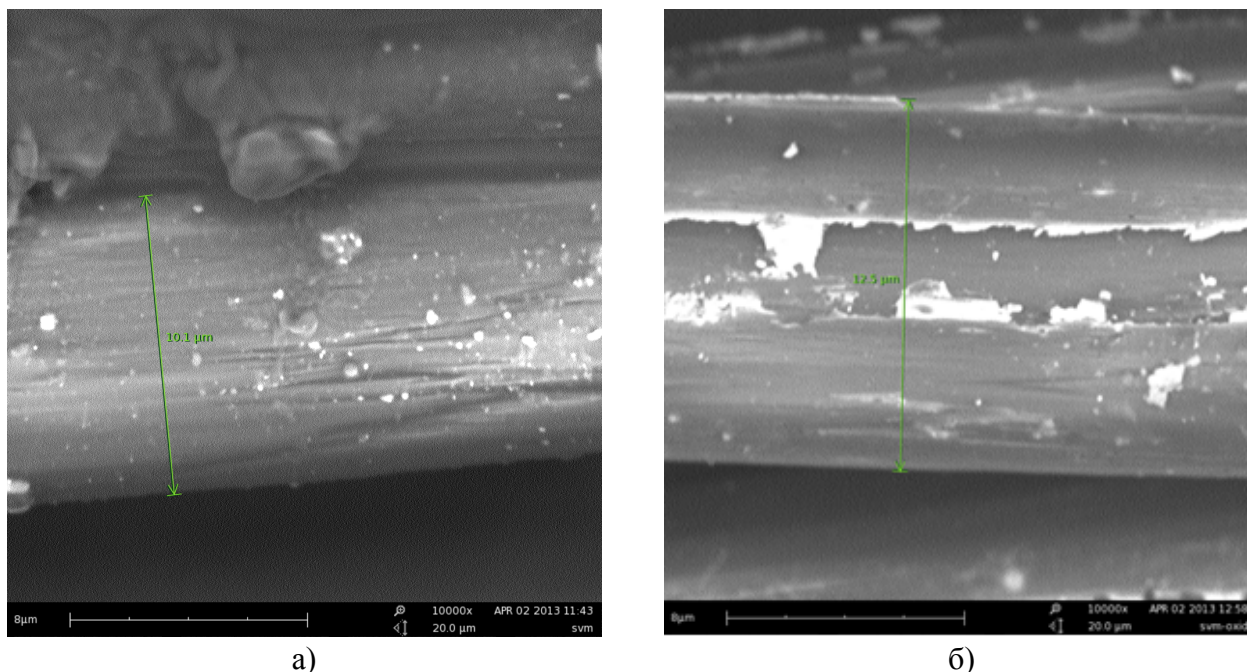


Рис.1. Микрофотографии поверхности исходного (а) и модифицированного (б) полиэфирных волокон.

Результаты измерения поверхностного и объемного электрического сопротивления ткани из полиэфирных волокон обработанных растворами соли олова с легирующими добавками показали, что пленки полупроводниковых оксидов обладают повышенной проводимостью при наличие в их структуре катионов определенной группы металлов, которые одновременно регулируют процесс образования оксидной фазы [6]. Снижение сопротивления в случае использования композиции хлорид олова-хлорид сурьмы-мочевина на семь порядков подтверждает наличие на поверхности волокна проводящего слоя оксида. Мочевине в данном случае отводится роль реагента активирующего процесс гидролиза. Незначительная разница в значениях поверхностного и объемного сопротивлений является фактом, подтверждающим расположение основной массы оксида в поверхностном слое полимера.

Измерение коэффициентов теплопроводности тканей проводили стационарным методом плоского слоя с симметричным расположением образцов относительно нагревателя. Обработку матрицы опытных данных осуществляли с помощью специальной программы в среде MathCAD. Увеличение коэффициента теплопроводности более чем в два раза от 0,08 до 0,2 и линейный характер его зависимости от температуры в результате проведенной обработки свидетельствуют о значительном изменении теплофизических свойств. Установленная зависимость требует специального анализа, но в данном случае обсуждаются не абсолютные значения полученных данных, а их большое отличие для исходной и

обработанной ткани. Данный факт может служить доказательством синтеза на поверхности волокон новой фазы полупроводникового оксида.

Анализ сорбции паров воды модифицированными волокнами показал увеличение их гигроскопичности до 1,5%, что в три раза выше, чем для исходных образцов. Принимая во внимание, что физико-химические свойства полиэфирной подложки в данных условиях изменились незначительно, гидрофилизация поверхности объясняется свойствами слоя неорганического полимера.

Необходимо отметить, что термообработка образцов в условия конвективного прогрева сухим горячим воздухом не эффективна. Следовательно специфика воздействия микроволнового поля отражается прежде всего на формировании поверхностного слоя оксида определенной дисперсности и топологии. Отличие предлагаемого метода от классической золь-гель технологии заключается не только в использовании энергии микроволнового излучения, но и в непрерывности всех стадий формирования конечного продукта. В технике золь-гель синтеза наноструктурированных полупроводниковых пленок для элементов электронных приборов этапы получения геля из раствора, нанесение его на подложку и термическая обработка осуществляются как отдельные операции.

Использование традиционных технологических процессов и уникальных методик модифицирования текстильных волокнистых материалов в сочетании с обширной теоретической и экспериментальной базой в области синтеза электроактивных композиционных материалов одно из перспективных направлений получения технического текстиля и расширения области его применения

Список литературы

1. Баранцев В.М., Ларионов О.С., Павлов Н.Н. Перспективы модифицирования параарамидных волокон комплексными слоями металлов в условиях микроволнового воздействия. // Химические волокна. 2007. № 3. С.18-20.
2. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия, 2000. 252-253 с.
3. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок и хаос. М.: Прогресс. 1986. 431 с.
4. Ванецев А.С., Третьяков Ю.Д. Микроволновой синтез индивидуальных и многокомпонентных оксидов. // Успехи химии. Том 76, № 5, С. 435-453.
5. Мельников Б.Н., Кириллова М.Н., Морыганов А.П. Современное состояние и перспективы развития технологии крашения текстильных материалов. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1983. 232 с.
6. E.Ruckenstein, L.Hong. J. Appl. Polym. Sci., 1995, 55, 1081.

УДК 674.028

**УПРОЧНЯЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
НА ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**
**REINFORCING THE COMBINED EFFECTS OF PHYSICAL FIELDS ON POLYMERIC
MATERIALS**

Виктор Михайлович Попов*, **Алексей Николаевич Внуков****,
Ольга Роальдовна Дорняк*
Victor M. Popov*, **Alexey N. Vnukov****, **Olga R. Dornyak***

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

**Voronezh state forestry engineering University named after G. F. Morozov, Russia, Voronezh
(e-mail: etgvglta@mail.ru)*

*** Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж*
The Military training and scientific center Sky force

*«Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Russia, Voronezh»,
Russia, Voronezh*

Аннотация: Предлагается метод упрочнения полимерных материалов, в основу которого заложен эффект упорядочения структурных составляющих полимеров при воздействии на них постоянным магнитным полем и ультразвуком.

Abstract: We propose a method of hardening a polymer material, which is based on the effect of ordering of the structural components of PR polymers exposed to constant magnetic field and ultrasound.

Ключевые слова: магнитное поле, ультразвук, полимер, напряженность поля, частота ультразвука, микротвёрдость.

Keywords: magnetic field, ultrasound, polymer, field intensity, frequency of ultrasound, microhardness.

Трудно отыскать область современной техники, где бы не находили широкое применение полимерные материалы [1]. Использование полимеров в каждой отдельной области техники требует направленного изменения их физико-механических свойств применительно к условиям эксплуатации. Так, для блочных полимеров, полимерных пленок, покрытий, клеевых прослоек одним из основных показателей их качества является механическая прочность [2]. Для повышения этой характеристики разработан целый набор таких технологических приемов, как компрессионное прессование, литьевое прессование, экструзия, термоформование, штампование, напыление, спекание и др. В последнее время широкое применение находят способы модифицирования полимеров воздействием магнитными или электрическими полями [3,4]. Эти способы наиболее эффективны, поскольку позволяют осуществлять направленные структурные изменения полимерной матрицы при энергетическом воздействии [5].

Есть основания полагать, что дальнейшей интенсификации процессов физического модифицирования полимеров можно достичь путем одновременного наложения нескольких физических полей на расплав полимера. Для реализации такой технологии получения более высокопрочных полимеров предлагается проводить облучение расплава полимера магнитным полем и ультразвуком.

Использовалась установка для намагничивания [6], состоящая из электромагнитного индуктора с регулируемым расстоянием между полюсами электромагнита. Напряженность постоянного магнитного поля варьировалась в пределах от 0 до $24 \cdot 10^4$ А/м.

Для создания ультразвуковых колебаний использовался ультразвуковой генератор с магнитострикционным преобразователем, тремя волноводами-излучателями и преобразователем, позволяющими создавать ультразвуковые колебания на частоте до 22 кГц. Испытуемый полимер в неотвержденном состоянии во фагоропластовой кювете помещался между полюсами электромагнита. Облучение магнитным полем производилось в течении 20 минут и ультразвуком в течении 5 минут.

Исследовались эпоксидная композиция в виде смолы ЭДП с отвердителем из полиэтиленполиамиона (ПЭПА) и эпоксидный клей К-153.

Обработанные последовательно в магнитном поле и ультразвуком расплавы ЭДП+ПЭПА и К-153 затем подвергались отверждению при температуре 50°C в термошкафу в течение суток в формах в виде таблеток диаметром 10 мм и толщиной 3 мм. Полученные образцы затем исследовались на микротвердость на приборе ПМТ-3. В качестве индентора применялась алмазная пирамида с квадратным основанием и углом при вершине между противоположными гранями в 136°. При испытаниях измерялась длина диагонали отпечатка и подсчитывалось число твердости, как частное от деления приложенной нагрузки на поверхность полученного отпечатка. Полученные в результате проведенных испытаний данные представлены в таблице.

Таблица. Зависимость микротвердости образцов из полимеров от напряженности магнитного поля при различной частоте колебаний ультразвука.

Марка полимера	Частота колебаний ультразвука ν , кГц	Микротвердость τ , кг/мм ² при напряженности магнитного поля $H \cdot 10^{-4}$, А/м									
		0	2	6	9	12	14	16	18	20	24
ЭДП+ПЭПА	15	6,2	6,5	6,9	7,2	7,5	7,8	8,3	8,9	9,3	9,8
ЭДП+ПЭПА	22	7,0	7,2	7,3	7,5	7,9	8,3	8,5	9,1	9,6	10,9
К-153	15	6,9	7,2	7,4	7,6	8,1	8,3	8,7	9,5	10,3	11,0
К-153	22	7,1	7,4	7,6	7,9	8,3	8,6	9,0	9,9	11,4	12,1

Анализируя данные опытов, приведенные в таблице, можно сделать следующие выводы. В целом воздействие на расплав исследуемых полимеров магнитным полем и ультразвуком приводит к образованию полимеров в отвержденном состоянии более высокой плотности по сравнению с неподверженными обработке физическими полями полимерами. При этом микротвердость растет с повышением напряженности магнитного поля и частоты колебаний ультразвука. Образование более твердой структуры обработанных в комбинированных физических полях полимеров можно объяснить упорядочением структурных образований из макромолекул и их уплотнением за счет более высоких энергетических воздействий.

Список литературы

1. Николаев А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. М.: Химия, 1964. 784с.
2. Ван Кревлен Д.В. Свойства и химические строения полимеров. М.: Мир, 1976. 416с.
3. Воронежцев Ю.И., Гольдаде В.А., Пинчук Л.С., Снежков В.В. Электрические и магнитные поля в технологии полимерных композитов. Минск: Наука и техника, 1990. 263с.
4. Кестельман В.Н. Физические методы модифицирования полимерных материалов. М.: Химия, 1980. 224с.
5. Молчанов Ю.М., Кисис Э.Р., Родин Ю.П. Структурные изменения полимерных материалов в магнитном поле // Механика полимеров. 1973. №4. С.737-738.
6. Попов В.М., Иванов А.В., Мурзин В.С., Новиков А.П., Шестакова В.В., Латынин А.В. Устройство для намагничивания. Пат. №2328788 МПК H01F 13/00. Оpubл. 10.07.2008. Бюл.№19.

УДК 66.097.8:669.14.018.291

**ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ФОСФАТНЫМИ
ПОКРЫТИЯМИ**
**TECHNOLOGY OF PROTECTION OF METAL STRUCTURES BY THE PHOSPHATE
COATINGS**

Варвара Евгеньевна Румянцева, Виктория Сергеевна Коновалова
Varvara E. Roumyantseva, Victoriya S. Konovalova

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

Аннотация: Рассмотрена технология нанесения защитных фосфатных покрытий на стали различных марок. Приведены закономерности роста защитных пленок. Определены основные показатели коррозии исследуемых образцов без защитных пленок и с покрытиями, сформированными в растворах фосфатирования, содержащих различные модификаторы.

Abstract: The technology of applying protective phosphate coatings on steel of various grades is considered. The regularities of growth of protective films are shown. The basic parameters of corrosion of samples without protective films and with coatings formed in phosphating solutions containing different modifiers are determined.

Ключевые слова: коррозия, защитные пленки, фосфатирование.

Keywords: corrosion, protective films, phosphate coating.

В настоящее время вопросы организации антикоррозионной защиты стоят очень остро. Один из путей решения – нанесение на защищаемые от коррозии поверхности конверсионных слоев, в частности, с использованием процесса холодного фосфатирования стальной арматуры в железобетонных конструкциях [1]. Процесс образования защитного покрытия многостадийен и протекает на границе раздела фаз «металл – жидкая среда» по следующим стадиям: 1) подвод ионов к поверхности раздела фаз; 2) адсорбция ионов поверхностью металла; 3) химическое взаимодействие; 4) отвод (десорбция) побочных продуктов из зоны реакции.

Фосфатирование давно и успешно применяют как метод защиты металлических изделий и конструкций от коррозии. Главное достоинство фосфатной пленки состоит в том, что она обладает высокой коррозионной стойкостью во всех видах горючих, смазочных и органических маслах, в бензоле, толуоле и во всех газах, кроме сероводорода. Однако, в агрессивных средах (кислоты, щелочи), а также в воде (пресной и соленой) фосфатная пленка нестойка. Кроме защиты от коррозии, фосфатирование металла применяется в качестве основы под нанесение лаков, красок, клеев, масел, восков и т.д. Фосфатные покрытия обеспечивают отличную адгезию – они «связывают» органические покрытия с металлической поверхностью.

Современное развитие производства предъявляет высокие требования к надежности и стойкости конструкционных материалов и совершенствованию методов их защиты. Холодное фосфатирование металла входит в категорию лучших методов, применяемых для защиты металлических поверхностей от коррозии и подготовки их под окраску [2].

Фосфатные покрытия защищают арматуру механически (рис. 1). Они изолируют защищаемый металл от окружающей среды. При этом пористость снижает защитные свойства покрытий, и возникает необходимость разрабатывать новые растворы для нанесения покрытий со сниженной пористостью.

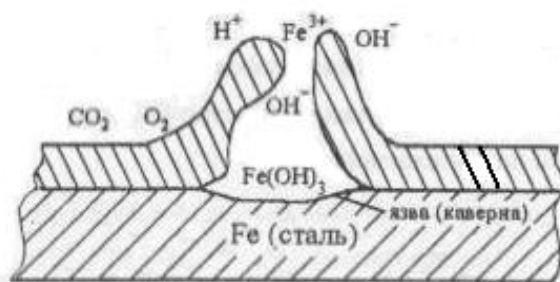
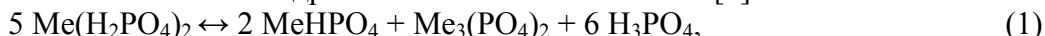


Рис. 1. Схема коррозии арматуры, защищенной фосфатным покрытием.

Фосфатирование черных металлов осуществляется в растворе однозамещенных солей ортофосфорной кислоты и связано с гидролизом этих солей по схеме [3]:



который происходит особенно интенсивно при нагревании.

Предполагается, что образованию фосфатной пленки предшествуют реакции ионизации железа:



и выделения водорода:

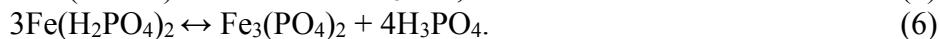


Формирование фосфатной пленки начинается с взаимодействия металла с фосфорной кислотой при погружении в фосфатирующий раствор:



Вследствие этого равновесие реакции (1) нарушается и сдвигается вправо, что приводит к дальнейшему выпадению нерастворимых фосфатов.

Образующиеся однозамещенные фосфаты легко гидролизуются до двух- и трехзамещенных:



Выделяющаяся при реакции свободная фосфорная кислота способствует дальнейшему ходу процесса. Формирующаяся пленка состоит как бы из двух слоев: 1) внутреннего, барьерного, небольшой толщины, гладкого, эластичного, весьма пористого, непосредственно прилегающего к металлу; 2) наружного, имеющего кристаллическое строение, хрупкого, состоящего из вторичных и третичных фосфатов и определяющего основные положительные свойства пленки. По мере роста слоя фосфатной пленки поверхность металла изолируется от воздействия раствора и скорость процесса постепенно уменьшается [4-6]. Фосфатирование заканчивается после того, как вся поверхность покрывается сплошной пленкой и выделение водорода прекратится.

В случае образования пористой пленки лимитирующей стадией процесса образования является химическое взаимодействие металла с ионами раствора. Скорость роста пленки в этом случае будет постоянной, а толщина ее (y) – пропорциональной времени окисления (τ) [7]:

$$dy/d\tau = k, \quad (7)$$

где k – константа скорости химической реакции.

Проинтегрировав полученное уравнение, получим, что толщина пленки прямо пропорциональна времени:

$$y = k\tau + \text{const}. \quad (8)$$

В большинстве случаев значение константы пренебрежимо мало или равно нулю, поэтому увеличение толщины пленки происходит по линейному закону:

$$y = k\tau. \quad (9)$$

При низких температурах скорость образования фосфатных покрытий определяется стадией взаимодействия ионов раствора с металлом. Повышение температуры приводит к увеличению скорости химической реакции и толщины пленки, тогда как скорость диффузии возрастает очень медленно, в результате чего скорость образования пленки начинает

подчиняться законам диффузии. Следовательно, скорость роста пленки обратно пропорциональна ее толщине:

$$dy/d\tau = k/y. \quad (10)$$

Проинтегрировав это уравнение, получим параболическую зависимость:

$$y^2 = 2k\tau + const \text{ или } y^2 = k_1\tau + const. \quad (11)$$

Из уравнения следует, что скорость образования пленки определяется стадией диффузии и уменьшается во времени.

К процессам диффузии через пленку применимы основные законы диффузии [8]:

1. Диффузия пропорциональна градиенту концентрации (первый закон Фика):

$$dS = -Dq \frac{dc}{dx} \cdot dt. \quad (12)$$

2. Изменение концентрации во времени пропорционально коэффициенту диффузии (второй закон Фика):

$$\frac{dc}{dt} = D \cdot \frac{d^2c}{dx^2}. \quad (13)$$

В этих уравнениях: dS – количество протиффундировавшего вещества (в грамм-атомах или молях); D – коэффициент диффузии (количество вещества, диффундирующего за единицу времени через единицу поверхности при градиенте концентрации, равном единице); q – площадь поверхности, через которую идет диффузия; dc/dx – градиент концентрации (падение концентрации на единицу длины пути); dt – единица времени.

3. Коэффициент диффузии увеличивается с повышением температуры:

$$D = KT^n, \quad (14)$$

где: K – коэффициент пропорциональности; T – абсолютная температура, К; n – показатель, зависящий от свойств системы, в которой происходит диффузия.

Чем более высокими защитными свойствами обладает пленка, тем в большей степени она затрудняет проникновение через нее действующего реагента и тем меньше скорость ее роста.

Коррозионная стойкость стальных образцов, как незащищенных, так и обработанных в традиционных и разрабатываемых растворах фосфатирования, представлена на диаграммах (рис. 2, 3). Выбор марок железоуглеродистых сплавов обусловлен тем, что соответственно повышению содержания углерода увеличивается количество цементита, а металлографическая структура меняется от ферритной к ферритно-цементитной [9].

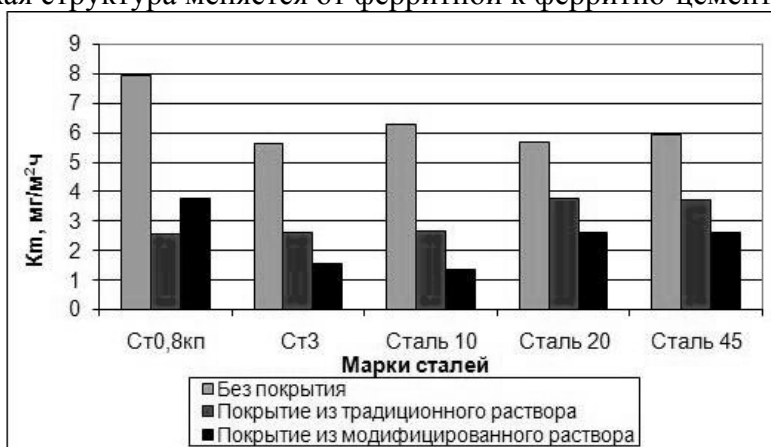


Рис. 2. Сравнение отрицательного показателя изменения массы образцов

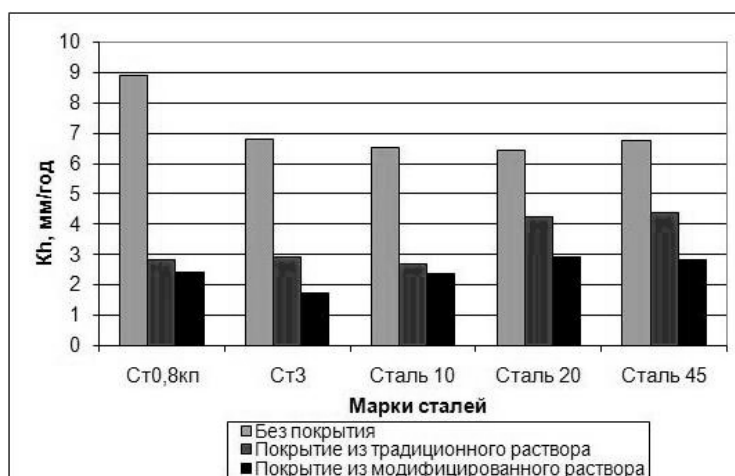


Рис. 3. Сравнение глубинного показателя коррозии образцов

В целом, как видно из диаграмм, коррозионная стойкость образцов различных марок сталей, защищенных фосфатными пленками, значительно выше, чем без покрытий. Наблюдаемые различия в показателях коррозии не слишком велики, однако, всё же для фосфатных пленок, сформированных из модифицированных растворов, результаты выше. Основываясь на приведенных результатах, можно рекомендовать в качестве покрытий, отвечающих требованиям к повышенной коррозионной стойкости, фосфатные пленки, полученные из растворов, содержащих в качестве модификаторов сахарин и глюкозу.

Список литературы

1. Федосов, С.В. Защита от коррозии арматурной стали методом холодного фосфатирования / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева // Вестник МГСУ. 2009. № 4. С. 188-191.
2. Румянцева, В.Е. Влияние модификаторов холодного фосфатирования на коррозионную стойкость сталей / В.Е. Румянцева, К.Е. Румянцева, В.С. Коновалова // Строительство и реконструкция. 2013. №3(47). С. 64-68.
3. Лапатухин, В.С. Фосфатирование металлов. Исследование процессов ускоренного и холодного фосфатирования / В.С. Лапатухин. М.: МАШГИЗ, 1958. 264 с.
4. Коротин, А.И. Технология нанесения гальванических покрытий / А.И. Коротин. М.: Высш. шк., 1984. 200 с., ил.
5. Грилихес, С.Я. Оксидные и фосфатные покрытия металлов / С.Я. Грилихес. Под ред. П.М. Вячеславова. 5-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1985. 96 с.
6. Хаин, И.И. Теория и практика фосфатирования металлов / И.И. Хаин. Л.: Химия, 1973. 312 с.
7. Малахов, А.И. Коррозия и основы гальваностегии. 2-е изд., перераб. и доп. / А.И. Малахов, К.М. Тюнина, Т.Е. Цупак. М.: Химия, 1987. 208 с.
8. Бахвалов, Г.Т. Коррозия и защита металлов / Г.Т. Бахвалов, А.В. Турковская. М.: Металлургиздат, 1947. 400 с.
9. Салтыков, С.Н. Влияние цементитной фазы железоуглеродистых сплавов на их электрохимическое поведение в щавелевой кислоте / С.Н. Салтыков, М.С. Путилина // Защита металлов. 2006. Т. 42. №4. С. 406-411.

УДК 621.1

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БЛОЧНЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ПОСТОЯННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
METHOD FOR INCREASING THERMAL CONDUCTIVITY OF BLOCK EPOXY POLYMERS BASED ON TREATMENT CONSTANT MAGNETIC FIELD**

**Виктор Михайлович Попов, Елена Николаевна Лушникова,
Ирина Юрьевна Кондратенко***
Viktor M. Popov, Elena N. Lushnikova, Irina Yu. Kondratenko

*Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова,
Россия, Воронеж
Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Russia, Voronezh
(e-mail: etgvglta@mail.ru)*

Аннотация: Рассматривается метод повышения коэффициента теплопроводности эпоксидных полимеров с металлическим дисперсным наполнителем, подвергнутых обработке в постоянном магнитном поле. Установлено повышение теплопроводности наполненных полимерных пленок с увеличением напряженности поля, что объясняется образованием цепочечных структур из контактирующих частиц наполнителя.

Abstract: A method of enhancing the thermal conductivity of epoxy polymers with metal dispersed filler, treated in a constant magnetic field is considered. Increase of thermal conductivity of polymer filled films with increasing field strength is defined, which is explained by the formation of chain-like structures from contacting filler particles.

Ключевые слова: полимерная композиция, магнитное поле, напряженность, коэффициент теплопроводности, концентрация наполнителя.

Keywords: polymer composition, magnetic field, intensity, coefficient of thermal conductivity, filler concentration.

В качестве конструкционных материалов в настоящее время наиболее широко применяются полимерные материалы. В зависимости от условий эксплуатаций деталей и узлов из полимеров к последним предъявляются во многих случаях жесткие требования по прочности, электропроводности и, в частности, теплопроводности. В последнем случае это особенно актуально для технических систем, функционирующих в режиме повышенных тепловых нагрузок, когда возникает необходимость транспортировать тепловые потоки высокой плотности через стенки из полимеров, как правило, обладающих малой теплопроводностью.

Применяемый в настоящее время способ повышения теплопроводности полимеров путем наполнения их металлическими порошками ни всегда дает ожидаемый результат [1, 2]. Во-первых, даже при высоком наполнении коэффициент теплопроводности полимера не превышает 0,8-1,0 Вт/м·К и, во-вторых, при этом заметно снижаются прочностные показатели полимера.

В основу предлагаемого способа создания полимеров с повышенной теплопроводностью положен эффект формирования в полимере цепочек из частиц дисперсного наполнителя ферромагнитной природы под воздействием постоянного магнитного поля [3].

Для исследования влияния постоянного магнитного поля на процесс формирования цепочечных структур из частиц наполнителя в полимере применялась установка для намагничивания [4], основным элементом которой является электромагнитный индуктор с подвижными башмаками, позволяющими регулировать напряженность магнитного поля.

Исследуемая полимерная композиция в составе эпоксидной смолы ЭДП и отвердителя – полиэтиленполиами́на (ПЭПА) с наполнителем помещалась во фторопластовую кювету. В качестве наполнителя использовались порошки ПНК и ПЖВ.

Для наполнителя в виде железного порошка ПЖВ приведенный диаметр частиц \bar{d} подбираем в пределах от 24 до 32 мкм, а для порошка ПНК от 21 до 27 мкм. Толщина отливаемого образца выдерживалась в пределах 1,5 – 2 мм. Кювета помещалась в рабочую ячейку с нагревателем между полосами электромагнита и при заданной напряженности поля при температуре 60°C подвергалась воздействию магнитного поля в течение 20 мин. После выдержки при комнатной температуре в течение двух часов, образец выпрессовывался, чему способствовала предварительная обработка поверхности кюветы поверхностноактивной эмульсией.

Полученные образцы затем исследовались на теплопроводность на установке, работающей в режиме метода двух температурно-временных интервалов [5].

Полученные в процессе экспериментов результаты, зафиксированы в таблице.

Таблица. Зависимость коэффициента теплопроводности магнитообработанных полимерных пленок с металлическими порошками от напряженности магнитного поля

Концентрация наполнителя С, мас. %	Коэффициент теплопроводности пленок λ , Вт/м·К в зависимости от напряженности магнитного поля $H \cdot 10^{-4}$, А/м при разной концентрации наполнителя										
	0	2	4,5	8	10	12	16	18	20	22	24
Железный порошок ПЖВ											
10	0,23	0,26	0,31	0,39	0,42	0,45	0,51	0,53	0,54	0,55	0,56
20	0,30	0,34	0,4	0,46	0,48	0,53	0,55	0,58	0,61	0,62	0,62
30	0,41	0,44	0,47	0,53	0,56	0,59	0,62	0,64	0,64	0,65	0,65
35	0,43	0,50	0,52	0,56	0,58	0,62	0,65	0,67	0,69	0,70	0,70
Никелевый порошок ПНК											
10	0,51	0,57	0,64	0,72	0,76	0,78	0,79	0,81	0,82	0,82	0,82
20	0,60	0,70	0,72	0,75	0,80	0,83	0,85	0,85	0,85	0,86	0,86
30	0,70	0,73	0,75	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,90	0,90	0,91
40	0,75	0,80	0,83	0,85	0,87	0,91	0,93	0,93	0,95	0,95	0,96

Анализируя приведенные в таблице результаты экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы. Коэффициент теплопроводности магнитообработанных пленок выше, чем не подвергнутых воздействию постоянным магнитным полем, что можно объяснить образованием цепочечных структур из частиц наполнителя. Повышение напряженности магнитного поля сопровождается ростом теплопроводности пленки. Подобный эффект повышения теплопроводности можно объяснить, во-первых, большим числом частиц, участвующих в структурных образованиях и, во-вторых, более плотной упаковкой частиц за счет более высокого энергетического воздействия магнитного поля.

Из сравнения данных по теплопроводности для различных по природе наполнителей можно констатировать, что применение более теплопроводного никелевого наполнителя, чем железного порошка приводит к образованию более теплопроводящих полимерных пленок.

В заключение следует сделать однозначный вывод о хорошей перспективе практического применения предлагаемого способа модифицирования полимерных пленок на предмет повышения их теплопроводности.

Список литературы

1. *Липатов Ю.С.* Влияние наполнителей на физико-механические и термодинамические свойства полимерных покрытий на основе эпоксидных смол // Лакокрасочные материалы и их применение. 1988. № 3. С. 36-37.

2. Айбиндер С.Б., Андреева Н.Т. Влияние наполнителей на теплофизические, механические и антифрикционные свойства полимеров // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук. 1983. № 5. С. 3-18.

3. Попов В.М., Новиков А.П. Теплопроводность магнитообработанных тонкослойных полимерных материалов // Инженерно-физический журнал. 2008. Т. 81. № 3. С.583-586.

4. Попов В.М., Иванов А.В., Новиков А.П., Шестакова В.В., Латынин А.В. Устройство для намагничивания. Патент на изобретение № 2328788. Кл. МПК-Н01F 13/00.10.07.2008.

5. Волькенштейн В.С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов. Л.: Энергия, 1971. 216 с.

УДК 665.347: 665.327

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ АНТИОКСИДАНТОВ SOME ASPECTS OF PRODUCTION TECHNOLOGIES PLANT ANTIOXIDANTS

Светлана Ивановна Бухкало, Олеся Валерьевна Белоус, Игорь Николаевич Демидов
Svetlana I. Buhkhalo, Olesya V. Bilous, Igor N. Demidov

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

Аннотация: Рассмотрены некоторые возможности технологии производства растительных антиоксидантов и стабилизации растительного масла: выбор и разработка методов исследования и определения оптимальных технологических параметров на всех этапах проведения эксперимента; исследование синергизма между токоферолами растительного масла разного жирнокислотного состава и ингибиторами окисления разработанного экстракта из листьев ореха грецкого и цветков календулы; разработка технологии стабилизации растительных масел комплексным антиоксидантом.

Annotation: Some possibilities of vegetable antioxidants production technology and stabilizing vegetable oils: selection and development of research methods and determine the optimum process parameters on all stages of the experiment; research synergies between tocopherols vegetable oils of different fatty acid composition and oxidation inhibitors of developed extract of walnut leaves and calendula flowers; development of vegetable oils complex antioxidant stabilization technology.

Ключевые слова: комплексные растительные антиоксиданты, технологии производства, синергизм, технология стабилизации растительных масел.

Keywords: complex vegetable antioxidants, technology, synergy, vegetable oils stabilization technology.

В настоящее время актуальной задачей для предприятий различных отраслей пищевой промышленности, использующих жиры, и, в частности растительные масла, является разработка технологии получения комплексного растительного антиоксиданта, обеспечивающего защиту растительного масла от окислительной порчи и содержащего полезные ингредиенты для здоровья человека. Наиболее эффективными компонентами для стабилизации растительных масел от окислительной порчи, с нашей точки зрения, являются составляющие на основе лекарственно-технического сырья. Такое сырье выбирают вследствие особенностей его биохимического состава и мягкого воздействия на организм человека по иным механизмам, чем сырье синтетического происхождения.

Основными этапами создания технологии стабилизации растительного масла являются [1–3]: выбор и разработка методов исследования и определения оптимальных технологических параметров на всех этапах проведения эксперимента; исследование синергизма между токоферолами растительного масла разного жирнокислотного состава и ингибиторами окисления разработанного экстракта из листьев ореха грецкого и цветков календулы; разработка способов введения антиоксиданта в виде водно-спиртового экстракта; разработка технологии стабилизации растительных масел комплексным антиоксидантом.

Нами исследована эффективность и условия процесса введения водно-спиртовых экстрактов листьев ореха грецкого и цветков календулы (в соотношении 1:1) в растительное масло по разработанному методу получения тонкодисперсной эмульсии. Определены периоды индукции окисления подсолнечного масла в присутствии разработанного комплексного антиоксиданта и без него (рис.1).

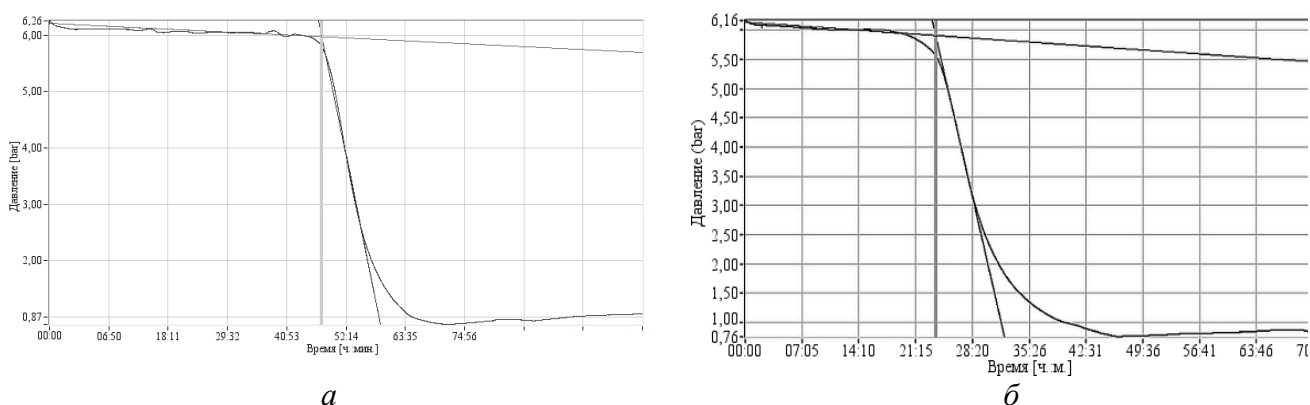


Рис. 1. Окисление подсолнечного масла в присутствии разработанного антиоксиданта (а) и без него (б)

Нами проведен ряд работ [1 – 3] по поиску рациональных технологических решений в производстве комплексного растительного антиоксиданта, с учетом потребностей производства в сокращении себестоимости конечного продукта (рис. 2). В реактор Р1 подается растительное сырьё, в качестве которого используются листья ореха грецкого и цветы календулы. Растительное сырьё предварительно сортируют, высушивают и измельчают. Далее, растительное сырьё, находящееся в реакторе, заливается растворителем. В качестве растворителя используется этиловый спирт концентрацией 70 %, который поступает из бака Б1. В реакторе Р1 происходит перемешивание и экстрагирование ингибиторов окисления из листьев ореха грецкого и цветов календулы. Реактор снабжен рубашкой для достижения необходимой температуры процесса.

После экстракции полученный экстракт проходит через два фильтра для отделения от отработанного сырья: первый фильтр расположен на днище реактора Р1, второй фильтр Ф2 – обеспечивает доочистку от мелких частей растительного сырья после экстракции. Отфильтрованный экстракт подается в смеситель ЗМ1. В смеситель ЗМ1 также подается смесь растительного масла и моноацилглицеролов (МАГ), предварительно полученная в смесителе ЗМ2. На этой стадии образуется эмульсия, которая циркулирует с помощью насоса Н2 через гомогенизирующее устройство ГП, чем обеспечивается получение тонкодисперсной эмульсии. Тонкодисперсная эмульсия, состоящая из растительного масла, МАГ и водно-спиртового растительного экстракта подается в вакуум-реактор Р2 для перемешивания и нагрева. В результате спирт и вода удаляются, а вещества из экстрактов листьев ореха грецкого и цветов календулы, которые являются ингибиторами окисления, остаются в масле во взвешенном состоянии.

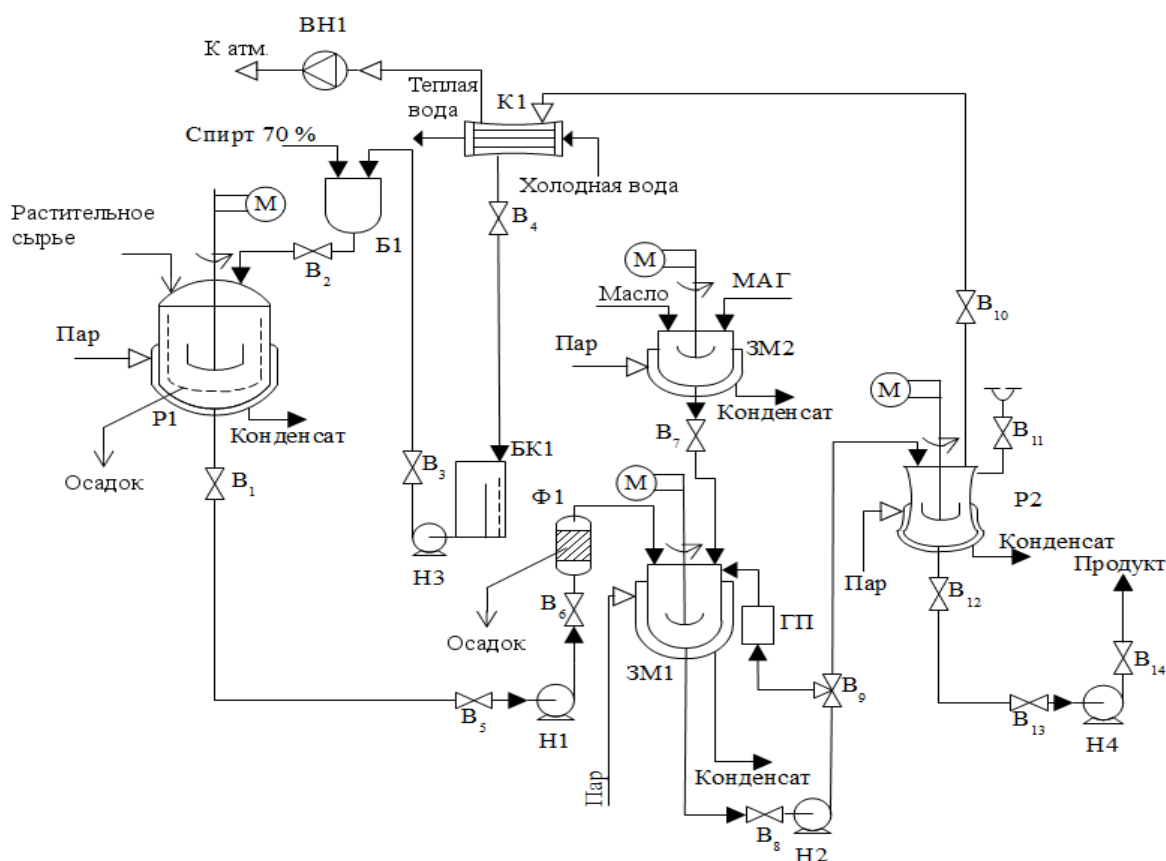


Рис.2. Схема технологическая принципиальная для получения комплексного антиоксиданта и введения его в масло: Н1–Н4 – центробежные насосы; ВН1 – вакуум-насос; P1, P2 – реакторы; K1 – конденсатор; Ф1 – фильтр; ГП – гомогенизирующее устройство; БК1 – барометрическая коробка; ЗМ1, ЗМ2 – смесители; Б1 – бак; V1– V14 – вентили.

Масло, насыщенное ингибиторами окисления, из экстрактов листьев ореха грецкого и цветов календулы, является конечным продуктом. Такое масло (например, подсолнечное) становится стабильнее к окислительной порче более чем в два раза.

Водный раствор этилового спирта, который извлекается из смеси в реакторе P2, через конденсатор K1 та барометрическую коробку БК1 подается в бак Б1, откуда подается в реактор P1, чтобы снова быть использованным в качестве растворителя, что дает возможность снизить цену конечного продукта. Также в схеме предусмотрена дополнительная подача спирта в бак Б1, для сохранения его концентрации на уровне 70 %.

Предложенное аппаратное оформление позволяет получить масло, являющееся более стабильным к окислительным процессам, способное конкурировать по ценообразованию с синтетическими антиоксидантами.

В заключение статьи следует отметить эффективность и практическую значимость разработанного способа введения в масло комплексного растительного антиоксиданта, в виде водно-спиртового экстракта, доказано проверкой по определению периодов индукции. При окислении подсолнечного масла без добавления экстракта период индукции составляет 23 минуты, а с ингибитором из экстракта листьев ореха грецкого и календулы – 58 минут. Это свидетельствует о том, что комплексный антиоксидант сохраняет свои свойства при введении в масло предложенным способом.

Список литературы

1. Товажнянский Л.Л., Бухкало С.И., Денисова А.Є., Демидов І.М., Капустенко П.О., Арсеньєва О.П., Білоус О.В., Ольховська О.І. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи). Київ «Центр учбової літератури»: 2016, с. 283–350.

2. Білоус О.В. Технологія стабілізації рослинних олій комплексним антиоксидантом: дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук: 02.07.15 / Білоус Олеся Валеріївна. – Харків, 2015. – 206 с.

3. Білоус О.В. Розробка комплексного антиоксиданту із екстрактів листя горіху волоського та календули / О.В. Білоус, І.М. Демидов, С.І. Бухкало // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2015. – № 1/6(73). – С. 22–26.

УДК 66.022.389

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ АППРЕТИРОВАНИЯ СУКОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ КНИТЕКС THE CHOICE OF RATIONAL CONDITIONS OF DRESSING OF CLOTH WITH USE OF KNITEKS EPOXY

Григорий Игоревич Хазанов, Маргарита Алексеевна Апарушкина
Grigory I. Hazanov, Margarita A. Aparushkina

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow
(e-mail: hasanov_gr_1957@rambler.ru, paxt@yandex.ru)*

Аннотация: Рассмотрены вопросы усовершенствования технологии аппретирования сукон с применением эпоксидной смолы Книтекс. Изучены кинетические кривые выбора смолы при различных концентрациях. Для выбора рационального режима аппретирования использовалось ротатбельное центральное композиционное планирование, получено уравнение регрессии для расчета водопоглощения.

Abstract: Questions of improvement of technology of dressing of cloth with use of epoxy of Kniteks are considered. Kinetic curve of choice of pitch at various concentration are studied. For the choice of the rational mode of dressing rotatable central composite planning was used, the regression equation for water absorption calculation is received.

Ключевые слова: аппретирование, прессы сукна, ротатбельное центральное композиционное планирование, эпоксидная смола.

Keywords: dressing, pressing felts, rotatable central composite planning, epoxy resin.

Представленная работа является продолжением исследований, направленных на усовершенствование технологии аппретирования сукон для прессы части бумагоделательных машин. Эксперимент проводился на образцах сукна марки ИКП-13, изготавливаемых согласно ТУ 8353-001-00322318-99 на ОАО «Ковротекс». Для аппретирования применялась эпоксидная смола Книтекс («Циба-Гейги»), состоящая из двух компонентов – Книтекс EPS и Книтекс EPX.

Фирма – изготовитель смолы предлагает проводить отделку полимерным раствором при pH 7 и концентрациях каждой составляющей 15-25 г/л, взятых в соотношении 1:1, с последующей сушкой и термообработкой при температуре 90-120⁰С.

Отечественные технические сукна отличаются от импортных по волокнистому составу, структуре и способу нанесения аппрета, могут поступать на отделку в сухом и влажном состоянии, что существенно влияет на концентрацию применяемых веществ. В целях рационального использования смолы Книтекс при проведении исследований интервал варьирования содержания в растворе каждой составляющей расширялся и находился в пределах 5-25 г/л. При этом учитывалось, что эффективность обработки зависит, главным

образом, от количества нанесенного полимера, температуры, рН пропитывающего раствора и условий термообработки.

Повышение температуры выше 25⁰С приводит к его коагуляции.

В лабораторных условиях аппретирование осуществлялось путем погружения сухого сукна в раствор полимера в течение 0,5-10 минут, при рН 7 и температуре 20⁰С, с последующим отжимом до 100%-ной остаточной влажности, сушкой совмещенной с термообработкой при 120⁰С (40 минут).

Количество нанесенного полимера зависит от длительности погружения изделия в раствор. Поэтому изучались кинетические параметры процесса адсорбции эпоксидной смолы из водных растворов с различным содержанием входящих в нее компонентов.

Были изучены кинетические кривые выбирания (рис.1) смолы Книтекс при концентрациях каждой из составляющих 5, 10, 20 и 25 г/л, для которых привес по массовой доли составил 0,93-6,4%. При этом основная масса препарата (более 65%) выбирается за первые 2 минуты.

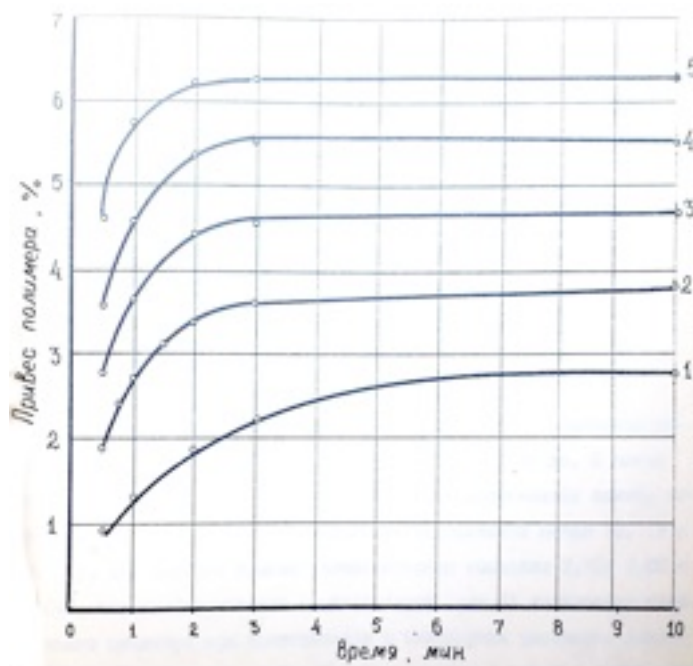


Рис. 1. Выбираемость смолы Книтекс сукном при концентрациях ее водных растворов: 1 – 5 г/л; 2 – 10 г/л; 3 – 15 г/л; 4 – 20 г/л; 5 – 25 г/л

Образцы с известным содержанием полимера использовались для определения удлинения при разрыве, прочности на разрыв и воздухопроницаемости, которые в соответствии с Техническими условиями на сукна марки ИКП-13 соответственно должны быть: в продольном направлении (по утку) не более 29%, не менее 280 даН и 380 дм³/м²с.

По мере увеличения количества нанесенного полимера (рис. 2,а) полимера удлинение при разрыве несколько убывает, вследствие образования склеек между волокнами в структуре сукна, которые затрудняют их перемещение относительно друг друга. Одновременно наблюдается (рис. 2,б) незначительное повышение разрывной нагрузки с 315 даН у необработанного текстильного материала до 316-318 даН после аппретирования. Полученные значения превосходят ограничительное условие (280 даН) для данного показателя, который, следовательно, не оказывает влияние на проводимые исследования. Возрастание привеса полимера приводит к некоторому уменьшению воздухопроницаемости в результате забивания пор изделия смолой (рис.3).

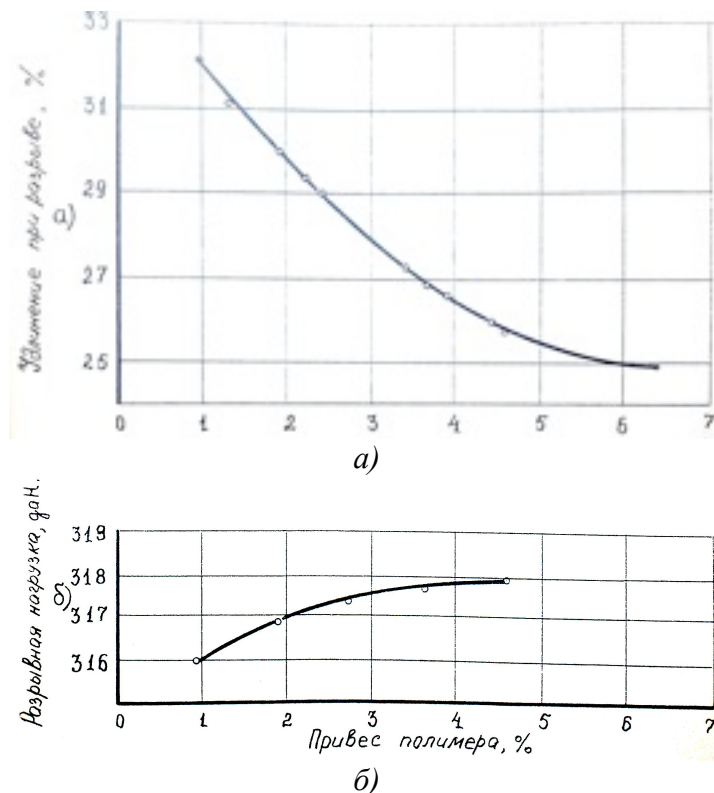


Рис. 2. Влияние привеса смолы Книтекс на разрывные характеристики сукон:
 а – удлинение при разрыве; б – разрывную нагрузку

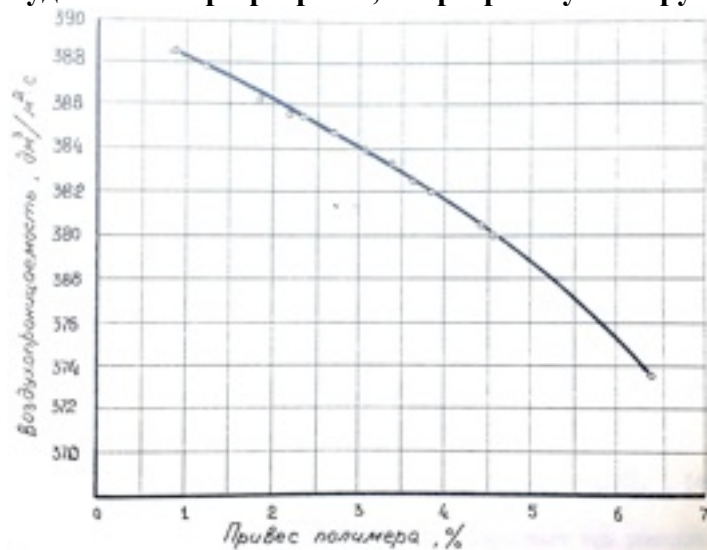


Рис. 3. Влияние привеса смолы Книтекс на воздухопроницаемость технического сукна

С учетом представленных ограничительных условий (ТУ 8353-001-00322318-99) необходимые эксплуатационные свойства (рис.2,а, 3) достигаются при содержании полимера на материале в количестве 2,42-4,61%.

На производстве в отличие от лабораторных исследований нанесение аппрета осуществлялось валиком в 2 прохода. С целью получения сопоставимых результатов в производственных опытах использовались концентрации каждого из компонентов смолы 10, 15 и 20 г/л, для которых привес соответственно составил 2,78; 3,65 и 4,64%, что приблизительно соответствует (рис.1) количеству нанесенного полимера при пропитывании в полимерных растворах аналогичных концентраций в течение одной минуты. За этот промежуток времени необходимый привес полимера (в лабораторных условиях) достигался в интервале концентраций составляющих полимера 10-20 г/л, которые служили факторами (табл. 1) при проведении оптимизации процесса. В качестве выходной переменной

максимизировалось водопоглощение сукна (Y_1). При выборе рационального режима аппретирования использовалось ротатбельное центральное композиционное планирование эксперимента, на основе которого проводилось определение регрессионной многофакторной модели с последующей оптимизацией процесса методами канонического преобразования уравнения регрессии и сканирования переменных.

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования концентраций составляющих смолы Книтекс в полимерных растворах

Факторы X_1, X_2	Уровни варьирования					Интервал варьирования
	-1,414	-1	0	1	1,414	
K_1	8	10	15	20	22	5
K_2	50	57,3	75	92,7	100	17,7

K_1 (г/л), X_1 – концентрация компонента смолы Книтекс EPX в натуральном и безразмерном масштабе;

K_2 (% от EPX), X_2 – концентрация компонента смолы EPS в натуральном и безразмерном масштабе.

Таблица 2. Экспериментальные данные при оптимизации условий аппретирования сукон смолой Книтекс

X_1	X_2	Водопоглощение, %
+	+	181,5
-	+	186,7
+	-	192,7
-	-	198
-1,414	0	200,1
1,414	0	182,8
0	-1,414	172,9
0	1,414	174,5
0	0	183,6
0	0	186
0	0	175,9
0	0	178,4
0	0	183,8

Обработкой экспериментальных данных (табл. 2) получено уравнение регрессии для расчета водопоглощения:

$$Y_1 = 181,1 - 4,4X_1 - 2,5X_2 - 0,2X_1X_2 + 6,6(X_1)^2 - 2,3(X_2)^2$$

На основании полученного уравнения выбирались рациональные условия аппретирования: концентрация Книтекс EPX – 10 г/л, Книтекс EPS – 10 г/л. Указанная полимерная композиция использовалась для выпуска опытной партии пресовых сукон, которая прошла успешные испытания на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности.

УДК 664.29:661.71

**АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ МАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСАДОК ПРИ
РЕГЕНЕРАЦИИ ЭТИЛОВОГО СПИРТА
ANALYSIS OF SOME CHARACTERISTICS FOR MESH HEADS**

**Светлана Ивановна Бухкало, Николай Николаевич Зипунников,
Оксана Игоревна Ольховская
Svetlana I. Buhkhalo, Nikolay N. Zipunnikov, Oksana I. Olkhovskaya**

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

Аннотация: Рассмотрены основные возможности повышения эффективности процессов регенерации этанола за счет интенсификации процессов массообмена. Стратегия выбора технологии регенерации этанола должна основываться на требованиях рынка и охраны окружающей среды.

Abstract: The approaches of efficiency increasing, process for the regeneration of ethanol and correct in mass transfer processes were discussed. The strategy of selection of technology for the regeneration of ethanol should be based on market demands.

Ключевые слова: повышения эффективности, технология получения пектина, регенерация этанола, массообменные процессы.

Keywords: efficiency enhancement, pectin technology, regeneration of ethanol, mass transfer processes.

В производстве пектина на этапе его осаждения используется большое количество этанола до 100 т этанола/1 т товарного пектина. После осаждения отфильтрованный и нейтрализованный водный раствор этанола концентрацией 50–60 % подвергается регенерации перегонкой в ректификационных колоннах. Большое значение уделяется снижению стоимости процесса перегонки путем поиска его оптимальных параметров как технологических [1, 2], так и управленческих. Основными шагами по повышению экономических показателей процесса с учетом концепции управления производством «шесть сигм» могут быть: улучшение процессов; улучшение продукции; улучшение отношений с инвесторами (собственниками компании); увеличение эффективности методологии проектирования; улучшение работы с поставщиками; улучшение обучения и набора персонала. Суть в том, что традиционные методики управления качеством ориентированы на обеспечение качества для улучшения продукта, а не для удовлетворения требований потребителя. Метод «шесть сигм» сформирован с помощью прямой корреляции между числом дефектов продукции, увеличением производственных расходов и уровнем удовлетворенности потребителей. Суть концепции сводится к необходимости улучшения качества выходов каждого из процессов, минимизации дефектов и статистических отклонений в операционной деятельности. Концепция использует методы управления качеством, в том числе, статистические методы, требует использования измеримых целей и результатов, а также предполагает создание специальных рабочих групп на предприятии, осуществляющих проекты по устранению проблем и совершенствованию процессов. Так, например, с технологической точки зрения при постоянном числе теоретических тарелок, содержании этанола в питательной жидкости, питающей колонну, увеличение концентрации дистиллята может быть достигнуто только за счет увеличения флегмового числа, которое в свою очередь прямо пропорционально расходу пара в колонне. В то же время увеличение концентрации дистиллята приводит к уменьшению количества регенерируемого раствора и снижению

расхода пара. Такое влияние концентрации дистиллята на расход пара означает, что есть определенное значение этой концентрации, при котором затраты пара будут минимальными.

Так как изменение затрат на процесс регенерации этанола зависит от изменений расхода пара, то минимальной стоимости процесса соответствует некоторое оптимальное значение концентрации дистиллята. Фактические расходы пара на 15–20% больше расчетных за счет тепловых потерь, подача недогретой до температуры кипения питательной жидкости, повышенной температуры в кубе колонны. Подавляющее число теоретических тарелок в концентрационной части колонны – 10, что соответствует 22 действительным тарелкам при КПД тарелок 0,45. Увеличение числа тарелок приводит к незначительному снижению затрат, если концентрация дистиллята близка к оптимальной.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи: теоретическое обоснование интенсификации процесса; экспериментальное исследование гидродинамики и массообмена в колонне с регулярной насадкой из гофрированных сетчатых и листовых материалов; разработка предложений по применению и совершенствованию конструкции. Для выполнения поставленных целей необходимо провести: исследование и определение гидравлического сопротивления одного метра сухой и орошаемой насадки при различных скоростях газа; исследование процесса массообмена при различных нагрузках по газовой и жидкостной фазе; проведение сравнительной оценки насадки из гофрированной сетки с насадками из других гофрированных материалов; определение целенаправленности производства и областей применения насадок из гофрированных листов.

Объектами исследований являлись: образцы пектиносодержащих выжимок – яблочные выжимки, свекловичный жом и цитрусовые отжимы, образцы свекловичного, яблочного и цитрусового пектинов. При разработке конструкций новых аппаратов основным методом являлось стендовое моделирование на основе экспериментальных данных. Опытно-промышленные испытания проведены на экспериментальном и опытном оборудовании УкрНИИХиммаша (Харьков). Теоретической и методологической основой исследования стали работы современных отечественных и зарубежных ученых в области технологии пектинов.

В соответствии с целями эксперимента определены следующие гидродинамические и массообменные характеристики в колонне с регулярной насадкой из гофрированных сетчатых и листовых материалов в процессе регенерации этилового спирта при производстве пектина из сырых яблочных выжимок:

- 1) гидравлическое сопротивление одного метра сухой и орошаемой насадок для различных скоростей газа;
- 2) исследованы процессы массообмена при различных нагрузках по газовой и жидкостной фазам;
- 3) проведена сравнительная оценка насадки из гофрированной сетки с насадками из других гофрированных материалов;
- 4) определены возможности направленного изготовления и областей применения насадок из гофрированных листов.

Для проведения эксперимента было изготовлено несколько видов блоков насадки из гофрированных материалов: гладкий лист; гладкий лист с прорезями; перфорированный лист; перфорированный лист с крупным гофром; из тканой сетки ламельной; из тканой сетки рулонной. Результаты проведенного эксперимента по определению F-фактора ($\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м})$)/число теоретических тарелок на 1 м насадки разных типов: 1 – ламельная из сетки; 2 – рулонная из сетки; 3 – из листа без прорезей; 4 – из листа с прорезями; 5 – из перфорированного листа; 6 – из перфорированного листа с большим гофром - представлены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость F-фактора/число теоретических тарелок для 1 м различных насадок

Показатели для 1 м разных типов насадки в зависимости от нагрузки по пару												
1	0,25/6,45	0,5/6,41	0,65/ 6,32	0,75/ 6,3	1/6,2 7	1,25/ 6,24	1,5/6,21	1,75/ 6,18	2/6,14	2,25/ 6,12	2,35/ 6,09	2,5/ 6,06
2	0,25/3,5	0,5/3,31	0,65/ 3,12	0,75/ 3,06	1/3	1,25/ 2,93	1,5/2,78	1,75/ 2,75	2/2,56	2,25/ 2,5	2,35/ 2,38	–
3	0,25/1,87	0,5/1,81	0,65/ 1,78	0,75/ 1,75	1/1,7 2	1,25/ 1,75	1,5/1,76	1,75/ 1,81	2/1,87	2,25/ 1,93	2,35/ 1,94	2,5/ 1,94
4	0,12/2,5	0,25/2,48	0,5/ 2,46	0,75/ 2,43	1/2,4	1,25/ 2,37	1,5/2,36	1,75/ 2,31	2/2,18	2,25/ 2,17	2,5/ 2,17	–
5	0,25/2,43	0,5/2,37	0,75/ 2,31	1/2,25	1,25/ 2,23	1,5/ 2,29	1,75/2,3 1	2/2,4	2,25/ 2,5	2,35/ 2,65	2,5/2,7	–
6	0,125/ 1,375	0,25/ 1,375	0,5/ 1,375	1/ 1,385	1,25/ 1,39	1,5/ 1,375	1,75/ 1,375	2/ 1,375	2,5/1,375			

Экспериментально разработаны оптимальные технологические параметры отбора пектиновых веществ: соотношение яблочных отжимок и экстрагента, температура процесса, pH среды и продолжительность процесса гидролиза. Во время исследований установлена зависимость (F-фактор), которая характеризует пределы измерения нагрузок по пару и изменяется от 0,5 до 3,5.

Таблица 2. Зависимость перепада давления от нагрузки по газу для разных типов насадок

Показатели F-фактор/ ΔP /ТТ для одной теоретической тарелки										
1	0,5/4	0,75/4	1/8	1,25/12	1,5/18	1,75/24	2/30	2,25/40	2,5/50	2,75/60
2	0,5/10	0,75/12	1/17	1,25/26	1,5/38	1,75/58	2/78	2,25/100	2,5/124	–
3	0,2/12	0,5/14	1/32	1,25/46	1,5/58	1,75/82	2/100	2,25/117	2,5/130	–
4	0,5/2	0,75/8	1/14	1,25/22	1,5/32	2/72	2,25/97	2,5/136	–	–
5	0,5/10	0,75/20	1/28	1,25/36	1,5/44	1,75/56	2/66	2,25/80	2,5/100	–
6	0,5/6	0,75/10	1/15	1,25/24	1,5/34	1,75/46	2/58	2,25/72	2,5/84	–

После обработки экспериментальных данных, полученных для каждого типа насадок, были установлены зависимости числа теоретических тарелок в 1 м насадки от нагрузки по газу (F-фактор). Из анализа этих зависимостей видно, что практически эффективность каждой насадки постоянная при увеличении скорости газа. Наибольшую эффективность имеет насадка с гофрированной сетки, наименьшую – насадка из гофрированного листа с крупным гофром. При одинаковом гофре (10 мм) из насадок из листовых материалов наиболее эффективной является насадка из гофрированного перфорированного материала, наименее эффективной – насадка без перфорации. Высокие разрешающие свойства насадки ламельной из гофрированной тканой сетки обусловлены хорошо развитой поверхностью контакта фаз; жидкой – за счет капиллярного эффекта, возникающего в ячейках сетки, газовой – за счет турбулизации газа в системе перекрещивающихся каналов. Эффективность рулонной насадки в два раза ниже, чем ламельной из сетки, хотя они изготовлены из одного и того же материала и имеют практически одинаковую удельную поверхность. Это объясняется различными гидравлическими условиями в насадке.

Проведенные комплексные теоретические и экспериментальные исследования технологии производства пектиновых веществ позволили разработать научную концепцию, заключающуюся в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении возможности интенсификации процессов.

Список литературы

1. Бухкало С.И., Зипунников М.М. Анализ эффективности насадок при регенерации этилового спирта у виробництві пектину. XV межд. научн. конф. «Совершенствование процессов и оборудования пищевых и химических производств». Т. 1. № 43, ОНАПТ, – Одесса, 2013. С. 80 – 84.
2. Товажнянский Л.Л., Бухкало С.И., Ольховська О.І. та ін. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах. Київ «Центр учбової літератури»: 2011, с. 664–681.

УДК 66.061

**ГАЛЬВАНОХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ХРОМСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД
GALVANOCHEMICAL CLEANING OF CHROMIUM-CONTAINING WASTEWATER**

**Марат Салаватович Муллакаев, Георгий Борисович Векслер,
Алексей Петрович Храмов, Азат Ринатович Вахитов
Marat S. Mullakaev, Georgy B. Wexler, Alexey P. Khramtsov, Azat R. Vachitov**

*Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), Россия, Москва
Moscow state University of mechanical engineering (MAMI), Russia, Moscow
(e-mail mullakaev@mail.ru; alexei.hramcov@gmail.com)*

Аннотация: в работе изложены результаты выполненных экспериментов по определению рациональных режимов гальванохимической очистки хромсодержащих сточных вод ЗАО «Русский хром 1915». Сформулированы рекомендации по модернизации существующей системы очистки предприятия, на основе разработанной аппаратурно-технологической схемы, которую возможно осуществить за счёт создания двух автономных блоков: обезвреживания и разделения.

Abstract: the paper presents the results of the performed experiments to determine rational modes of galvanochemical purification of chromium-containing wastewater ЗАО "Russian chrome 1915". Formulated recommendations for the modernization of existing purification systems of the enterprise, on the basis of developed hardware and technological schemes, which can be implemented through the creation of two autonomous units: neutralization and separation.

Ключевые слова: хромсодержащие сточные воды, гальванохимическая очистка, магнетит, степень очистки, двухступенчатая очистка, шестивалентный хром, общее железо, сульфаты, аммоний, степень восстановления.

Keywords: chromium-containing wastewater, electroplating chemical cleaning, magnetite, degree of purification, a two-stage purification, hexavalent chromium, total iron, sulfates, ammonium, degree of reduction.

Одними из опасных загрязнителей сточных вод, являются соединения хрома, в силу их токсичности. Они препятствуют жизнедеятельности микроорганизмов и затрудняют процесс биохимической очистки. В настоящее время одним из самых эффективных методов очистки техногенных вод от ионов тяжелых металлов, нефтепродуктов и др. органических загрязнений является гальванохимический метод [1-3].

В работе выполнен комплекс экспериментальных работ с целью модернизации существующей технологии очистки хромсодержащих стоков предприятия ЗАО «Русский хром 1915». Очистные сооружения этого предприятия ежегодно перерабатывают около 1300 тыс. м³ стоков, используя реагентный метод очистки, с применением раствора железного купороса (FeSO₄) и известкового молока Ca(OH)₂. Количество осаждаемого Cr⁶⁺ в среднем составляет 250 т/год. Проектная мощность станции очистки – 350 м³/ч, максимальная – 320 м³/ч, среднегодовая – 150 м³/час. Средне-сезонный состав сточных вод, мг/л: Cr⁶⁺ – 160-400;

Cr^{3+} - 0-30; Fe (общее) – 0,7-1,0; SO_4^{2-} - 2000-4000; Cl - 150-200; взвешенные вещества - 5-30; NO_3^- - 20-40; NH_4^+ - 20-40; pH - 8-10.

Измерений концентраций загрязнений в пробах был выполнен с использованием следующих методик: ионов хрома (VI) - ПНД Ф 14.1:2.52–96, общего железа - ПНД Ф 14.1:2.50–96, ионов аммония - ПНД Ф 14.1:2.1-95, сульфат-ионов - ПНД Ф 14.1:2.159-2000.

В процессе экспериментов в качестве реагента использовали магнетит, наработанный на пилотной гальванокоагуляционной установке КБ-1, с использованием гальванопары железо-кокс (Fe-C).

Тестовые эксперименты, предусматривали контакт проб загрязненных вод объемом 1000 мл последовательно с навесками магнетита 100, 200, 500 г при перемешивании в течение 7...10 мин. Как видно из табл.1 гальванохимический метод с навеской магнетита 500 г обеспечивает не только высокую степень очистки сточных вод от ионов хрома, но и снижение содержания сульфатов на 25 %.

Таблица 1. Содержание загрязняющих веществ в сточных водах после очистки

№	Наименование пробы	Состав загрязнений, мг/л	
		Cr^{+6}	SO_4^{2-}
1	Проба загрязненного стока	209.9	946.8
2	Проба воды после очистки с применением магнетита при pH=7,0	<0.01	727.2
3	Проба воды после очистки с применением магнетита при pH=4,5	<0.01	1038.0

Результаты тестовых опытов по очистке проб реальных стоков объемом 500 мл с применением магнетита из расчёта 40 г на 100 мл приведены в табл. 2. Как видно, при очистке пробы из ливнеприемника, концентрация Cr^{6+} снижается до 0,01 мг/л, железа в кислой среде - в 4...7 раз, иона аммония в нейтральной среде - в 5...6 раз, сульфатов в кислой среде - на 34 %.

Таблица 2. Результаты тестовых опытов по очистке проб реальных стоков

Наименование загрязнения	Пробы из ливнеприемника				Пробы из шламоотстойника			
	pH 4,5		pH 6,0		pH 4,5		pH 8,13	
	до очистки	после очистки	до очистки	после очистки	до очистки	после очистки	до очистки	после очистки
Хром (VI), мг/л	100,23	0,010	100,23	0,018	0,005	0,008	0,005	0,005
Железо (общее), мг/л	3,37	0,46	3,37	0,87	0,96	0,31	0,96	0,30
Сульфаты, мг/л	4460,3	2943,8	4460,3	3221,3	4035,4	2784,5	4035,4	3061,8
Аммоний ион, мг/л	14,92	2,96	14,92	2,41	12,98	8,26	12,98	7,03

Затем, эффективность гальванохимического метода была отработана на пилотной установке с производительностью 0,72 м³/час при условии, что время контакта загрязнённой воды с гальванопарой (железо - кокс) составляло 10 мин. С целью определения рациональной производительности установки, при очистке в непрерывном режиме, неподвижный барабан гальванокоагулятора заполнялся сточной водой при различных значениях pH, включался в работу на 25 мин с периодической остановкой каждые 5 мин для отбора проб.

Изменение остаточного содержания загрязнений в процессе очистки сточных вод иллюстрируется графиками, представленными на рис. 1 и 2.

Практически полное извлечение ионов Cr^{6+} осуществляется в течение первых 5 мин при всех значениях pH (рис. 1а)

Концентрация ионов железа, после подкисления пробы стоков до pH~3, резко возросла примерно до 90 мг/л, что объясняется частичным растворением гидроксида железа (рис. 1б)

Концентрация сульфатов уменьшается на 30...35 % за 15...20 мин, как видно на рис. 2а, причём лучше всего очистка от сульфатов протекает в кислой среде.

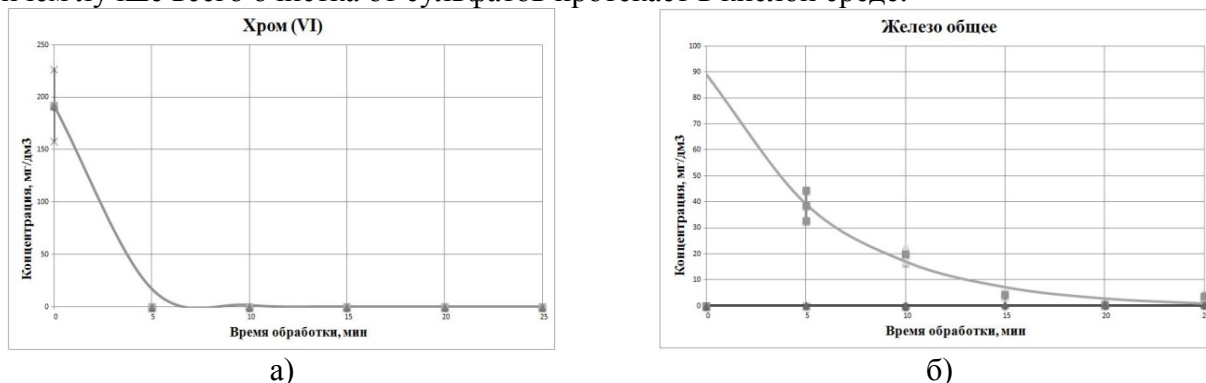


Рис.1. Зависимость концентрации загрязнений от времени обработки а) Cr⁶⁺ б) Fe (▲ pH~3; ◆ pH~7; ■ pH~9).

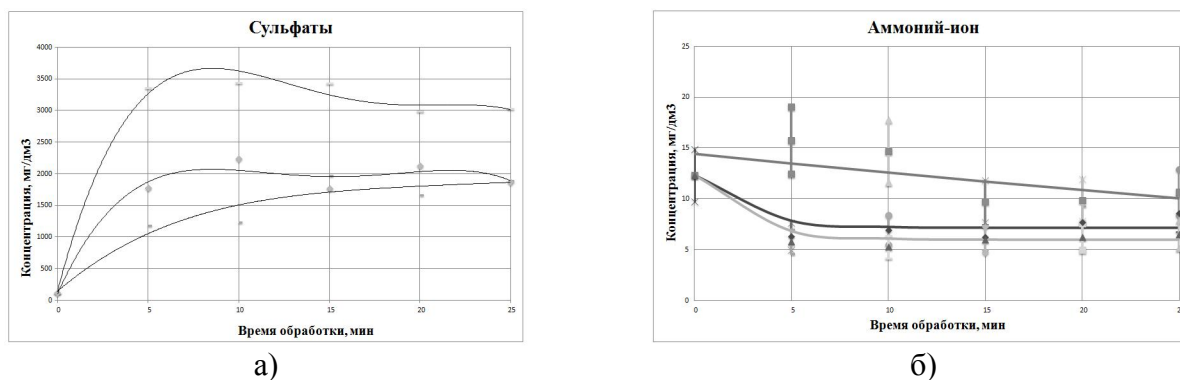


Рис.2. Зависимость концентрации загрязнений от времени обработки а) SO₄²⁻ б) NH₄⁺ (▲ pH~3; ◆ pH~7; ■ pH~9).

Концентрация ионов аммония, как видно из графиков на рис.2б, заметнее всего уменьшается в щелочной среде за первые 5 минут.

Результаты экспериментов на пилотной установке, выполненных на первом этапе, дали возможность оценить расход сточных вод при поступлении их на очистку в гальванокоагулятор в проточном режиме при его непрерывной работе в ожидании приемлемых показателей по остаточным загрязнениям. Как показали расчеты, пятиминутный контакт загрязненных вод с гальванопарой во вращающемся барабане пилотной установки, может быть достигнут при расходе 720 л/ч, а десятиминутный – при 360 л/ч.

Результаты очистки проб сточной воды на первой ступени приведены в табл. 3, из которой видно, что при увеличении расхода сточной воды в 2 раза через гальванокоагулятор, степень очистки существенно не изменяется.

Таблица 3. Результаты очистки проб сточной воды на первой ступени.

п/п	Загрязнения	Концентрация загрязнений, мг/л		
		Вода сточная	Вода очищенная	
			Расход 360 л/ч	Расход 720 л/ч
1	Cr ⁶⁺	135,3	0,028 ± 0,006	0,018 ± 0,006
2	NH ₄ ⁺	14,92	8,76 ± 1,86	10,54 ± 2,10
3	Железо	8,35	0,21 ± 0,04	0,19 ± 0,04
4	Сульфаты	4358	3987,5 ± 443,0	3516,2 ± 386,8

На втором этапе отрабатывалась эффективность комплексной двухступенчатой очистки. Очищенные на первой ступени воды после отстаивания подавались в непрерывном режиме во вращающийся барабан пилотной гальванокоагуляционной установки с расходом 720 л/ч при pH~9. Результаты анализов проб очищенной воды приведены в табл.4.

Таблица 4. Результаты комплексной двухступенчатой очистки сточных вод

п/п	Загрязнения	Концентрация загрязнений, мг/л		
		Вода сточная	Вода, очищенная на I ступени	Вода, очищенная на II ступени
1	Cr6+	135,3	0,009	0,013
2	NH4+	14,92	4,9	3,06
3	Железо	8,35	0,08	0,05
4	Сульфаты	4358	3850	3579

Очистные сооружения, которые целесообразно реконструировать в соответствии с аппаратурно-технологической схемой, представленной на рис.3. Циркуляционный контур обеспечивает повторное использование феррита в качестве сорбента и предварительное снижение уровня загрязнений стоков. Загрязненные стоки поступают в ёмкость-усреднитель 2, корректировка pH в котором осуществляется раствором кислоты с помощью дозатора 1. Подкисленные и ослабленные наработанным в гальванокоагуляторе ферритом стоки из усреднителя 2 подаются на сгущение насосом 13 в гидроциклонный аппарат 6. При этом осветлённый поток направляется в гальванокоагулятор 3, а концентрат – в сборник 8.

Поток ферритной суспензии из гальванокоагулятора, через скрапоуловитель 4 и промежуточную ёмкость 5 с помощью насоса 12 поступает в гидроциклонный аппарат 7. Концентрат отводится в усреднитель 2, а обезвреженный и осветлённый поток – на отстаивание и сброс или на доочистку. Концентрат из сборника 8 непрерывно подаётся на обезвоживающую центрифугу 9, а продукты разделения накапливаются в сборнике обезвоженного осадка 10 и накопителе фугата 11. Фугат с помощью насоса 15 перекачивается на сброс или доочистку.

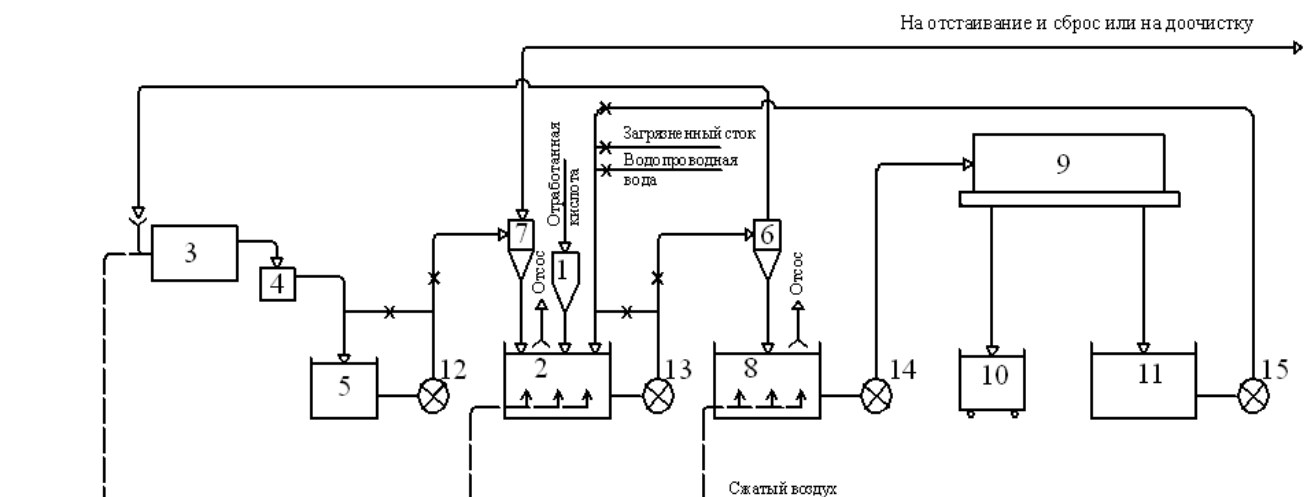


Рис. 3. Модернизированная аппаратурно-технологическая схема очистки сточных вод:

- 1 – дозатор кислот; 2 – усреднитель загрязненных вод; 3 – гальванокоагулятор;
 4 – скрапоуловитель; 5 – промежуточная ёмкость; 6, 7 – гидроциклоны;
 8 – сборник концентрата; 9 – центрифуга; 10 – сборник обезвоженного осадка;
 11 – накопитель фугата; 12, 13, 14, 15 – насосные блоки.

Выводы

1. Выполнены эксперименты по определению рациональных режимов гальванохимической очистки сточных вод, которые показали, что концентрация: Cr^{6+} снижается до 0,01 мг/л, железа в кислой среде - в 4..7 раз, ионов аммония в нейтральной среде - в 5..6 раз, сульфатов в кислой среде - на 34 %;

2. Предприятию ЗАО «Русский хром 1915» рекомендуется:

- сократить объём загрязнённых стоков на 24 %, за счёт исключения условно загрязнённых стоков, поступающих на очистные сооружения, после использования воды в системах охлаждения оборудования (до 300 тыс. м³/год);
- реализовать предложенной аппаратурно-технологической схемы, которая позволит, отказавшись от реагентной технологии, снизить эксплуатационные расходы, повысить степень очистки сточных вод и получить экономический эффект при утилизации осадка в виде феррита хрома.

Список литературы

1. Феофанов В.А., Дзюбинский Ф.А. Гальванокоагуляция: теория и практика бессточного водопользования. - Магнитогорск, ООО «МиниТип», 2006. 368 с.
2. Соложенкин П.М. Перспективы гальванохимических методов очистки техногенных вод. // Экология производства. Химия и нефтехимия. 2006. - №3 (5), С. 14-16
3. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязнённых вод и грунтов. Дис. докт. техн. наук. Московский государственный университет инженерной экологии. М.: 2011. - 391 с.
4. Муллакаев М.С, Абрамов В.О., Векслер Г.Б., Муллакаев Р.М. Ультразвук в процессах очистки кислых рудничных вод // Экология и промышленность России. 2015. № 12. С. 9–14.
5. Кереметин П.П., Кошелева М.К., Муллакаев М.С. Исследование и расчёт процесса очистки сточных вод методом гальванокоагуляции с применением ультразвука // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2010. № 2. С. 99 - 103.
6. Кереметин П.П., Муллакаев М.С., Кошелева М.К., Векслер Г.Б., Кручинина Н.Е. Расчёт эффективности процесса коагуляции нефтепродуктов при очистке воды // Вода: химия и экология. 2010. № 10. С. 17-20.
7. Кошелева М.К., Булеков А.П., Кереметин П.П., Чабаева Ю.А., Муллакаев М.С., Векслер Г.Б. Оценка эффективности ультразвуковой обработки реагента при очистке сточных вод от органических загрязнений // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2011. № 5. С. 125 - 129.
8. Абрамов В.О., Кошелева М.К., Кереметин П.П., Муллакаев М.С. Очистка сточных вод текстильных предприятий гальванохимическим методом с использованием ультразвукового поля // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2009. № 3. С. 107-110.
9. Keremetin P.P., Parilov P.S., Mullakaev M.S., Vexler G.B., Kruchinina N.E., Abramov V.O. Definition of regime and technological parameters of sonochemistry clearing of the petropolluted waters // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2011. Vol. 45. Issue 4. P. 931 – 937.
10. Abramov V.O., Abramova A.V., Keremetin P.P., Mullakaev M.S, Vexler G.B., Mason T.J. Ultrasonically improved galvanochemical technology for the remediation of industrial wastewater // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21. Issue 2. P. 812 - 818.
11. Абрамов В.О., Векслер Г.Б., Муллакаев М.С., Баязитов В.М, Кручинина Н.Е., Кереметин П.П., Париков П.С. Ультразвуковой гальванокоагуляционный комплекс очистки загрязнённых вод // Экология и промышленность России. 2009. № 10. С. 46 - 49.

УДК 678.073.002

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УТИЛИЗАЦИИ
ПОЛИМЕРНОЙ ЧАСТИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ
ANALYSIS OF OPPORTUNITIES INTEGRATED FOR TECHNOLOGIES
UTILIZATION POLYMER**

**Светлана Ивановна Бухкало, Оксана Игоревна Ольховская
Svetlana I. Buhkhalo, Oksana I. Olkhovskaya**

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

Аннотация: Рассмотрены основные системы газификационных агрегатов большой единичной мощности. Выделены основные логистические факторы, влияющие на технологические схемы газификационных агрегатов такие, как природа, качество и состав газифицирующего сырья, номенклатура целевых продуктов, экологические требования по вредным выбросам и эмиссии парниковых газов, местоположение агрегата относительно крупных производственных комплексов, возможности конверсии отходов в полезные продукты.

Abstract: The basic heat exchangers networks of big gasification plants with entrained-flow fuel gasification are considered. The main logistical factors that influence on process of gasification plants are underlined such fs nature quality and components content of fuel to be gasified, range of target products, environmental legislation and demands including greenhouse gases emission, location relatively to big industrial sites, possibilities of wastes conversion into saleable products.

Ключевые слова: газификация, комплексные технологии, теплообменные системы, целевые продукты, синтез-газ, конверсия отходов, выбросы, повышение эффективности.

Keywords: gasification, heat exchangers network, complex technology, target products, syngas, wastes conversion, emission, efficiency enhancement.

В работе продолжено рассмотрение вопросов исследования химико-технологических задач разработки научно-обоснованных интегрированных процессов и методов переработки полимерных отходов различного происхождения и срока эксплуатации [1, 2]. Такие вопросы необходимо решать для инновационных комплексных предприятий с применением математического моделирования процессов и учетом изменений физико-химических, молекулярных, химических и структурно-механических характеристик полимерных материалов при эксплуатации. Целью таких разработок, как правило, может быть выбор рациональных энерго- и ресурсосберегающих способов производства полимерной продукции нового ассортимента из вторичного полимерного сырья и проектирования эффективного оборудования для реализации их выпуска. При этом отличительной особенностью таких комплексных предприятий можно считать использование в качестве энергоносителей и сырьевых ресурсов продуктов высокотемпературной газификации полимерных отходов, например, загрязненных или смешанных с другими материалами после стадии специальной идентификации. Предварительная идентификация и элементарная классификация отходов, как известно, подразделяет их на отходы производства и отходы потребления [1, 2], пригодные к повторной переработке или высокотемпературной газификации.

Выделение газообразных токсичных веществ в результате горения полимерных материалов весьма серьезная опасность, связанная с их сжиганием. Достаточно указать, что термическое разложение при горении 1 кг полимера дает столько газообразных токсичных

веществ, которые достаточно для отравления воздуха в помещении объемом 2000 м³. У человека, находящегося в таком помещении, через 10–15 минут возникает тяжелое отравление или даже смерть. Продуктами горения полимерных материалов являются такие токсичные вещества, как формальдегид, хлористый водород, оксид углерода и др. Для достижения основной цели – экологической безопасности при утилизации полимерных отходов ТБО необходимо решать множество задач научного обоснования способа переработки и ее технологических особенностей.

Анализ процессов высокотемпературной газификации дает возможность утверждать, что термическая переработка твердых бытовых отходов (ТБО) не является уникальной возможностью экономически выгодно и экологически чисто перерабатывать любые ТБО в больших количествах без их предварительной идентификации и подготовки (сортировки, сушки): США – перерабатывают таким способом не более 15 % – приоритет отдан повторной переработке в изделия; Япония – перерабатывает таким способом около 75 %, т.к. они закупают по минимальным ценам сырье не подлежащее повторной переработке.

Процесс газификации углеродсодержащих отходов как части ТБО, представляет собой совокупность гетерогенных и гомогенных реакций в результате которых образуется газовая смесь, состоящая главным образом из оксида углерода (CO), водорода, небольшого количества метана (CH₄) и диоксида углерода (CO₂), которая называется синтез-газом или сингазом [4]. Следует отметить, что синтез-газ сам по себе является горючим газом и может быть использован в качестве топлива. Однако накопленных теоретических знаний, как о самих генераторах плазмы, так и о процессах с её участием недостаточно для начала проектирования крупнотоннажных производств. Необходима экспериментальная апробация и отработка процессов плазменной газификации отходов, что в итоге обусловило выбор и актуальность темы, применение экономических принципов для анализа существующих технологий: проявление принципиальных недостатков данных технологий; определение технологических процессов, приводящих к получению побочных продуктов и потоков, требующих дополнительной очистки. Анализ ситуации, к сожалению, на сегодняшний день в виртуальной области утилизации различного вида отходов (такую отрасль еще необходимо создать) показывает потенциальную возможность повышения эффективности их использования с точки зрения ресурсо- и энергосбережения путем создания производственных комплексов (рис. 1).

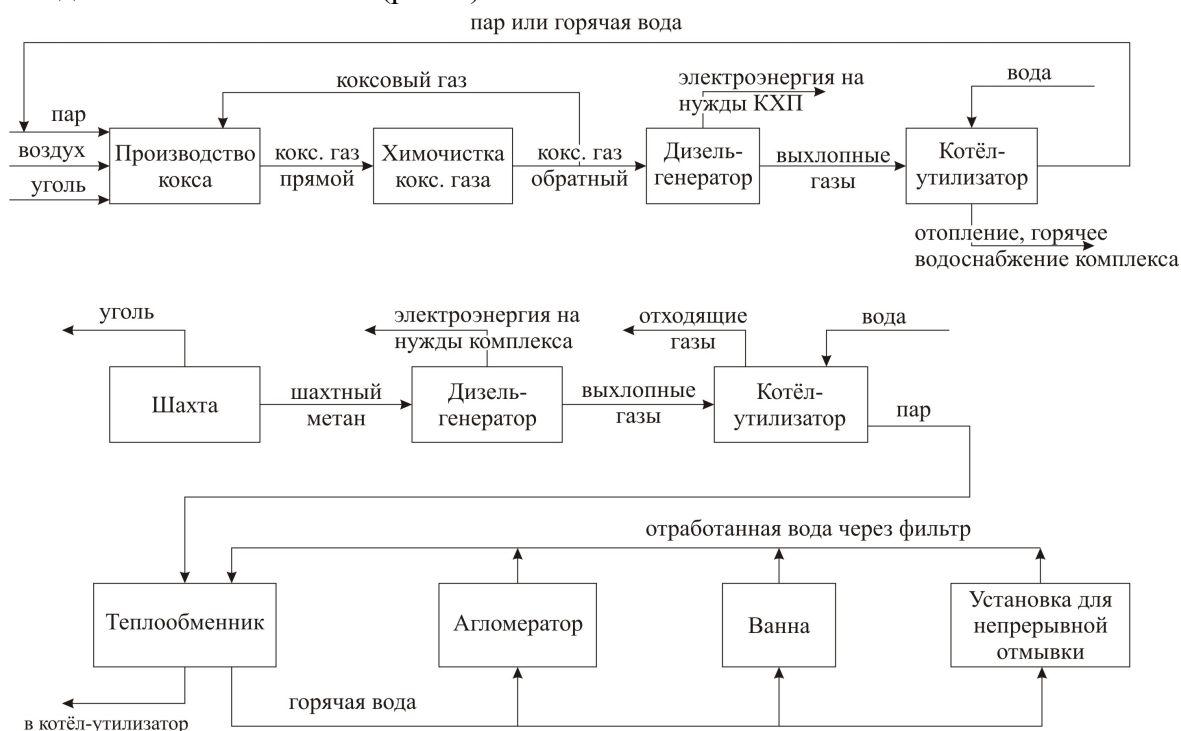


Рис. 1. Функциональная схема энергоутилизационного производственного комплекса.

В общем виде процесс газификации можно представить в виде функциональной схемы (рис. 2). Подготовленное к газификации сырье и газифицирующий агент поступают в газогенератор 3, в котором происходит процесс газификации. Сырой горячий синтез-газ охлаждается в котлах-утилизаторах или теплообменниках с выработкой пара с высокими параметрами. Кроме того, происходит очистка от механических примесей HCN и HCL. Затем синтез-газ поступает в узел очистки от сернистых соединений и CO₂. Улавливаемый сероводород может быть конвертирован в элементарную серу по известным технологиям. Очищенный синтез-газ может быть использован в газовых турбинах для выработки электроэнергии, как сырье для синтеза аммиака, метанола, топлива по методу Фишера-Тропша, водорода и некоторых продуктов органического синтеза. При модернизации узла очистки с возможностью полного улавливания CO₂ перед сжиганием сильно обогащенного водородом синтез-газа в узле газовых турбин уловленный CO₂ может быть использован, например, для интенсификации добычи нефти, природного или нетрадиционного газа (сланцевый газ, шахтный метан и др.) [3].

В современных газификационных агрегатах, которые вырабатывают электроэнергию, реализуется комбинированный парогазовый цикл, поэтому такие агрегаты можно классифицировать как установки комбинированного цикла комплексной газификации (КЦКГ).

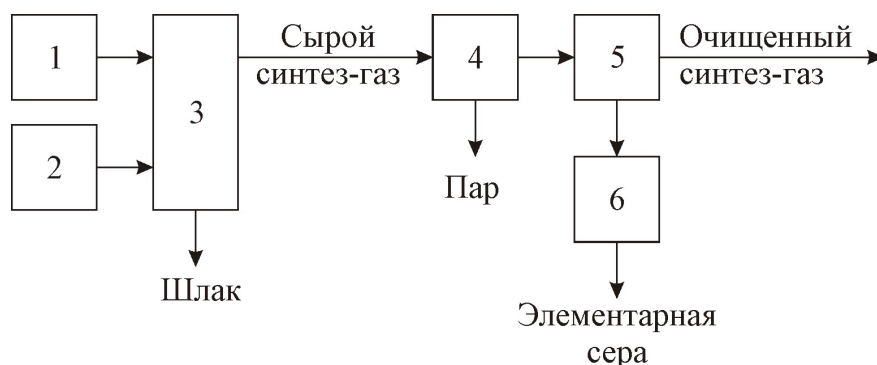


Рис. 2. Принципиальная схема газификационной установки:

1 – подготовка сырья; 2 – подготовка газифицирующего агента;

3 – газификационный аппарат; 4 – узел охлаждения и очистки синтез-газа;

5 – узел очистки синтез-газа от H₂S и CO₂; 6 – установка получения элементарной серы

Следует отметить основные проблемы повышения эффективности КЦКГ: повышение температуры синтез-газа перед камерой сгорания газовой турбины; повышение эффективности выработки пара высокого давления при охлаждении синтез-газа после газификации; повышение эффективности рекуперативных теплообменных позиций; снижение расхода тепла в системе сероочистки; снижение потерь тепла с дымовыми газами после котла-утилизатора и в конденсаторе паровых турбин. Эти проблемы могут быть решены путем усовершенствования методов подготовки сырья для газификации и теплообменных систем КЦКГ.

Проведенные исследования направлены на решение задач повышения эффективности использования ТБО и отходов различных отраслей промышленности в едином комплексе предприятий, который обеспечивает все свои энергетические потребности самостоятельно.

Список литературы

1. Бухкало С.И., Сериков А.В., Ольховская О.И. Об утилизации полимерных отходов как комплексе инновационных проектов // Вестник НТУ «ХПИ». Х. : 2012. № 10. С. 160-166.
3. Товажнянський Л.Л., Бухкало С.І., Ольховська О.І. та ін. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах. Київ «Центр учбової літератури»: 2011, 832 с.
2. K. Ota, H. Ishii, Y. Koyama. Overview of CO₂ Reduction by IGCC Technology. Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review, 2008, 45, № 1. p. 18–20.

УДК 664.858:634.11

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СЛИВОЧНОГО МАСЛА, ОБРАБОТАННОГО ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ
EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE MAIN CHARACTERISTICS
OF BUTTER, TREATED HIGH PRESSURE**

**Виталий Александрович Кириченко, Сергей Владимирович Громов
Vitaly A. Kirichenko, Sergey V. Gromov**

*Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского, Украина, Донецк
Donetsk national university of economics and trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky,
Ukraine, Donetsk
(e-mail: oblادن@kaf.donnuet.dn.ua)*

Аннотация: В статье представлены результаты исследования влияния высокого давления на физико-химические характеристики сливочного масла высоким давлением и оценка его органолептических свойств.

Abstract: The article presents the results of studies of the effect of high pressure on the physicochemical characteristics of butter high pressure and evaluation of its organoleptic properties.

Ключевые слова: высокое давление, сливочное масло, органолептические свойства.

Keywords: high pressure, butter, organoleptic properties.

Повышение требований потребителей к качеству продуктов привело к тому, что обычные методы пастеризации и удаления патогенной микрофлоры путем термического нагревания стали неприемлемыми. Низкотемпературное нагревание не уничтожает полностью патогенные элементы, а чрезмерное приводит к потере вкусовых и потребительских свойств готового продукта. Обработка сверхвысоким давлением является нетермическим способом пастеризации продуктов питания. Сверхвысокое давление уничтожает бактерии и патогенные микроорганизмы так же как и тепловое нагревание, при этом продукт остается свежим и сохраняется его натуральный вкус.

На данное время обработка продуктов питания высоким давлением является областью пищевых технологий, которая наиболее развивается. Несмотря на достигнутые результаты в обработке продуктов питания высоким давлением, проведенные в последние годы исследования в этом направлении еще недостаточны. Поскольку остаются еще неизученными довольно большие ассортименты продуктов, в частности, сливочное масло.

В процессе производства и хранения сливочное масло подвергается микробиологической порче, связанной с жизнедеятельностью разных микроорганизмов (микрококи, споры, бесспорные бактерии, дрожжи, плесени и др.), и окислительной деструкции. Окислению в первую очередь подвергаются незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты и некоторые жирорастворимые витамины, которые имеют самую большую пищевую ценность. Первичными продуктами окисления являются гидропероксиды и пероксиды, которые, не делая существенного влияния на органолептические свойства сливочного масла, являются токсичными. Вторичные продукты окисления (кетоны, альдегиды, кислоты) придают маслу специфические посторонние вкусы и запахи [1]. Поэтому улучшение качества и повышение сроков хранения сливочного масла является актуальным.

Анализ последних исследований и публикаций [2] дал возможность установить, что наряду с достигнутыми успехами в направлении обработки пищевых продуктов высоким давлением, остается много нерешенных проблем. Однако, окончательно не решена проблема

определения влияния высокого давления на физико-химические характеристики некоторых пищевых продуктов, в частности сливочного масла.

Целью статьи является определение влияния высокого давления на физико-химические характеристики сливочного масла.

Для определения влияния высокого давления на физико-химические характеристики сливочного масла проведена обработка образцов масла на экспериментальной установке сверхвысокого давления.

Экспериментальная установка обеспечивает следующие режимы:

- регистрацию параметров исследуемого объекта перед созданием необходимого давления;

- создание необходимого для экспериментальных исследований давления и нужной температуры с выдержкой исследуемого объекта в рабочей камере от нескольких минут до часа с непрерывным документированием с помощью персонального компьютера температуры и давления;

- уменьшение давления, разгрузку камеры, изучение изменений исследуемого объекта, который был поддан воздействию давления.

За рабочую среду, для создания необходимого давления была выбрана жидкость ПЭС-3. Технологическими требованиями и техникой безопасности предполагается капсулирование исследуемых объектов перед внесением в рабочую камеру установки для предотвращения взаимного влияния друг на друга со стороны образцов и рабочей среды.

Подготовленное сливочное масло 82,5% жирности упаковывали отдельно в резиновые мешочки и подвергали обработке высоким гидростатическим давлением в интервале 300-700 МПа, на протяжении 10-20 минут с поддержкой температуры $T = 293$ К (табл. 1.)

Таблица 1. Параметры обработки сливочного масла высоким давлением

Шифр пробы	К (контроль)	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
Давление, МПа	0	300	500	700	300	500	700
Время, мин	0	10	10	10	20	20	20

Для оценки влияния обработки высоким давлением на физико-химические характеристики изучались следующие показатели: стойкость сливочного масла к окислению (пероксидное число), кислотное число, стойкость к плесневению, термостойкость. Исследование кинетики окисления проведено методом отбора проб с использованием йодометрического титрования. Также проведена органолептическая оценка сливочного масла.

Определение пероксидных соединений.

Пероксидное число – количество миллилитров раствора $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, которых необходимо для титрования свободного йода, который выделился при окислении KI пероксидной группировкой 1 г масла.

Навеску масла 0,5 моль (0,001 г) отвешивали в колбу с пришлифованной пробкой и растворяли в 20 моль смеси, которая состоит из ледяной уксусной кислоты и четыреххлористого углерода (2:1 в объеме). Прибавляли 1 моль 50% водного раствора KI. При этом не наблюдали расслоения реакционной смеси, в другом случае увеличивали количество смеси растворителей к достижению полной однородности раствора. Раствор выдерживали на протяжении 20 мин без доступа света. Затем содержимое колбы разбавляли 50 моль дистиллированной воды и прибавляли 5-6 капель 1%-ного раствора крахмала. Йод, который выделился, немедленно титровали с микробюретки 0,01-ным раствором тиосульфата натрия. В тех же условиях ставили контрольный опыт.

Полученные данные из определения пероксидных соединений (рис. 1) указывают на то, что обработка высоким давлением замедляет процесс окисления сливочного масла.

Определение кислотного числа.

Кислотное число – количество миллиграммов едкого калия, необходимое для нейтрализации свободных жирных кислот, которые удерживаются в одном грамме масла.

Количество свободных жирных кислот зависит от качества масла, способа получения масла, условий его хранения и т.д. Кислотное число является одним из основных, качественных показателей масел.

В колбу отвешивали 0,5 г масла, доливали 50 мл нейтрализованной смеси диэтилового эфира и этилового спирта (2:1) и растворяли масло. Сюда же прибавляли 3-5 капли 1%-ного раствора фенолфталеина. Полученный раствор титровали 0,1-ным спиртовым раствором едкой щелочи до появления слабо-розового окрашивания. Результаты определения кислотного числа показаны на рисунке 2.

О возникновении вторичных продуктов окисления судили по содержанию свободных жирных кислот в сливочном масле, и можно сказать, что обработка высоким давлением практически не влияет на образование свободных жирных кислот.

Определение термостойкости сливочного масла.

Определение термостойкости сводится к контролю способности масла сохранять форму (не деформироваться под действием собственной массы) при температуре 28...30°C.

Из образцов сливочного масла с помощью проботборника вырезали цилиндрики установленного размера (диаметром и высотой по 20 мм) и осторожно размещали их на стеклянной пластинке с номерами проб на расстоянии 20...30 мм друг от друга. Затем пластинку с пробами помещали в термостат с заранее отрегулированной температурой 30 ± 1 °C, где выдерживали на протяжении 2 часов.

По окончании выдержки пробы осторожно (без толчков) вынимали из термостата, помещали на миллиметровую бумагу и измеряли диаметр каждого цилиндрика. Если проба продукта имела эллипсоидную форму, то измеряли максимальный и минимальный диаметр, и вычисляли среднее значение. Результаты этих измерений показаны на рисунке 3.

Для характеристики термостойкости масла подсчитывали коэффициент термостойкости (K), который равен отношению начального диаметра (D_0) основания цилиндрика к его среднему диаметру после термостатирования (D_1):

$$K = D_0 / D_1 \quad (1)$$

Показатель термостойкости K близкий к единице характеризует высокую термостойкость, а если он сильно отклоняется от единицы – сниженную.

По этим значениям можно утверждать, что показатель термостойкости после обработки сливочного масла высоким давлением остается практически неизменным.

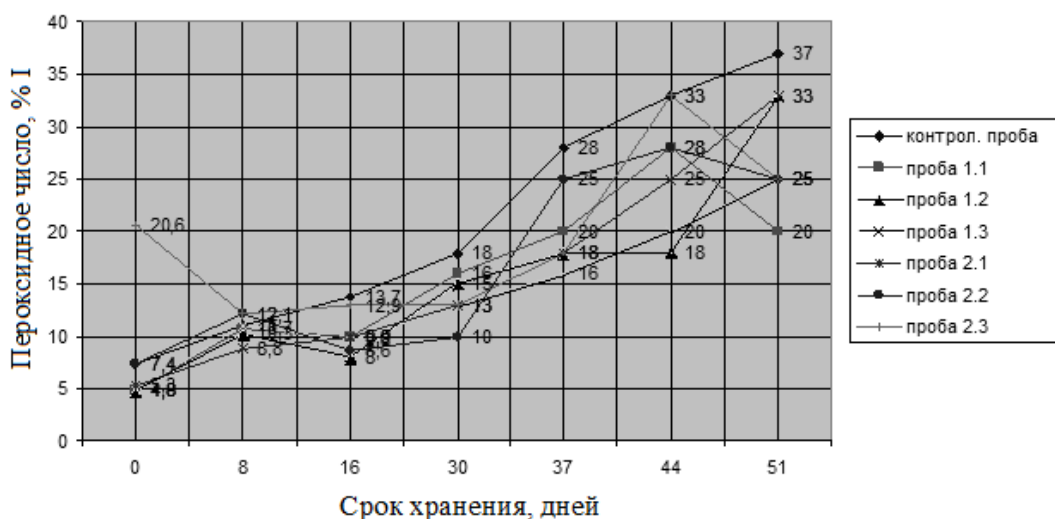


Рис. 1. Результаты определения пероксидного числа сливочного масла после обработки высоким давлением

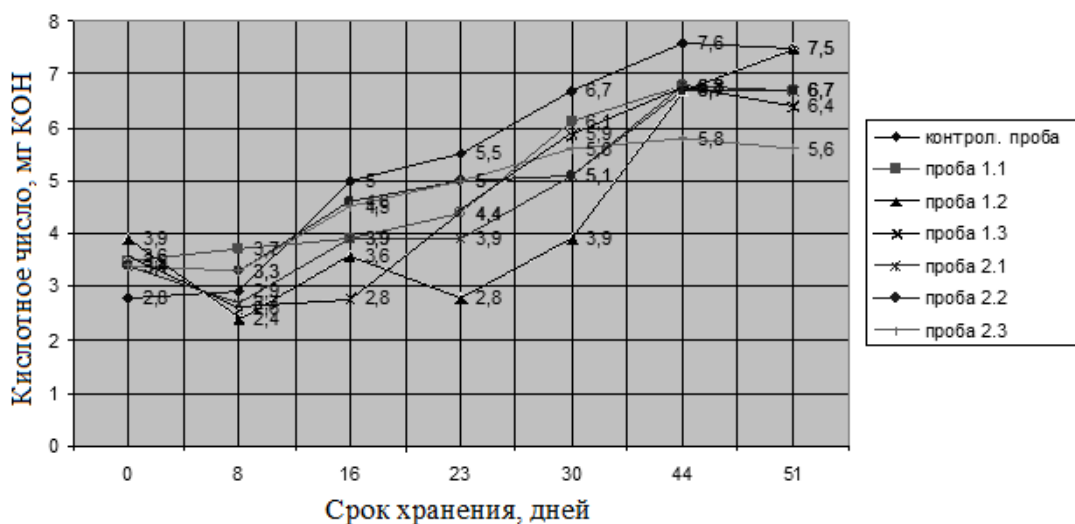


Рис 2. Результаты определения кислотного числа сливочного масла после обработки высоким давлением

Определение стойкости сливочного масла к плесневению.

Для этого из монолита сливочного масла отбирали пробу, от которой шпателем брали кусочки длиной 30...40 мм и ложили в открытые бюксы. Бюксы с маслом помещали в эксикатор, на дно которого налили немного воды. Эксикатор плотно закрыли и поставили в темное место (при температуре 20 °С). Каждый день осматривали поверхность исследуемых проб сливочного масла и отмечали появление плесени. Отсутствие плесени через 14 суток указывает на относительную стойкость масла к плесневению. Вся посуда при анализе была стерильной. Полученные результаты однозначно указывают на торможение развития микроорганизмов в сливочном масле, обработанном высоким давлением.

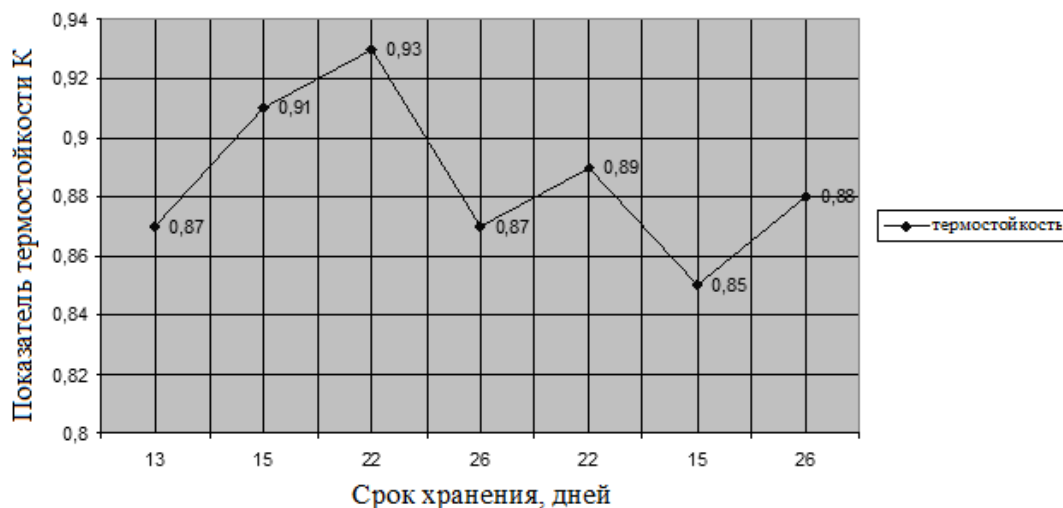


Рис 3. Результаты определения термостойкости сливочного масла после обработки высоким давлением

Дегустационная комиссия отметила, что сливочное масло, обработанное высоким давлением в интервале 300...700 МПа имеет приятный вкус и запах.

Анализ результатов микробиологических исследований свидетельствует о том, что с увеличением давления в продукте значение общего количества микроорганизмов снижается. При давлении 400 МПа достигается стерильность продукта.

Обобщая результаты экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что обработка сливочного масла высоким давлением улучшает его основные физико-химические характеристики и не влияет на органолептические свойства.

Перспективами дальнейших исследований в этом направлении является определение рациональных параметров обработки высоким давлением сливочного масла.

Список литературы

1. Шепелев А.Ф., Печенежская И.А., Кожухова О.И., Гуров В.С. Товароведение и экспертиза мясных, молочных, рыбных товаров. Р. на Д.: Феникс, 2002. 412 с.
2. Сукманов В.А., Хазинов В.А. Сверхвысокое давление в пищевых технологиях. Состояние проблемы. Донецк: ДонГУЭТ, 2003. 168 с.

УДК 66.065.2:628.341

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ В СТАТИЧЕСКИХ АППАРАТАХ FEATURES OF MODELING OF SEPARATION PROCESSES IN THE STATIC APPARATUS

Светлана Ивановна Бухкало, Валентин Николаевич Соловей, Сергей Петрович Иглин
Svetlana I. Buhkhalo, Valentin N. Solovey, Sergey P. Iglin

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

Аннотация: Рассмотрены основные возможности эксперимента с целью выбора методов моделирования процессов коагуляции в статическом коагуляторе, а также основные принципы и механизмы дестабилизации водных дисперсных систем с помощью коагулянтов и флокулянтов. Показано, что расчет и проектирование технологической схемы коагуляции на базе статических флокуляторов требуют предварительного экспериментального определения параметров коагуляции данной дисперсной системы в модельном аппарате с мешалкой.

Abstract: This article discusses implementation of the experiment in order to choose the methods of modeling the processes of coagulation in a static coagulator. In paper are considered the basic principles and mechanisms of destabilization of water dispersed systems using coagulants and flocculants. It is shown that the calculation and design of the technological scheme of coagulation based on static demand flocculators with preliminary experimental determination of the parameters of the coagulation model system in a disperse apparatus with stirrer

Ключевые слова: коагуляция в статическом коагуляторе, расчет и проектирование, дисперсная системы.

Keywords: coagulation in a static coagulator, calculation and design, disperse systems.

Одним из эффективных методов интенсификации технологических процессов флотации, сгущения, фильтрования и, в частности, очистки промышленных сточных вод от тонкодисперсных и коллоидных механических примесей является проведение агрегации под действием коагулянтов и флокулянтов. При этом коагуляцию можно рассматривать в качестве начальной стадии процесса, заключающейся в гидролизе добавляемых коагулянтов и адсорбции растворимых ионов гидролиза на частицах, приводящая к их дестабилизации. Следует отметить, что гидролиз и адсорбция являются быстрыми процессами и контролируются скоростью смешения раствора коагулянта с обрабатываемой средой, осуществляемого при быстром перемешивании.

Флокуляция – агрегация дестабилизированных частиц при оптимальном медленном перемешивании, которую проводят в аппарате, называемом камерой хлопьеобразования или флокулятором. Флокуляция частиц в жидкости зависит от столкновения частиц, вызванного

их относительным движением. Это относительное движение может быть вызвано броуновским движением и называется паракинетической флокуляцией или вызвано наличием градиента скорости и называется ортокинетической флокуляцией. Математическая модель гомогенной флокуляции разработана на основе дифференциального уравнения коагуляции, в котором частота столкновения частиц описывается зависимостью, полученной с учетом градиента осредненной и пульсационной компонент скорости. Вследствие сложности решения уравнений такого типа, реальный процесс флокуляции имеет условие – взаимодействуют флокулы одинакового размера, что позволило получить более простые дифференциальные уравнения для диаметра флокул и концентрации первичных частиц. Математическая модель гетерогенной флокуляции, представляющей собой взаимодействие пузырьков воздуха и флокул, которое происходит при подаче насыщенной воздухом воды в выходную часть статического флокулятора, получена на базе уравнения гомогенной флокуляции и с учетом полученной зависимости для определения эффективности столкновения пузырьков и флокул. Если индивидуальные частицы движутся со скоростью потока, то при отсутствии сил взаимодействия между частицами [1–4], частота столкновений в единице объема задается уравнением:

$$T_{ij} = \frac{4}{3} G \cdot R_{ij}^3 \cdot n_i \cdot n_j \quad (1)$$

где n_i и n_j соответственно численная концентрация частиц с размером i и j , радиусом r_i и r_j , состоящая из i и j первичных частиц; G – градиент скорости в потоке с однородным сдвигом; $R_{ij} = r_i + r_j$ – радиус сечения столкновения частиц.

С учетом уравнения (1) скорость изменения концентрации частиц с размером $k = i + j$ задается выражением:

$$\frac{dn_R}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=k-1} \frac{4}{3} G \cdot R_{ij}^3 \cdot n_i \cdot n_j - \frac{4}{3} \sum_{i=1}^p \frac{4}{3} G \cdot R_{ik} \cdot n_i \cdot n_k \quad (2)$$

Первое слагаемое отвечает за скорость образования k -частиц, а второе – задает скорость расходования k -частиц при столкновении с другими частицами. Коэффициент $\frac{1}{2}$ в первом слагаемом учитывает тот факт, что каждое столкновение подсчитывается дважды: один раз для i -частицы, а второй раз – для j -частицы. Объем V_i для i -частицы в i раз больше объема первичной частицы. С учетом эффективности флокуляции уравнение (2) в безразмерной форме можно записать как:

$$\frac{dN_R}{dT} = \frac{16}{3} \sum_{i=1}^{i=k-1} \alpha_{ij} \left(\frac{R_{ij}}{r_i} \right)^3 N_i N_j - \frac{32}{3} \sum_{i=1}^p \alpha_{ik} \left(\frac{R_{ik}}{2r_i} \right)^3 N_i N_k \quad (3)$$

где $N_i = n_i / n_0$; $T = G \cdot r_i^3 \cdot n_0 \cdot t$; n_0 – начальная концентрация частиц.

Для численного решения уравнения (3) необходимо знать параметры G , α , ρ , значения которых определяются по экспериментальным данным, полученным в конкретном типе флокулятора. Ранее локальных схем очистки воды от механических примесей был предложен статический флокулятор, представляющий собой трубу (рис. 1) с расположенными в ней на определенном расстоянии решетчатыми турбулизаторами [3].

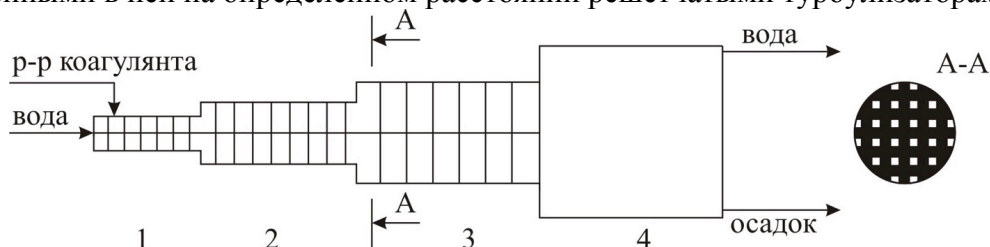


Рис. 1. Схема экспериментального флокулятора: 1 – смешительная камера; 2, 3 – двухкамерный статический флокулятор; 4 – отстойник или флотатор.

Конструктивное оформление процесса флокуляции (рис. 1) связано с тем, что агрегаты частиц, образованные в результате процесса коагуляции-флокуляции имеют четырехуровневую структуру [2]: 1) первичные частицы с размером порядка 1 мкм образуют плотные микрофлокулы с размером 10–15 мкм; 2) микрофлокулы объединяются между собой в флокулы размером 50–80 мкм; 3) флокулы в процессе флокуляции образуют агрегаты с размером 0,4–1 мм; 4) микрофлокулы формируются в смесительной камере, а флокулы и агрегаты – в двухкамерном флокуляторе при различных значениях градиента скорости, который при турбулентном режиме определяется из уравнения:

$$G = v_r' / \lambda = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu} \frac{r}{15}} \quad (4)$$

где v_r' – относительная пульсационная скорость на расстоянии r ; ε – скорость диссипации турбулентной энергии в единице массы; λ – микромасштаб турбулентности; ν – кинематическая вязкость.

Для изотропной затухающей турбулентности используется уравнение (5):

$$\varepsilon = 15\nu(u' / \lambda)^2 \quad (5)$$

где u' – среднеквадратичная пульсационная скорость.

В переходном или ламинарном режиме используется среднеквадратичный градиент скорости:

$$\bar{G} = \sqrt{\bar{\varepsilon} / \mu}; \quad \bar{\varepsilon} = (0,1 \div 0,2)\varepsilon_*; \quad \varepsilon_* = C(\omega^3 / (\pi \cdot l)), \quad (6)$$

где $\bar{\varepsilon}_*$, $\bar{\varepsilon}$ – соответственно общая и эффективная средняя скорость диссипации; C – коэффициент сопротивления решетки; ω – средняя скорость в флокуляторе; l – расстояние между решетками-турбулизаторами.

Константа k для расчетов определяются по углу наклона линейной зависимости на графике $\ln(n/n_0) = f(t)$. По найденному значению k рассчитывается $\alpha = k \cdot \pi / (4G \cdot \Phi)$. Максимальный размер флокул P зависит от градиента скорости $P = \alpha G$. Определяется он путем измерения размеров фрагментов агрегатов, которые образуются при дроблении полностью сформировавшихся флокул при ступенчатом увеличении градиента скорости.

На основании проведенных исследований показано, что повышение эффективности коагуляционной очистки воды может быть достигнуто путем применения статических флокуляторов. Применение таких аппаратов, в свою очередь, позволит сократить расход коагулянта и создать простые по конструкции коагуляционные установки с флотационным отделением флокул от воды. Практическая ценность работы может быть повышена путем комплексного решения поставленных целей, связанных с разработкой технологической линии очистки загрязненной воды.

Список литературы

1. Higashitani, K., Ogawa, R., Hosokawa, G., Matsuno, Y. Kinetic theory of shear coagulation for particles in a viscous fluid. J. Chem. Engng. Japan, 1982, 15, 299–304.
2. Соловей В.Н. Разделение водных дисперсий коагуляцией в статических аппаратах. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харьков.: НТУ «ХПИ», 1990. 17 с.
3. Бухкало С.И., Соловей В.Н. Экспериментальные методы моделирования процесса коагуляции в статическом коагуляторе // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2015. Вип. 44 (1153). – С. 75–78.
4. Шакиров Ф.Ф. Интерполяционные многочлены в математическом моделировании процессов очистки сточных вод / Ф.Ф. Шакиров, М.Г. Ахмадиев, И.Г. Шайхiev // XVIII межд. н. конф. Математические методы в технике и технологиях. Сб. трудов, Казань, 2005, т. 4, с. 35–37.

УДК 66.081.63

**ЭЛЕКТРОУЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННАЯ ОЧИСТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РАСТВОРОВ БИОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ
ELECTRO ULTRAFILTRATION CLEANING PROCESS CHEMICAL SOLUTIONS
PRODUCTIONS**

**Сергей Иванович Лазарев, Анатолий Александрович Лавренченко,
Дмитрий Сергеевич Лазарев
Sergei I. Lazarev, Anatoly A. Lavrenchenko, Dmitry S. Lazarev**

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

Аннотация: Исследован коэффициент задержания эдектроультрафильтрационного разделения биохимических производств на плоскокамерной установке. Получены экспериментальные данные по коэффициенту задержания и проанализированы кинетические зависимости на мембранах УАМ-150, УПМ-К в зависимости от плотности тока и градиента давления.

Abstract: Research coefficient detention Electrical ultrafiltration separation biochemical industries on ploskokamernoy installation. Experimental data on the coefficient of kinetic arrest and analyzed depending on membranes UAM-150, TPC-K depending on the current density and pressure gradient.

Ключевые слова: коэффициент задержания, ультрафильтрационная мембрана, плотность тока, давление.

Keywords: retention rate, ultrafiltration membrane, the current density and pressure.

Важнейшей кинетической характеристикой процесса электроультрафильтрации является коэффициент задержания [35]. Коэффициент задержания электроультрафильтрационного процесса находили по формуле [37]:

$$K = 1 - \frac{C_{пер}}{C_{исх}} \quad (1)$$

где: K – исследуемый коэффициент задержания; $C_{пер}$ – концентрация исследуемого вещества в пермеате, $кг/м^3$; $C_{исх}$ – концентрация растворенного вещества в исходном растворе, $кг/м^3$.

Исследования коэффициента задержания проводили на установке схема которой показана на рис. 1. Исследуемый раствор из исходной емкости (1) под действием насоса-дозатора (2) через блок вентилях высокого давления (дросселей) нагнетался в мембранную камеру разделительной ячейки (3). В этот же момент времени к электродам от блока питания (13) подавался ток постоянной величины. В мембранной камере раствор разделялся на ретентат и пермеат, после чего раствор снова возвращался в расходную емкость (1). Для снижения пульсаций колебаний давления в мембранном аппарате, а также увеличения расхода рабочего раствора в мембранной системе имеется гидроаккумулятор (6). Он выполнен из коррозионностойкого материала и представляет собой сварной металлический сосуд цилиндрической формы ($V=3,5л$), который первоначально заполнялся сжатым воздухом компрессором высокого давления (9) до гидростатического давления, имеющего величину 30-40 % от рабочего давления в камере электроультрафильтрационной ячейки.

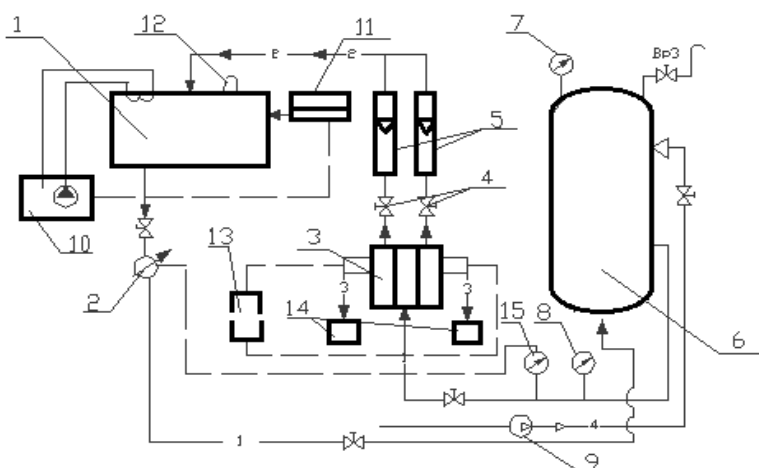


Рисунок 1. Схема лабораторной установки для проведения исследований по коэффициенту задержания и удельному потоку растворителя

Для осуществления контроля над давлением имеется образцовый манометр (7). В качестве контролирующего – использовался электроконтактный манометр (8), который в то же время следил за работой плунжерного насоса, и через электромагнитное реле выключал насос при повышении давления выше рабочего значения. Величина расхода раствора задавалась ходом плунжерного насоса (2). Для исследования влияния температуры в системе имелся термостат (10). С помощью потенциометра (11) и термометра (12) осуществлялась его автоматическая регулировка. Для изменения напряжения и, как следствие, плотности тока во время эксперимента использовался блок питания постоянного тока 13. Пермеат, то есть очищенный раствор в процессе электроультрафильтрационного разделения, собирался в емкости раствора (14). Величина давления в системе регулировалась элементом высокого давления (15). Элементы мембранной установки, соприкасающиеся с исследуемым раствором, выполнялись из коррозионностойкого материала (нержавеющей стали).

Представленный на рис.2 коэффициент задержания зависит и от величины плотности тока. У ультрафильтрационной прианодной мембраны УАМ-150 его величина несколько выше, чем у прикатодной мембраны УПМ-К. Это связано с различным видом взаимодействия растворенного вещества с пограничным слоем, разным зарядом мембраны и разной пористой структурой активного слоя этих мембран.

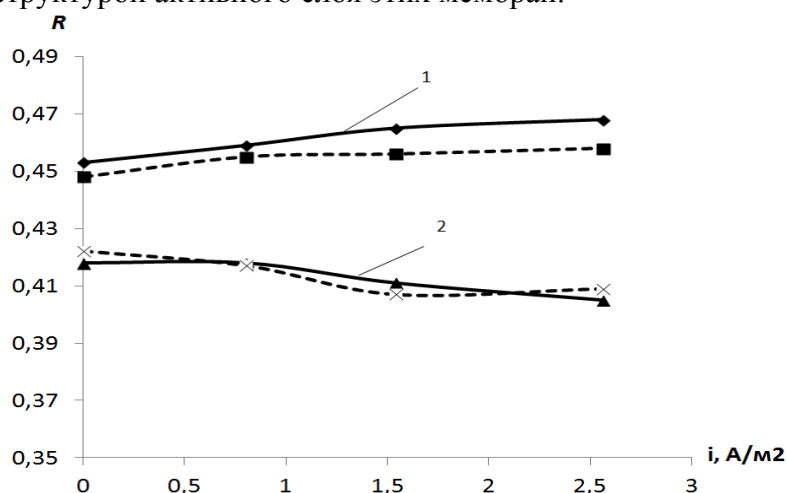


Рисунок 2. Зависимость коэффициента задержания динамической мембраны от плотности тока: 1) прианодная мембрана УАМ-150, 2) прикатодная мембрана УПМ-К. (сплошная линия - эксперимент, пунктиром - расчетные данные).

На рис.3 представлено изменения коэффициента задержания в процессе образования динамических мембран и изменения их селективных свойств на поверхности активного слоя

ультрафильтра в результате сорбции микрочастиц и коллоидов из потока технологического раствора биохимических производств [1-3]. В качестве технологических растворов и основы для образования динамических мембран нами использовались водные растворы отходов спирто-дрожжевого производства биохимического предприятия «Биохим» Тамбовской области. В целом процесс формирования динамической мембраны на поверхности ультрафильтрационных мембран условно можно разделить на два периода, которые подтверждаются кинетическими кривыми, представленными на рисунке 3. В первом периоде в области низких давлений (до 2 МПа), динамическая мембрана сформирована, но еще не уплотнена, коэффициент задержания возрастает практически линейно. Во втором периоде, при увеличении давления свыше 2 МПа наблюдается незначительное снижение коэффициента задержания, которое затем стремится к асимптотическому значению, что свидетельствует об уплотнении дисперсных частиц слоя динамической мембраны и установлении постоянных селективных свойств [4-5].

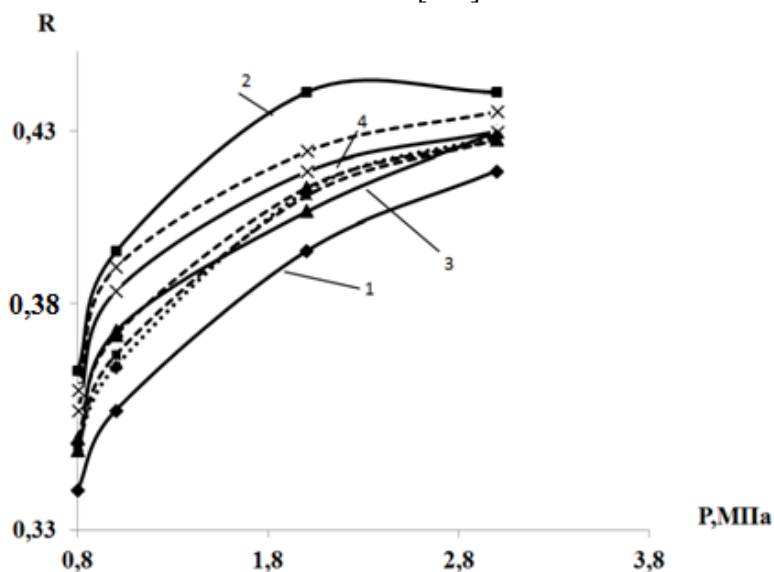


Рисунок 3. Зависимость коэффициента задержания динамической мембраны от рабочего давления и концентрации исходного раствора для мембраны УАМ-150. Концентрации (C , кг/м^3), обозначены: 1- 4,27; 2-5,32; 3-6,24; 4-8,4 (сплошная линия – эксперимент, пунктиром – расчетные данные).

Список литературы

1. Пат. 2073701 Российская Федерация, МПК⁶ С12F 3/10, С12N 1/16, С12N 1/02. Способ утилизации последрожжевой меласной бражки / Воробьева Г. И., Пономарева Т. А., Мочалкин О. М., Соколов Д. Д., Гордеева Е. И., Сильченко Н. В., Гапонова Л. М., Горбачев А. В. ; заявитель и патентообладатель Гос. науч.-исслед. ин-т биосинтеза белковых веществ. – № 93039023/13 ; заявл. 27.07.1993 ; опубл. 20.02.1997, Бюл. № 5.
2. Бабенышев, С. П. Мембранная технология очистки растительного масла / С. П. Бабенышев, И. А. Евдокимов // Хранение и перераб. сельхозсырья. – 2008. – № 4. – С. 78 – 80.
3. Брык, М. Т. Ультрафильтрация / М. Т. Брык, Е. А. Цапюк. – Киев : Наукова думка, 1989. – 288 с.
4. Духин, С. С. Коллоидно-электрохимические аспекты формирования и функционирования динамических мембран. Однослойные коллоидные мембраны / С. С. Духин, Т. В. Князькова // Коллоид. журн. – 1980. – Т. 42, № 1. – С. 31–42.
5. Лазарев, С. И. Влияние давления на формирование динамических мембран при ультрафильтрации водных растворов дрожжевых и спиртовых производств / С. И. Лазарев, В. Л. Головашин // Вестн. Тамб. университета. Сер. Естеств. и техн. науки. – 2011. – Т. 16, вып. 1. – С. 227 – 229.

УДК [633.1 + 633.85] : 631.365

**ОСОБЕННОСТИ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ
МЕЛКОСЕМЕННЫХ КУЛЬТУР
FEATURES ACTIVE VENTILATION SMALL-SEEDED CROPS**

**Людмила Константиновна Овсянникова
Lyudmila K. Ovsyannikova**

*Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, Одесса
Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine, Odessa
(e-mail: ludok-08@bk.ru)*

Аннотация: Данная работа посвящена научному обоснованию эффективных режимов активного вентилирования мелкосеменных культур (сорго, масличного льна, горчицы, рапса и мака), позволяющие снизить энергозатраты и сохранить их качество. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований физико-технологических, аэродинамических свойств, размерных характеристик мелкосеменных культур. Определены удельные расходы воздуха для активного вентилирования зерна мелкосеменных культур.

Abstract: This work is devoted to the scientific substantiation of effective regimes of active ventilation seeded crops (sorghum, oilseed flax, mustard, rapeseed and poppy), allowing to reduce energy consumption and to preserve their quality. The results of theoretical and experimental studies of physico-technological, aerodyna-chemical properties, dimensional characteristics-seeded crops. Defined specific consumption of air for aeration of grain for small-seeded crops

Ключевые слова: мелкосеменные культуры, активное вентилирование, энергозатраты
Keywords: the small-seeded crops, the active ventilation, energy.

Зерновой сектор Украины является стратегической отраслью экономики государства, которая определяет объемы предложения и стоимость основных видов продовольствия для населения страны, в частности, продуктов переработки зерна. Тенденция к увеличению производства зерновых, масличных и бобовых культур прослеживается из года в год. Необходимо отметить, что таким, давно известным мелкосеменным масличным культурам, как рапс, горчица, лен, мак и другим, уделяют большое внимание, наблюдается тенденция увеличения их посевных площадей [1].

Рассматриваемые культуры относятся к, так называемым, мелкосеменным культурам (МК) из-за своих геометрических размеров. Гладкая поверхность, округлая форма и небольшой диаметр обуславливают сниженную скважистость насыпи - в среднем 30 % от общего объема насыпи (для пшеницы — 35...45 %, овса — 50...70 %, гречихи — 50...60 % [2]). При механизированной загрузке семян МК в склад насыпь дополнительно уплотняется еще на 2...3 %, а при хранении и продувке, вследствие естественного уплотнения, происходит дальнейшее уменьшение скважистости. Все это существенно повышает (более чем в 2 раза) сопротивление насыпи семян МК перемещению через нее воздуха по сравнению с зерном пшеницы, ячменя и других культур.

Это заставляет, во-первых, существенно корректировать технологические режимы их послеуборочной обработки. Поскольку данные культуры прежде массово не поступали на зернозаготовительные предприятия Украины, то в нормативной документации («Инструкции № 9-5-82 по очистке и выделению мелкой фракции зерна, эксплуатации зерноочистительных машин на элеваторах и хлебоприемных предприятиях», «Інструкції по сушінню продовольчого, кормового зерна, насіння олійних культур та експлуатації зерносушарок») отсутствуют режимы послеуборочной обработки большинства упомянутых культур и сегодня послеуборочная обработка и хранение проводятся по стандартам и нормативным документами, разработанными в 80...90-х годах прошлого столетия,

Поэтому вопрос по изучению технологических свойств МК и разработки режимов и способов их хранения с применением активного вентилирования, связано с определением механических и технологических характеристик зерна и аэродинамического сопротивления зернового слоя, необходимых для определения расходов воздуха, а также энергетических затрат.

Объектом исследования в работе являются мелкосеменные зерновые (сорго, сориз, амарант) и масличные (рапс, горчица, масличный лен, мак) культуры разных сортов и разных лет урожая. В исследованиях использовали стандартные и общепринятые методы.

Сравнительная характеристика показателей физико-технологических свойств вышеуказанных мелкосеменных культур в зависимости от влажности показала, что влажность по-разному влияет на физико-технологические свойства культур. Так, с увеличением влажности зерна (семян) возрастают масса 1000 зерен (в 1,10...1,78 раз), их истинный объем, плотность укладки и угол естественного откоса, а натура — снижается (в 1,09...1,24 раз). Эти тенденции согласуются с литературными данными [3, 4].

Основными факторами, которые влияют на сыпучесть зерновой массы, является гранулометрический состав и грануло-морфологическая характеристика зерна (форма, размеры, характер и видовой состав; материал, форма и состояние поверхности, по которой самотеком перемещают зерно).

Размерные характеристики изученных культур были получены измерением размеров 100 зерен (семян) с последующей статистической оценкой полученных результатов по разработанным нами программам для ЭВМ. Рассчитаны основные геометрические показатели мелкосеменных культур, которые позволяют моделировать процессы вентиляции, сушки, подбирать режимные параметры технологических машин [5, 6].

Нами была исследована скорость витания зерна и семян МК (сорго, сориза, льна масличного, горчицы, рапса и мака) в диапазоне изменения их влажности 6,3...24,2 %. Результаты исследований были обработаны и представлены в виде линейных уравнений вида ($y = a + bw$). Эмпирические коэффициенты линейной зависимости скорости витания (a , b) мелкосеменных культур от их влажности (w) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов a , b

Коэффициенты	Сорго	Сориз	Амарант	Рапс	Горчица	Лен	Мак
a	7,85	4,90	0,08	6,99	6,34	5,06	3,78
b	0,019	0,021	2,769	0,007	0,018	0,021	0,041

Установлено, что с увеличением влажности культур скорость витания возрастает на 0,18...0,41 м/с. Для мелкосеменных зерновых культур скорость витания (в м/с) находится в пределах: сорго и сориз – 5,0...8,0; просо – 4,5...9,5; амарант – 3,0...8,5; для мелкосеменных масличных культур: горчица – 8,0...14,0; рапс – 3,0...8,0; лен – 9,5...12,0; мак – 3,8...5,8. Скорость витания зависит от формы и размеров зерновки. Так, наименьшую скорость витания имеют семена мака, наибольшую – сорго. Проведенная математическая обработка результатов исследований показывает, что зависимость скорости витания от влажности семян имеет линейный характер.

Полученные результаты можно использовать для обоснования скорости воздушного потока при очистке семян в пневмосепараторах, при наладке скорости воздушных потоков в пневмоканалах ситовоздушных сепараторов, при обосновании расходов сушильного агента и воздуха в зерносушилках, при активном вентилировании и т.д.

Далее нами было исследовано аэродинамическое сопротивление зернового слоя мелкосеменных культур (сорго, лен, горчицы, рапса и мака) в диапазоне изменения их влажности 9,8...21,8 %. Аэродинамическое сопротивление определяли при высоте слоя зерна 100...300 мм и скорости воздушного потока 1...6 м/с.

Установлено, что с увеличением толщины слоя и влажности семян увеличивается сопротивление слоя семян и, соответственно, и расход воздуха на преодоление сопротивления продуваемого слоя семян [7].

Для обобщения зависимости аэродинамического сопротивления слоя семян H_c от их влажности и высоты слоя в исследованном диапазоне изменения влажности и толщины слоя был проведен множественный регрессионный анализ [4], статистическая оценка и получены следующие эмпирические уравнения в натуральных переменных:

$$\text{для сорго} \quad H_c = 55,91 - 1,55h - 0,26w + 0,026h \cdot w \quad (S = 0,12 \cdot 10^{-5}); \quad (1)$$

$$\text{для льна} \quad H_c = 5,83 - 2,09h - 0,10w + 0,016h \cdot w \quad (S = 0,11 \cdot 10^{-5}); \quad (2)$$

$$\text{для горчицы} \quad H_c = 50,84 - 1,42h - 0,04w + 0,013h \cdot w \quad (S = 0,14 \cdot 10^{-5}); \quad (3)$$

$$\text{для рапса} \quad H_c = 11,54 - 2,22h - 0,07w + 0,0011h \cdot w \quad (S = 0,42 \cdot 10^{-5}); \quad (4)$$

$$\text{для мака} \quad H_c = 86,10 - 3,15h - 0,14w + 0,026h \cdot w \quad (S = 0,11 \cdot 10^{-5}), \quad (5)$$

где h — высота слоя семян, мм; w — влажность семян, %; H_c — сопротивление слоя зерна, Па; S — среднеквадратичное отклонение.

Все коэффициенты являются значимыми, а уравнения (1) – (5) с надежностью $p = 0,95$ адекватно описывают зависимость аэродинамического сопротивления от влажности и высоты слоя мелкосеменных культур в исследованном диапазоне их изменения.

Анализ уравнений показывает, что аэродинамическое сопротивление мелкосеменных культур возрастает с увеличением высоты насыпи, влажности и плотности укладки, содержания мелкой фракции и скорости воздушного потока.

Расход воздуха на охлаждение зерна определяют с учетом удельных теплоемкостей зерна и воздуха:

$$L = \frac{c_3 G_3 (\theta_n - \theta_k)}{c_n \rho (t_n - t_k)} = \frac{c_3}{c_n \rho} G_3 \quad (6)$$

где G_3 – масса зерна, кг; c_3 – удельная теплоемкость зерна, Дж/(кг·К); c_n – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); ρ – плотность воздуха при его температуре, кг/м³; t_n , t_k – температура воздуха до и после вентилирования, °С; θ_n , θ_k – температура зерна до и после вентилирования, °С.

Удельные расходы воздуха для активного вентилирования мелкосеменных культур, обеспечивающие их охлаждения до температур наружного воздуха, определяли для семян с влажностью 10, 16 и 22 % и при температуре воздуха плюс 5, 15, 25 °С, результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Удельные расходы воздуха для активного вентилирования мелкосеменных культур, м³/т (n=3, p≥0,95)

Культура	Влажность, %	Температура воздуха, °С			Культура	Влажность, %	Температура воздуха, °С		
		5	15	25			5	15	25
Сорго	10	1608	1611	801	Рапс	8	1726	1628	913
	16	1982	1860	1109		12	2359	2243	1768
	22	2292	2060	2052		16	2527	2483	2233
Горчица	8	1146	1002	938	Мак	8	1360	1002	938
	12	1961	1795	1409		12	1961	1795	1188
	16	2440	2331	2176		16	2440	2331	2176

Подставив значения удельной теплоемкости зерна при известной его начальной влажности w_0 и воздуха с известными параметрами t , ϕ и ρ , определим необходимое количество воздуха, которое необходимо подать для охлаждения 1 кг семян до заданной

температуры θ_k , а зная массу вентилируемой насыпи G_3 , легко рассчитать общее количество воздуха на охлаждение всей партии.

Согласно Инструкции по активному вентилированию, учитывая неравномерность распределения воздуха в слоях зерна, принято, что для охлаждения 1 т семян до температуры охлаждающего воздуха необходимо обеспечить подачу воздуха $2000 \text{ м}^3/\text{т}$ [8], тогда продолжительность вентилирования τ (ч) для охлаждения МК можно определить из соотношения:

$$\tau = 2000 / L, \text{ ч.} \quad (7)$$

Исходя из формулы (7), продолжительность вентилирования для охлаждения 1 т мелкосеменных культур к температуре охлаждающего воздуха или близкой до температуры охлаждающего воздуха при влажности семян 10 ... 22 % будет составлять 0,81 ... 2,49 ч.

Данные исследования подтверждают, что в условиях активного вентилирования МК повышенной влажности расход воздуха увеличивается, и, следовательно, сокращение продолжительности вентилирования зерна и семян МК можно достичь путем снижения толщины продуваемого слоя.

Выводы

Для наиболее распространенных мелкосеменных культур определены физико-технологические свойства, подтверждено, что они имеют между собой тесные корреляционные связи, которые дают возможность по основным показателям (размеры зерен, масса 1000 зерен, плотность и натура зерна) достоверно определить производные характеристики по приведенным математическими соотношениями.

На основании исследований аэродинамических свойств мелкосеменных культур (сорго, лен, горчица, рапс, мак) установлена зависимость скорости витания от влажности хранящихся МК и получены линейные эмпирические уравнения указанной зависимости, справедливые для диапазона влажности 9,8...21,8 %.

Установлены закономерности изменения сопротивления зернового слоя сорго, семян льна, горчицы и рапс в зависимости от их влажности и толщины слоя. Получены эмпирические уравнения для расчета сопротивления слоя зерна, которые справедливы для диапазона влажности сорго 12...22 %, льна, горчицы и рапса – 10...16 % и толщины слоя хранящихся мелкосеменных культур 100...300 мм при скорости воздуха 3 м/с.

Список литературы

1. Зерновий та хлібопродуктовий товарообіг в Україні: Енциклопедичний довідник / Під ред. Александрова В.Т. К.: АртЕк, 2000. 500 с.
2. *Малин Н.М.* Технология хранения зерна. М.: КолосС, 2005. 280 с.
3. *Вобликов Е.М., Буханцов В.А., Маратов Б.К., Проконе А.С.* Послеуборочная обработка и хранение зерна. Ростов н/Д: издательский центр «МарТ», 2001. 240 с.
4. *Овсянникова Л.* Первинна обробка дрібнонасіньових олійних культур // Зерно і хліб. 2006. №1. С. 30-31.
5. *Остапчук М.В., Станкевич Г.М.* Математичне моделювання на ЕОМ: підруч. – Одеса: Друк, 2006. 313 с.
6. *Овсянникова, Л.К., Орлова С.С., Соколовська О.Г.* Порівняльний аналіз дрібнонасіньових культур на основі статистичних характеристик їх розмірів // Наук. пр. ОНАХТ. Вип. 36. Т. 1. Одеса, 2009. С. 72-76.
7. *Станкевич, Г.М., Овсянникова, Л.К., Соколовська О.Г.* Дослідження аеродинамічних властивостей та активного вентилявання дрібнонасіньових культур // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка «Механізація с/г виробництва та переробки с/г продукції». Вип. 103. Харків, 2010. С. 409.
8. *Мельник, Б.Е. Малин Н.И.* Справочник по сушке и активному вентилированию зерна М.: Колос, 1980. 175 с.

УДК 663.854.78

**ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ УТИЛИЗАЦИИ
РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОСКОВ
CHEMICAL TECHNOLOGY AND PROCESSES OF RECYCLING PLANT WAXES**

**Лариса Леонидовна Руднева, Светлана Ивановна Бухкало
Larisa L. Rudneva, Svetlana I. Buhkhalo**

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

Аннотация: Разработаны технологические стадии процесса получения восков растительного происхождения. Определены основные закономерности протекания технологических стадий процесса экстракции воскоподобных веществ. Представлены результаты исследования основных свойств полученных восков из отходов – лузги подсолнечника. Показана эффективность их использования в различных отраслях промышленности и стоматологии.

Abstract: In this article, we investigated the processes of production and the use of plant waxes. Properties of the plant waxes were analyzed. We have described basic regularities of wax-like substances extraction process from waste – sunflower husks. We have shown the effectiveness of their use in various industries, and dentistry.

Ключевые слова: лузга подсолнечника, растительные воски, процессы экстракции, повышение эффективности использования.

Keywords: sunflower husks, plant waxes, extraction process, increase of the effectiveness using.

Исследования отечественной селекции подсолнечника, ориентированные на высокую масличность, показали рост доли липидов в лузге (плодовой оболочке) в 10–15 раз по сравнению с семенами старых сортов, изменились также и структурно-механические свойства оболочек подсолнечника, что вызывает определенные технологические осложнения при переработке подсолнечника и получения прозрачного подсолнечного масла в соответствии с требованиями стандарта. С целью расширения рынка сырья для отраслей промышленности и медицины, использующих воски, можно обозначить следующие задачи исследований: анализ рынка сырья восков разного происхождения с учетом спроса, превышающего 1 млн. т/год; интенсификация процессов утилизации отходов масложировой отрасли АПК; постоянный рост цен на аналогичное сырье импортного производства и т.д.

Процесс экстракции из лузги подсолнечника – сложный процесс, который можно представить в виде ряда простых массообменных процессов: диффузия, диализ, растворение, десорбция, осмос и механическое вымывание [1]. Эти процессы протекают одновременно, взаимно влияя друг на друга, и являются составляющими процесса экстракции. Но основным процессом, который обеспечивает извлечения целевых веществ из сырья, можно назвать процесс диффузии, которая, как известно, основан на изменении концентрации целевых веществ в сырье и растворителе, а движущей силой является разность концентраций. Для проведения исследований по извлечению воскоподобных веществ из лузги подсолнечника использовали перколяционный метод, который основывается на свойствах воска растворяться в органических растворителях и образовывать кристаллы при низких плюсовых температурах. Состав полученного воска из усредненной партии лузги подсолнечника [2, 3] анализировали по основным физико-химическим показателям (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики воскоподобного вещества из лужи подсолнечника

Показатель	По литературным данным	Полученный воск
Кислотное число, мг КОН/г	2–17	-
Йодное число, % I ₂	110–124	110
Эфирное число, мг КОН	98–108	100
Температура плавления, °С	65–73	73
Температура кристаллизации, °С	70–74	73
Плотность, г/см ³	0,920–0,960	0,930
Показатель преломления, n_D^{80}	1,4410–1,4500	1,4415

Составной частью процесса экстракции воска из лужи подсолнечника является десорбция, которая происходит в клетках при проникновении экстрагента. Экстрактивные вещества в клетках находятся в адсорбированном состоянии, то есть они прочно связаны силами адсорбции с внутриклеточным содержанием, а экстрагент преодолевает эти силы и десорбирует необходимые вещества. Различают молекулярную и конвективную диффузии, свободную и внутреннюю. Молекулярная диффузия обусловлена хаотическим движением молекул и отличительной особенностью ее является то, что перенос вещества осуществляется в виде молекул, а среды неподвижны относительно друг друга. Скорость молекулярной диффузии обычно определяют уравнением Фика [1]:

$$dM / d\tau = -D \cdot F \cdot dC / dx \quad (1)$$

где $dM / d\tau$ – скорость диффузии, обусловленная массой вещества, перешедшего из одной среды в другую за единицу времени; F – площадь контакта фаз; dC – разница концентраций вещества в средах; dx – изменение толщины диффузионного слоя; D – коэффициент молекулярной диффузии, который можно записать в виде уравнения:

$$D = -(R \cdot T) / N_0 \cdot (1 / 6\pi r \eta) \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; N_0 – число Авогадро; η – вязкость экстрагента; r – радиус частиц (молекул) вещества.

При конвективной диффузии перенос вещества осуществляется не отдельными молекулами, а объемами его раствора. Происходит конвективная диффузия в результате перемещения экстрагента относительно сырья, а скорость ее выражается следующим уравнением:

$$dM / d\tau = -\beta \cdot F \cdot dC / dx \quad (3)$$

где β – коэффициент конвективной диффузии.

В процессе экстракции растительное сырье и экстрагент разделены клеточной перегородкой, которая для свежего сырья имеет пристенный слой протоплазмы и делает оболочку полупроницаемой, то есть она проницаема для экстрагента и непроницаема для веществ, которые содержатся в клетке. Поглощение живой клетки экстрагента представляет собой процесс осмоса и извлечения веществ из клетки при этом не наблюдается. Клетка высушенного сырья вследствие гибели протоплазмы теряет характер полупроницаемой и приобретает свойства пористой перегородки, а характер диффузии через нее – процесс диализа, который в данном случае можно считать также процессом внутренней диффузии, так как она происходит внутри частиц сырья.

Составной частью процесса экстракции является десорбция, которая происходит в клетках при проникновении экстрагента. Экстрактивные вещества в клетках находятся в адсорбированном состоянии, то есть они прочно связаны силами адсорбции с внутриклеточным содержанием, а экстрагент преодолевает эти силы и вещества десорбируются.

Технологические стадии процесса экстракции имеют следующие составляющие: 1. Экстрагент проникает в измельченное сырье и по межклеточных каналах достигает поверхности клетки, а далее через простую клеточную оболочку поступает внутрь клетки. 2. Растворение экстрактивных веществ в экстрагенте внутри клетки после процесса десорбции.

3. За счет разницы концентраций начинается диализ – переход веществ из клетки через клеточную перегородку. 4. В результате диализа на поверхности растительного сырья образуется неподвижный диффузный слой, в котором имеет место молекулярная диффузия. Толщина слоя различна и зависит от скорости движения экстрагента относительно сырья, при этом диффузный слой сопротивляется процессу экстракции веществ вследствие замедления выхода веществ из сырья. 5. экстрактивные вещества, преодолев диффузный слой, распределяются по всему объему экстрагента по законам свободной конвективной диффузии. В этом случае процесс экстракции в целом может быть выражен с помощью уравнения массопроводности:

$$dM = -K \cdot dF \cdot dC / dx \cdot d\tau \quad (4)$$

где K – коэффициент массопроводности, m^2/c ; F – активная поверхность, m^2 ; dC – объемная концентрация целевого вещества в средах, kg/m^3 ; dx – изменение толщины диффузионного слоя, m ; τ – время процесса, c .

Коэффициент массопроводности в данном случае можно представить в следующем виде, объединяющем все виды диффузии:

$$K = 1 / (1 / D_b + 1 / \beta + \sigma / D_c) \quad (5)$$

где D_b – коэффициент внутренней диффузии (диализа); σ – толщина диффузионного слоя, в котором происходит молекулярная диффузия; D_c – коэффициент молекулярной диффузии.

Общие стадии промышленного процесса экстракции подразделяют на: 1) подготовительные; 2) основные – приведение в контакт действующих фаз, организация относительного движения фаз в объеме аппарата; организация перемещения контактирующих фаз вдоль аппарата; выгрузка действующих фаз; первичная обработка экстракта; первичная обработка отработанного сырья; 3) заключительные.

Таким образом можно сделать следующие выводы: исследован общий технологический режим и возможности процесса экстракции воска из лужги подсолнечника; исследованы свойства полученных целевых продуктов и показана возможность применения воскоподобных веществ, взамен используемых в настоящее время в различных отраслях промышленности.

Список литературы

1. *Товажнянский Л.Л., Готлинская А.П. и др.* Процессы и аппараты химической технологии. Учебник. Ч. 2. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – 532 с.
2. *Боровская, Л.В.* Применение природных и синтетических восков в качестве теплоаккумулирующих материалов / *Л.В. Боровская, С.Г. Шабалина, В.Н. Данилин.* – М: Наука и техника, 1996. – 476 с.
3. *Ивановский Л.Е.* Энциклопедия восков. – М. Т. 1, 1956. – 286 с.

УДК 665.637+66.084

**ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАВИТАЦИИ И РЕАГЕНТОВ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ**
**STUDY CAVITATION AND REAGENTS ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF
HIGHLY VISCOUS OIL**

Павел Валерьевич Толмачев*, Олег Михайлович Градов**
Paul Valerevich Tolmachev*, Oleg Mikhailovich Gradov**

**Московский государственный машиностроительный университет, Россия, Москва*

**Moscow State Engineering University, Russia, Moscow*

(e-mail: paik17@ya.ru)

***Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Россия, Москва*

***University of General and inorganic chemistry of them. N. S. Kurnakov of RAS, Russia, Moscow*

(e-mail: omgradov@mail.ru)

Аннотация: В работе экспериментально исследована эффективность воздействия кавитации и химических реагентов на реологические свойства высоковязкой нефти. Наибольшее снижение вязкости нефти удаётся достичь при совместном воздействии кавитации и реагента. Для нефти характерен рост вязкости в течение времени хранения пробы, но эффект комплексного воздействия остаётся более значительным по сравнению с воздействием только реагента.

Abstract: The effectiveness of the impact of cavitation, and chemical agents on the rheological properties of high-viscosity oil is studied experimentally. The largest decrease in the viscosity of the oil is achieved under the combined action of cavitation and reagent. For typical oil the viscosity arises during sample storage time, but the effect of complex influence remains more significant than the impact of only the reagent.

Ключевые слова: высоковязкая нефть, реагент, ультразвук, ультразвуковая обработка, динамическая вязкость, асфальтены, ассоциаты.

Keywords: heavy oil, reagent, ultrasound sonication, dynamic viscosity, asphaltenes associates.

Важнейшей составляющей сырьевой базы нефтяной отрасли не только России, но и ряда других нефтедобывающих стран мира являются запасы тяжелых и битуминозных нефтей. По оценкам специалистов, их мировой суммарный объем оценивается в 810 млрд. тонн, что почти в пять раз превышает объем остаточных извлекаемых запасов нефтей малой и средней вязкости, составляющий лишь 162,3 млрд. тонн [1, 2]. В связи с этим совершенствование технологий добычи тяжелых нефтей приобретает всё большую актуальность.

Все чаще подготовку сырья проводят на основе целенаправленного изменения баланса сил межмолекулярного взаимодействия с целью регулирования степени дисперсности нефтяной системы с использованием физических полей: магнитного, электрического, СВЧ, ультразвукового, вибрационного и др. [3-8]. Существенное снижение вязкости и температуры застывания нефти достигается за счёт синергетического эффекта при комбинированном воздействии: сонохимическом [9-13], термоакустическом [14-15] и кавитационной обработке совместно с химическими реагентами [16-18].

Задача исследования заключалась в экспериментальном исследовании эффективности воздействия кавитации и химических реагентов на реологические свойства высоковязкой нефти.

В качестве объекта исследования выбрана нефть месторождения Восточный Жетыбай физико-химические характеристики и групповой состав которой приведён в табл. 1. В

качестве реагентов в экспериментах применялись ксилол, толуол, бутилацетат,газоконденсат,ксилол.

Таблица 1. Характеристики нефти месторождения Восточный Жетыбай

Плотность при 20°С, кг/м ³		945
Динамическая вязкость при 20°С, мПа·с		575
Содержание, % масс.	асфальтены	3,8
	смолы	19,3
	парафины	28,3

Ультразвуковая обработка (УЗО) нефти проводилась на лабораторной установке, состоящей из преобразователя МСП 2/24 мощностью 2 кВт, соединённого с генератором MUG 2/18-27 мощностью 2 кВт. Упругие колебания вводились в нефть с помощью стержневого волновода с диаметром рабочего торца 28 мм, амплитуда колебаний излучателя составляла 5–15 мкм при частоте 24,3 кГц.

В реактор вносили 200...300 г нефти и обрабатывали ее в течение заданного времени. При комплексном воздействии нефть либо обрабатывали УЗ совместно с химическим реагентом, либо сначала проводили УЗО и затем вносили химический реагент.

Динамическая вязкость нефти определялась на измерителе низкотемпературных показателей нефтепродуктов ИНПН SX-850 с погрешность измерений 2%, являющимся ротационным вискозиметром, работающем при постоянной скорости сдвига 145 с⁻¹.

В работе проведена серия экспериментов, в которой изучалось изменение вязкости нефти от продолжительности и мощности воздействия ультразвука. Результаты экспериментов представлены на рис. 1.

Экспериментальная кривая, представленная на рис.1, позволяет сделать вывод, что рациональный режим снижения вязкости нефти в данном случае может быть достигнут при интенсивности УЗ воздействия порядка 12 Вт/см² при времени обработки 1 мин.

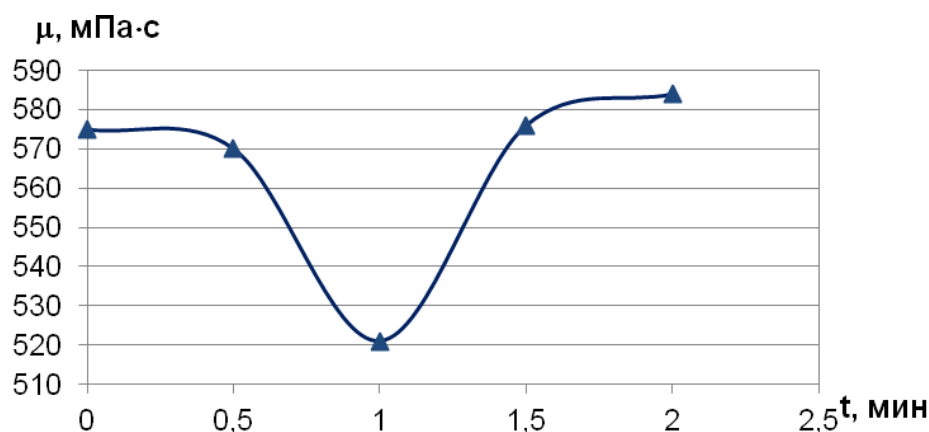


Рисунок. 1. Зависимость динамической вязкости нефти от времени УЗО пробы

В работах [4, 7, 19] показано, что увеличение времени УЗО парафинистой нефти приводит к возрастанию ее структурной вязкость за счёт увеличения степени диспергирования кристаллической фазы парафиновых углеводородов и их взаимодействия с асфальтенами, что приводит к структурированию нефти с переходом в ее связанно-дисперсное состояние.

Результаты экспериментов воздействия различных реагентов на вязкость нефти представлены на рис. 2.

Полученные результаты свидетельствуют, что наиболее эффективными реагентами оказались ксилол и бутилацетат, так введение 2% мас реагентов позволило снизить вязкость нефти на 27% и 23% соответственно. Последующие измерения вязкости в течение 2 суток показали, что изменение вязкости нефти не превышает 6%.

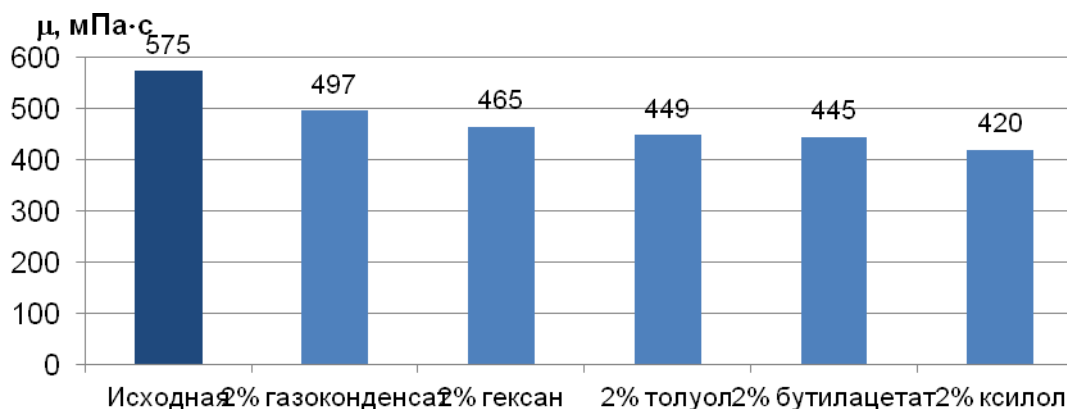


Рисунок 2. Динамическая вязкость нефти при разбавлении реагентами

На рис. 3а и 3б представлены результаты экспериментов совместного воздействия УЗО и химических реагентов на характер изменения динамической вязкости нефти от времени хранения пробы после разбавления 2 % об. реагента и последующего УЗ воздействия.

Эксперименты показали, что введение 2 % об. реагента и последующая УЗО позволило снизить вязкость нефти на 44% при введении ксилола и на 38% при введении бутилацетата. Последующие измерения показали, что для нефти характерен рост вязкости в течение времени хранения пробы, но эффект совместного воздействия на неё реагентом и ультразвуком остаётся более значительным по сравнению с воздействием только реагента, как видно на графиках на рис. 3 а и 3 б.

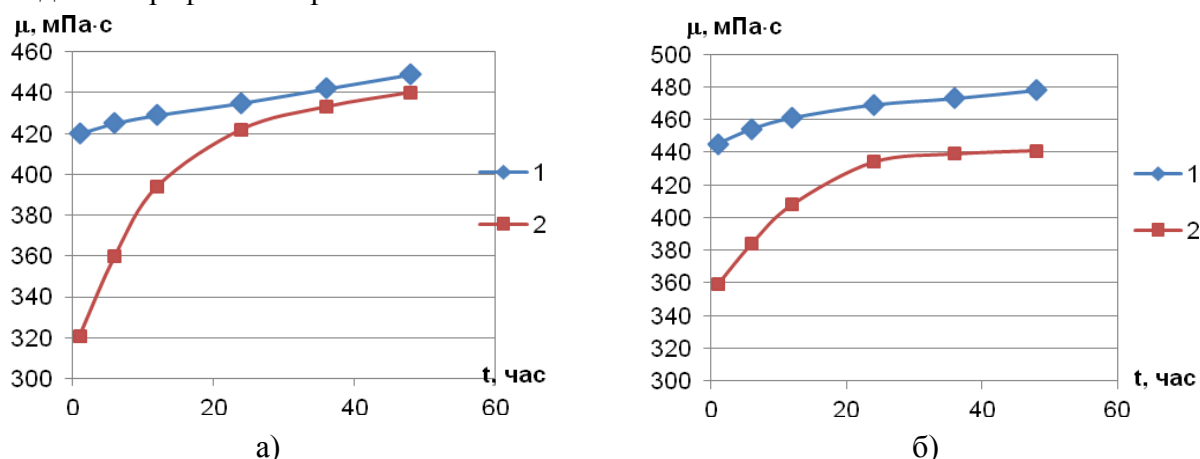


Рисунок 3. Зависимость динамической вязкости нефти от времени хранения пробы:

а) 1 – ксилол (2 % об.); 2 – ксилол (2% об.) + УЗО; б) 1 – бутилацетат (2 % об.); 2 – бутилацетат (2 % об.) + УЗО.

Выводы

1. Наибольшее эффективное снижение вязкости нефти удаётся достичь при совместном воздействии ультразвука и химического реагента при следующих режимных и технологических параметрах: УЗО с интенсивностью 12 Вт/см^2 в течение 60 с и введении 2 % об. ксилола удалось снизить динамическую вязкость на 44%, а при введении 2 % об. бутилацетата на 38%.

2. Эксперименты показали, что нефти свойственно частичное восстановление реологических параметров, в зависимости от вида обработки динамическая вязкость возросла на 25-35% в течение 2 суток.

Список литературы

1. Джавадян А.А. Проблемы разработки месторождений с высоковязкими нефтями и пути их решения // Нефтяное хозяйство. 1998. № 6. С. 12 - 17.

2. Максutow P., Орлов Г., Осипов А. // Освоение запасов высоковязких нефтей в России. Технологии ТЭК. 2005. № 4. С. 32 - 35.
4. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов. Дис. докт. техн. наук. М.: Московский государственный университет инженерной экологии, 2011. 391 с.
5. Лоскутова Ю.В. Влияние магнитного поля на реологические свойства нефтей: Дис. ...канд. хим. наук. Томск, 2003. 144 с.
6. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация добычи и переработки нефти. - М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2014. 168 с.
7. Mullakaev M.S., Volkova G.I., Gradov O.M. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. Vol. 49. No. 3. P. 287 – 296.
8. Волкова Г.И., Прозорова И.В., Ануфриев Р.В., Юдина Н.В., Муллакаев М.С., Абрамов В.О. Ультразвуковая обработка нефтей для улучшения вязкостно-температурных характеристик // Нефтепереработка и нефтехимия. 2012. № 2. С. 3 – 6.
9. Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Волкова Г.И., Прозорова И.В., Юдина Н.В. Исследование влияния ультразвукового воздействия и химических реагентов на реологические свойства вязких нефтей // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2010. № 5. С.31-34
10. Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Градов О.М., Новоторцев В.М., Еременко И.Л. Исследование воздействия ультразвуковой обработки и химических реагентов на реологические свойства нефти Лузановского месторождения // Нефтепереработка и нефтехимия. 2011. № 11. С. 23 - 28.
11. Ершов М.А., Муллакаев М.С., Баранов Д.А. Снижение вязкости нефти с применением ультразвуковой обработки и химических реагентов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2011. № 4. С. 22 - 26.
12. Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Асылбаев Д.Ф., Прачкин В.Г. Исследование комбинированного воздействия ультразвука и химических реагентов на реологические свойства нефти Боровского месторождения // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2013. № 5. С. 34 - 36.
13. Mullakaev M.S., Volkova G.I. Sonochemical technology for reduction on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions // Ultrasonics Sonochemistry. 2016 [in press].
14. Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Салтыков Ю.А., Ануфриев Р.В., Волкова Г.И.. Влияние условий ультразвуковой обработки на свойства парафинистой нефти // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2012. № 6. С. 18 - 21.
15. Mullakaev M.S., Asylbaev D.F., Prachkin V.G., Volkova G.I. Influence of Ultrasound and Heat Treatment on the Rheological Properties of Ust-Tegussskoe Oil // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 49. Issue 9-10, - P. 584-587.
16. Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Баязитов В.М., Баранов Д.А., Новоторцев В.М., Еременко И.Л. Изучение воздействия кавитации на реологические свойства тяжелой нефти // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2011. № 5. С. 24 - 27.
17. Муллакаев М.С., Ершов М.А., Баранов Д.А.. Разработка гидродинамического кавитационного модуля для снижения вязкости нефти // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2012. № 1. С. 17 - 21.
18. Ershov M.A., Baranov D.A., Mullakaev M.S., Abramov V.O. Reducing viscosity of paraffinic oils in ultrasonic field // Chemical and Petroleum Engineering. 2011. Vol. 47. P. 457-461.
19. Тухватуллина А.З. Состав, физико-химические и структурно-реологические свойства нефтей из карбонатных коллекторов. Дис. ... канд. хим. наук. Казань. Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова Казанского научного центра РАН, 2013. 174 с.

УДК 517.968

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В
КОЖУХОТРУБНОМ РЕАКТОРЕ
THE RESEARCH OF RESONANCE FILM FLOW OF LIQUID IN THE TUBE BUNDLE
REACTOR**

**Артем Валерьевич Маринин
Artyom V. Marinin**

*Волгоградский государственный технический университет, Россия, Волгоград
Volgograd state technical University, Russia, Volgograd
(e-mail: marinin_artem@list.ru)*

Аннотация: Исследовано резонансное пленочное течение жидкости в кожухотрубном реакторе, позволяющую повысить эффективность теплообмена на границе поверхности пленки жидкости и газе и теплопереноса между пленкой жидкости и внутренней поверхности труб за счет вибрации пленки жидкости относительно газа и внутренней стенки труб.

Abstract: The resonance of fluid film flow in a tube bundle reactor is researched, allowing to improve the efficiency of in the apparatus at the boundary surface and the liquid film heat transfer between the gas and the liquid film and the inner surface of the pipe due to the vibration of the liquid film with respect to the gas pipe and the inner wall.

Ключевые слова: теплообмен, пленочное течение, кожухотрубный реактор.
Keywords: heat exchange/mass transfer, film flow, tube bundle reactor.

Пленочные трубчатые аппараты широко применяются в процессах, предназначенных для осуществления межфазного контакта в системе «газ-жидкость», когда объемное соотношение расходов газа и жидкости очень велико.

При таком соотношении равномерное распределение газа и жидкости по сечению аппарата может быть обеспечено только за счет пленочного течения жидкой фазы.

Необходимо отметить, что до сих пор не был разработан универсальный аппарат со стекающей пленкой, у которого была бы не столь металлоемкая конструкция с неустойчивым пленочным течением.

Объектом исследования данной работы является исследование резонансного пленочного течения жидкости в кожухотрубном реакторе. Опытным путем была разработана конструкция кожухотрубного реактора, в которой обеспечивается турбулизация потока реакционного газа в трубах, выравнивание профиля скоростей газа по сечению труб и времени их пребывания в реакторе.

В предлагаемой конструкции кожухотрубного реактора устанавливаются цилиндрические пружины внутри каждой трубы и жестко закрепляются на верхнем торце трубы. На нижнем конце трубы жестко соединены с распределительными устройствами. Распределительные устройства выполнены в виде конической крышки и установлены осесимметрично с ней, причем вершина конуса направлена на вход в трубу реакционной массы.

Выполнение отношения наружного диаметра пружины и внутреннего диаметра трубы, подчиняющееся условию (1)

$$d / D = 0,7 \div 0,75 \quad (1)$$

где d и D – соответственно наружный диаметр пружины и внутренний диаметр трубы, м.

Это позволяет равномерно передавать колебания пружины в ядро потока газа и на периферию к стенке, так как в этом случае площади сечения, заключенные внутри цилиндрической пружины и кольцевого сечения между внутренней стенки трубы будут

равны и энергия вибрации пружины одинаково расходуется на колебания газового потока, движущегося внутри и снаружи витков цилиндрической пружины. Это усиливает все вышеназванные положительные эффекты, связанные с установкой цилиндрической пружины внутри каждой трубы.

Под конической крышкой закреплен груз, масса которого определяется по формуле

$$m = K \left(\frac{l}{\pi \cdot c} \right)^2 - M, \quad (2)$$

где m – масса груза; M – масса конической крышки, кг; K – жесткость пружины, Н/м; l – длина труб, м; c – скорость звука, м/с. На витках цилиндрической пружины равномерно по ее высоте и диаметру жестко закреплены лопатки.

Закрепление груза с массой m позволяет создать пружинный маятник, каким становится цилиндрическая пружина с конической крышкой и с грузом, частота колебания которого становится равной собственной частоте колебаний реакционного газа в трубе.

Известно, что собственная частота колебаний газа в цилиндрической трубе определяется по уравнению

$$f = \frac{\sqrt{\frac{K}{m}}}{2\pi} \quad (3)$$

а частота колебаний пружинного маятника

$$f_M = \frac{\sqrt{\frac{K}{M+m}}}{2\pi}. \quad (4)$$

Из совместного решения уравнений (3) и (4) получаем условие (2), при выполнении которого наступает режим резонансных колебаний пружины с конической крышкой и грузом и собственной частоты колебаний газовой реакционной массы в каждой трубе.

Это приводит к резкому повышению амплитуды колебаний цилиндрической пружины и реакционных газов, турбулизации газового потока в каждой трубе, выравнивание профиля скорости и времени пребывания, профиля температуры по сечению трубы, что предотвращает термическую деструкцию реакционных газов и продуктов реакции, увеличивает степень конверсии и качество продуктов реакции.

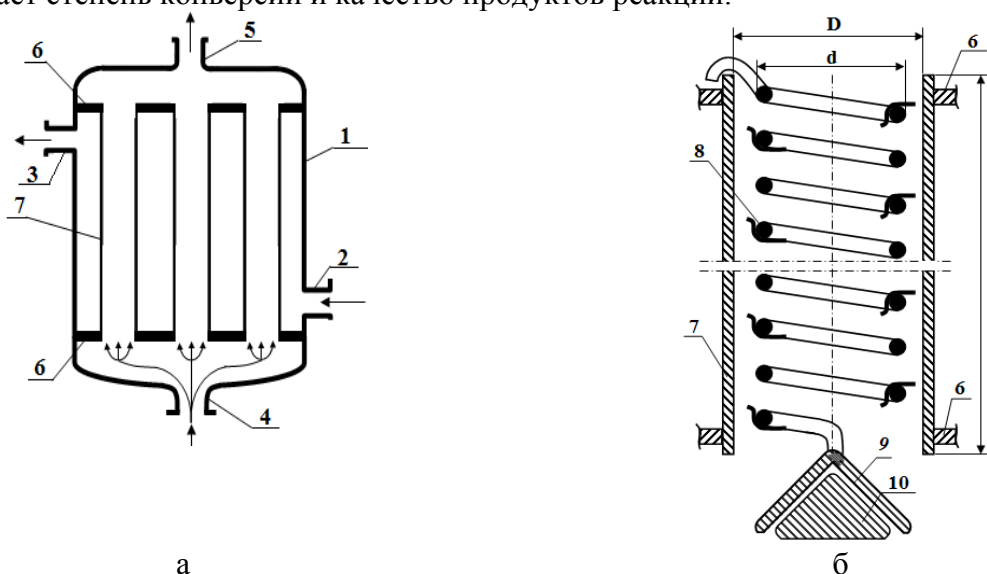


Рис. 1 – Кожухотрубный реактор. а – общий вид кожухотрубного реактора в разрезе, б – одна труба с цилиндрической пружиной, коническим пустотелым конусом, грузом и лопатками на витках цилиндрической пружины

1 – корпус; 2,3 – патрубки входа и выхода теплоносителя, 4,5 – патрубки входа и выхода реакционной массы, 6 – трубные решетки, 7 – трубы, 8 – цилиндрическая пружина, 9 – коническая крышка, 10 – груз

Кроме того, равномерное по высоте и диаметру жесткое закрепление лопаток на витках цилиндрической пружины позволяет при резонансных ее колебаниях с высокой амплитудой увеличить турбулизацию газовой реакционной массы, что также способствует повышению эффективности протекания вышеназванных гидродинамических, массо- и теплообменных и реакторных процессов.

Кожухотрубный реактор (рис. 1) работает следующим образом. Газовую реакционную массу подают по патрубку 4 и в трубу 7, которая выходит через патрубок 5 в виде продуктов реакции. Теплоноситель подают по патрубку 2 в межтрубное пространство и выводят из корпуса 1 по патрубку 3. Поток газа в трубе 7 имеет собственную частоту колебаний, соответствующую уравнению (3). Цилиндрическая пружина 8 с конической крышкой 9 и грузом 10 образуют пружинный маятник, частота колебаний которого подчиняется уравнению (4). Так как масса конической крышки 9 с жестко закрепленным на ней грузом 10 подчиняется условию 2, то частота колебаний цилиндрической пружины 8 с конической крышкой 9 и грузом 10 равна собственной частоте газовой реакционной массы в трубе 7, что приводит к резкому возрастанию амплитуды колебаний витков цилиндрической пружины 8 и молекул газовой реакционной массы, турбулизации их движения в трубах 7, которая выравнивает профиль скорости и время пребывания реакционной массы в трубах 7, предотвращает термическую деструкцию реакционной массы и продуктов реакции, увеличивает степень конверсии и качество продуктов реакции на выходе из реактора. Кроме того, при выполнении условия (1) для отношения наружного диаметра d цилиндрической пружины 8 и внутреннего диаметра D трубы 7 энергия колеблющейся в резонансном режиме с высокой амплитудой цилиндрической пружины 8 равномерно передается по всему объему реакционной массы, так как ее объем внутри цилиндрической пружины 8 равен ее объему, находящемуся между стенкой трубы 7 и витками пружины 8 [1-3].

В лабораторных условиях проведены экспериментальные исследования резонансного пленочного течения жидкости в кожухотрубном реакторе. Изучение резонансного эффекта проводилось на установке кафедры «ПАХП» Волгоградского государственного технического университета. Был исследован резонансный эффект пленочного течения при разных цилиндрических пружинах.

В лабораторных условиях была разработана экспериментальная установка, которая позволяет исследовать пленочное течение жидкости, а также создать в лабораторных условиях пружинный маятник в условиях противоточного движения воздушно-водяного потока. Установка доступна для визуального наблюдения, развития гидроаэродинамических режимов движения воды и воздуха, определения гидравлического сопротивления, глубины охлаждения воды и коэффициентов тепло- и массообмена.

На рис. 2 приведена схема, поясняющая устройство и принцип работы установки для проведения указанного комплекса экспериментальных исследований.

Установка состоит из корпуса колонны 1 в котором размещается цилиндрическая пружина с заданной жесткостью 3, верхний конец которой жестко закреплен на верхнем торце корпуса колонны. На нижнем конце цилиндрической пружины жестко закреплен груз 2, заранее рассчитанный из условия жесткости цилиндрической пружины. С помощью распределителя 5, цилиндрическая пружина с грузом противотоком продувается воздушным потоком, поступающим из центробежного вентилятора 4. Стенки корпуса выполнены плоскими и прозрачными, что позволяет без искажения наблюдать и фиксировать с помощью скоростной видеокамеры работу пружинного маятника в различных гидродинамических режимах. Визуальная доступность данной установки позволяет исследовать резонансный режим цилиндрической пружины с грузом.

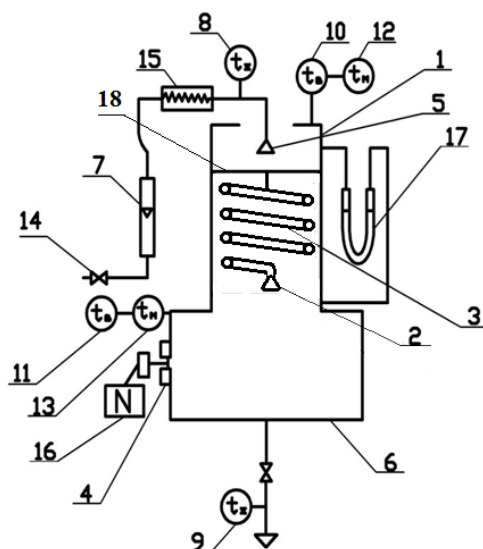


Рис. 2 – Схема экспериментальной установки.

- 1 – корпус колонны; 2 – груз; 3 – цилиндрическая пружина; 4 – центробежный вентилятор;
 5 – распределитель; 6 – водосборная емкость; 7 – ротаметр;
 8, 9, 10, 11 – температурные датчики; 12, 13 – гигрометры; 14 – вентиль;
 15 – водонагреватель; 16 – лабораторный автотрансформатор; 17 – дифманометр,
 18 – опорная решетка

В установке реализована картриджная система сменных колонн, позволяющая осуществлять быструю смену цилиндрических пружин и обеспечивающая воспроизводимость измеряемых параметров в повторных экспериментах. Картридж представляет собой прозрачный цилиндр, помещаемый в корпус колонны 1, с опорной решеткой 18, на которой жестко закреплена цилиндрическая пружина.

Также были проведены расчеты цилиндрических пружин. Жесткости пружин рассчитывались по следующей формуле:

$$K = \frac{m \cdot g}{l}.$$

Соответственно, жесткость первой и второй пружины получились равными:

$$K_1 = \frac{m \cdot g}{l} = \frac{1,245 \cdot 9,81}{0,181} = 67,5 \frac{H}{м},$$

$$K_2 = \frac{m \cdot g}{l} = \frac{2,113 \cdot 9,81}{0,001} = 20279 \frac{H}{м}.$$

Далее приведен пример расчета кожухотрубного реактора с цилиндрической пружиной.

Труба 7 кожухотрубного реактора имеет внутренний диаметр $D = 0,076$ м и длину $l = 5$ м. Внутри реактора осесимметрично с ней установлена цилиндрическая пружина 8 с наружным диаметром $d = 0,054$ м, так что отношение $d/D = 0,71$, то есть соответствует условию (1) в формуле полезной модели. Масса пустотелой конической крышки 9 $M = 0,15$ кг, а жесткость пружины $K = 3 \cdot 10^4$ Н/м. Основой газовой реакционной массой является воздух. Скорость звука воздуха $c \approx 330$ м/с, тогда собственная частота колебаний молекул воздуха в трубе 7 согласно уравнению (3) составит

$$\varphi_{\Gamma} = 330 / 2 \cdot 5 = 33 \text{ Гц}.$$

Определим массу конической крышки 9 по уравнению (2)

$$m = \left(\frac{5}{3,14 \cdot 330} \right)^2 - M;$$

$$M = 3 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{5}{3,14 \cdot 330} \right)^2 - 0,15 = 0,55 \text{ кг}.$$

При массе конической крышки 9 с грузом 10 частота колебаний пружинного маятника, который они образуют с цилиндрической пружиной 8, имеющей жесткость $K = 3 \cdot 10^4$ Н/м, составит согласно уравнению (4)

$$f_M = \frac{\sqrt{3 \cdot 10^4}}{6,28} \approx 33 \text{ Гц,}$$

то есть частоты колебаний $f_T = f_M$ и цилиндрическая пружина 8 будет вместе с крышкой 9 и грузом 10 совершать продольные колебания в резонансном режиме с реакционным газом с высокой амплитудой, что турбулизирует поток газа, увеличивает степень конверсии и качество продуктов, а лопатки 11 дополнительно турбулизируют и перемешивают поток газа.

Список литературы

1. *Войнов Н.А.* Пленочные трубчатые газо-жидкостные реакторы (гидродинамика, тепло и массообмен) : монография / Н.А. Войнов, Н.А. Николаев. – Казань, 2008. – 272 с.
2. *Лаптев, А. Г.* Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов : учеб. пособие / А. Г. Лаптев, Н. А. Николаев, М. М. Башаров. – Москва : Теплотехник, 2011. – 355 с.
3. *Касаткин, А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник / А. Г. Касаткин. – 14-е изд., стереотипное. – Москва : ООО ИД «Альянс», 2008. – 753 с.

УДК 536.23.41

КОЭФФИЦИЕНТ МАССООТДАЧИ ИРИДИЕВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ГРАНУЛИРОВАННОЙ ПОРИСТОЙ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ THE MASS-TRANSFER COEFFICIENT OF IRIIDIUM CATALYSTS BASED ON GRANULAR POROUS ALUMINA

Махмадали Махмадиевич Сафаров*, Сунатулло Сабзаалиевич Абдуназаров
Mahmadali M. Safarov*, Sunatullo S. Abdunazarov****

**Филиал НИУ “МЭИ” в г. Душанбе, Таджикистан, Душанбе*

**Branche of National research University “MPEI” in Dushanbe, Tajikistan, Dushanbe
(e-mail: mahmad1@list.ru)*

***Энергетический Институт Таджикистана в г.Курган-тюбе, Таджикистан*

***Energy Institute of Tajikistan in Kurgan-Tyube, Tajikistan, Dushanbe
(e-mail: Sunnat8060@mail.ru)*

Аннотация: В работе приводятся результаты экспериментального исследования коэффициента массоотдачи иридиевых катализаторов при температуре 293К и давлении 0,101МПа. Используя закон соответственных состояний и экспериментальных данных получено эмпирическое уравнение, позволяющее рассчитать коэффициент массоотдачи неисследованных систем.

Abstract: The paper presents the results of experimental study of the mass-transfer coefficient of the iridium catalyst at a temperature of 293 K and pressure 0,101 MPa. Using the law of corresponding States and the experimental data obtained an empirical equation that allows to calculate the mass-transfer coefficient of unexplored systems.

Ключевые слова: коэффициент массоотдачи, вода, иридиевый катализатор, удельная поверхность, суммарный объем пор, адсорбционный метод, время.

Key words: coefficient of mass impact, water, iridium catalyst, the specific surface area, total pore volume, adsorption method, time.

Теплообменные аппараты, предназначенные для конденсации пара, широко используются в различных отраслях промышленности (химических, энергетических,

теплоэнергетических, и др.). Актуальной является задача уменьшения их габаритов и металлоемкости, в связи с чем применяются различные способы интенсификации теплообмена при конденсации, например, увеличение скорости пара или оребрение поверхности теплообмена. Весьма эффективным является такой способ интенсификации теплообмена, как переход от пленочного режима конденсации к капельному, что обычно осуществляется путем применения не смачиваемых конденсатом (для конденсации водяного пара гидрофобных) поверхностей теплообмена. В научной литературе время от времени появляются сообщения об успешном применении в лабораторных условиях того или иного способа сожжения гидрофобных и супергидрофобных поверхностей, в последнее время – с применением нано технологий.

Общим методом приготовления исследуемых в настоящей работе катализаторов нанесённого типа (независимо от природы металла) является одно– или многократная пропитка пористых носителей водным раствором солей, содержащих активный компонент – металл. Пропитанные носители термообработывают на воздухе или в среде инертного газа с целью разложения нанесенных солей и подвергают термообработке в водороде, в процессе которой разложенные соли восстанавливаются до металлов [1]. Конечные температуры разложения и восстановления нанесенных солей обычно составляют 523–773К, заключительной стадией приготовления катализаторов является пассивация восстановленного катализатора при температуре от 323 К до комнатного азота, содержащим не более 1% объемного кислорода. Стадия пассивации необходима для удаления с поверхности металла адсорбированного водорода и предотвращения неуправляемого процесса его окисления при выгрузке из реактора восстановления на воздухе.

Иридиевые катализаторы представляют собой диспергированный иридий, распределенный на поверхности носителей СНД, СНГ – 2 или НА – 1. Катализаторы, в основном, повторяют пористую структуру носителей за исключением области микропор, в которой распределяется иридий [3].

Механическая прочность катализаторов также определяется прочностью носителя. Иридиевые катализаторы обладают наивысшей каталитической активностью в реакции разложения гидразина и используются в каталитических реакторах различных двигателей и газогенераторах в РТ.

На основе иридия как активного компонента в НПО ГИПХ разработаны катализаторы марок К – 201 (30% мас. иридия), К – 210 (10% масс. иридия) на носителе НА – 1 и К – 201 м (30% масс. иридия), на носителе СНГ – 2 [3].

Для определения коэффициента массоотдачи нужно знать массу засыпки в сухом состоянии и в среде увлажнения. Для определения значения массы зернистых материалов в парах воды и после, каждые 30 минут взвешиваем массу с помощью весов и измеряем их массы.

Коэффициент массоотдачи определяем по формуле [2]:

$$\beta_{\text{Э}} = \frac{\Delta m}{t}, \quad (1)$$

где, $\Delta m = m_2 - m_1$ – изменение увеличивающейся массу относительно начальной, гр; m_2 – изменение масса в период времени, гр; m_1 – начальная масса, гр; t – время.

С помощью уравнения (1) находим коэффициент масоотдачи и их значение ставим в таблице 1.

Таблица 1. Опытные данные для расчета коэффициента массоотдачи при различных время увлажнения.

t, час	m ₁ , гр	m ₂ , гр				Δm = m ₂ – m ₁				β = Δm/t * 10 ⁻⁶ гр/с			
		Al ₂ O ₃ + 10% Ir	Al ₂ O ₃ + 15% Ir	Al ₂ O ₃ + 30% Ir	Al ₂ O ₃ + 33% Ir	Al ₂ O ₃ + 10% Ir	Al ₂ O ₃ + 15% Ir	Al ₂ O ₃ + 30% Ir	Al ₂ O ₃ + 33% Ir	Al ₂ O ₃ + 10% Ir	Al ₂ O ₃ + 15% Ir	Al ₂ O ₃ + 30% Ir	Al ₂ O ₃ + 33% Ir
0,5	0,5	0,515	0,513	0,511	0,51	0,015	0,013	0,011	0,01	8,3	7,2	6,1	5,5
1	0,5	0,523	0,52	0,518	0,516	0,023	0,02	0,018	0,016	6,3	5,5	5	4,4
1,5	0,5	0,531	0,527	0,524	0,522	0,031	0,027	0,024	0,022	5,7	5	4,4	4
2	0,5	0,538	0,533	0,53	0,527	0,038	0,033	0,03	0,027	5,2	4,5	4,1	3,7
2,5	0,5	0,544	0,538	0,535	0,531	0,044	0,038	0,035	0,031	4,8	4,2	3,8	3,4
3	0,5	0,549	0,543	0,539	0,535	0,049	0,043	0,039	0,035	4,5	3,9	3,6	3,2
3,5	0,5	0,553	0,547	0,543	0,539	0,053	0,047	0,043	0,039	4,2	3,7	3,4	3
4	0,5	0,556	0,551	0,547	0,542	0,056	0,051	0,047	0,042	3,8	3,5	3,2	2,9
4,5	0,5	0,559	0,555	0,55	0,545	0,059	0,055	0,05	0,045	3,6	3,3	3	2,7
5	0,5	0,561	0,557	0,553	0,548	0,061	0,057	0,053	0,048	3,3	3,1	2,9	2,6
5,5	0,5	0,563	0,559	0,555	0,55	0,063	0,059	0,055	0,05	3,1	2,9	2,7	2,5
6	0,5	0,565	0,561	0,556	0,551	0,065	0,061	0,056	0,051	3	2,8	2,5	2,3
6,5	0,5	0,566	0,562	0,557	0,551	0,066	0,062	0,057	0,051	2,8	2,6	2,4	2,1
7	0,5	0,567	0,562	0,557	0,551	0,067	0,062	0,057	0,051	2,6	2,4	2,2	2

Как видно, из таблиц 1 коэффициент массоотдачи изменяет каждые пол часа т. е. уменьшается. Используя таблицу 1 построим график зависимости коэффициент массоотдача β от времени t.

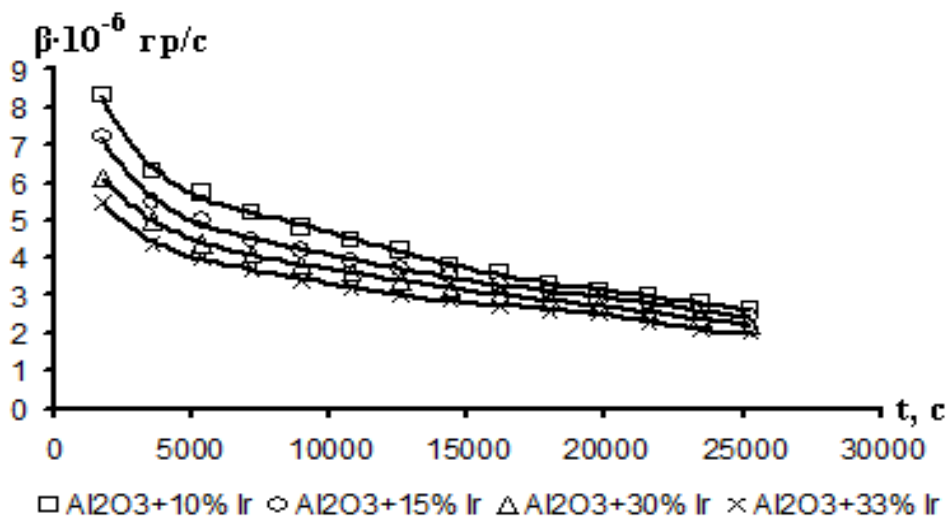


Рисунок 1. Зависимости коэффициента массоотдачи (β) от время (t).

Причины такого изменения формы графика зависит от изменения масс в среде увлажнения и течение времени. При увеличении количества времени коэффициент адсорбции медленно уменьшается.

При этом коэффициент массоотдачи уменьшается. Коэффициент массоотдачи связан с концентрацией нано наполнителя т. е. чем меньше концентрации нанонаполнителя, тем выше коэффициент массоотдачи (рисунок 1). Соответственно таблицу 1 для получения эмпирического уравнения нужно обобщить и обработать экспериментальные данные исследуемых объектов. Для обобщения экспериментальных данных используем следующее выражение [3-5]:

$$\beta/\beta_1=f(t/t_1), \quad (2)$$

где, β, β_1 – коэффициент массоотдачи образцов при различном времени t и t_1 : $t_1=3,75$ ч.

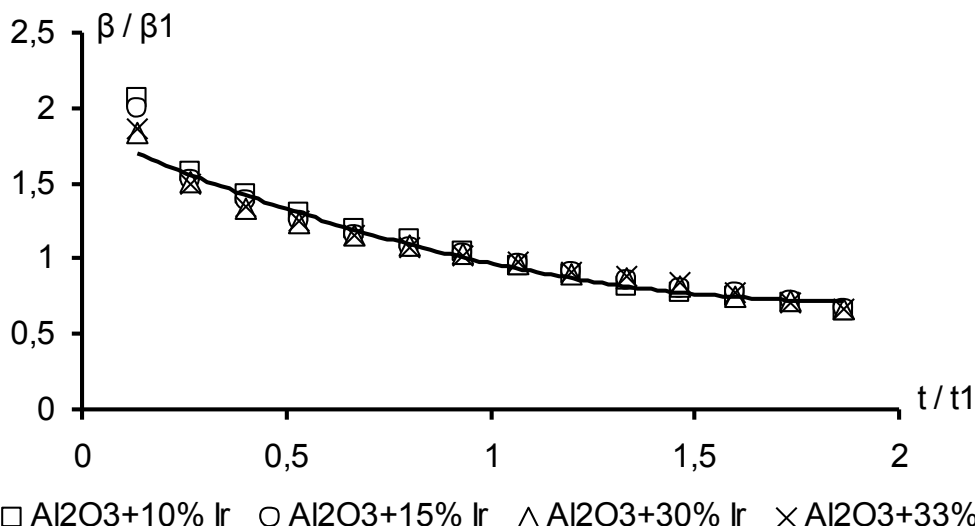


Рис. 2. Зависимость относительной коэффициент массоотдачи (β/β_1) от относительной времени (t/t_1).

Как видно, из рисунка 2., все экспериментальные данные вложатся вдоль общей кривой, которые описывается выражением[3-5]:

$$\beta_{\text{выч}} = (0,349 \left(\frac{t}{t_1}\right)^2 - 1,2798 \left(\frac{t}{t_1}\right) + 1,8982) \cdot \beta_1. \quad (3)$$

где β_1 – средняя значения коэффициент массоотдачи, г/с при t_1 ; t – время, с.

Анализ значение коэффициента массоотдачи β_1 показало, что они зависят от концентрации наноиридий n (таблица 3).

Таблица 3. Зависимости (β_1) от концентрация (n) иридий

β_1	$n, \%$			
	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{ Ir}$
	4	3,6	3,3	2,95

Используя значение таблицы 3., построим график зависимости $\beta_1 = f(n)$ (рисунок 3).

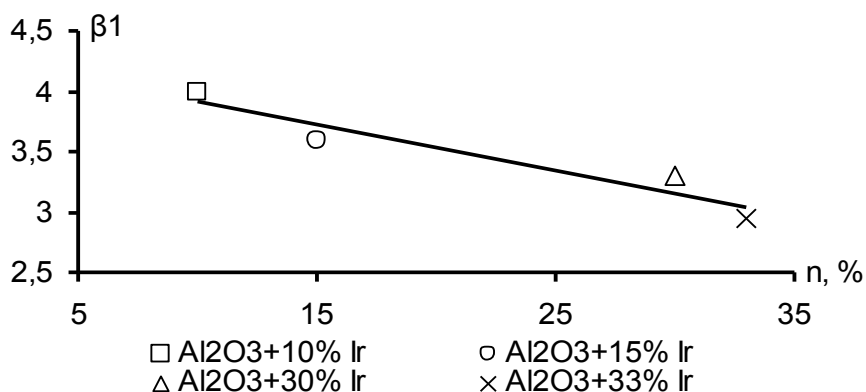


Рисунок 3. Зависимость β_1 от концентрации нано иридий (n_{Ir}).

Уравнение прямой линии на рисунке 3, имеет вид:

$$\beta_1 = -0,038 \cdot n + 4,2977 \quad (4)$$

где, n – концентрации наполнителя т. е. иридий, %.

Уравнению (3) с учетом (4) получим:

$$\beta_{\text{выч}} = (0,349 \left(\frac{t}{t_1}\right)^2 - 1,2798 \left(\frac{t}{t_1}\right) + 1,8982) \cdot (-0,038 \cdot n + 4,2977) \quad (5)$$

Например: для $\text{Al}_2\text{O}_3+10\% \text{ Ir}$ определение вычисленного коэффициента массоотдачи в течение 30 минут:

$$\beta_{\text{выч}} = (0,349 \cdot (0,142)^2 - 1,2798 \cdot 0,142 + 1,8982) \cdot (-0,038 \cdot 10 + 4,2977) = 6,78 \cdot 10^6 \text{ г/с.}$$

Результаты вычисленного значения $\beta_{\text{выч}}$ для исследуемых объектов представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты сопоставления коэффициентов массоотдачи β_3 и $\beta_{\text{выч}}$.

β_3				$\beta_{\text{выч}}$				$\Delta, \%$			
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{Ir}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 33\% \text{Ir}$
8,3	7,2	6,1	5,5	6,78	6,45	5,46	5,2	18	10,4	10,5	5,45
6,3	5,5	5	4,4	6,17	5,87	4,97	4,74	2	-6,7	0,6	-7,7
5,7	5	4,4	4	5,63	5,35	4,53	4,32	1,22	-7	-2,95	-8
5,2	4,5	4,1	3,7	5,14	4,89	4,14	3,94	1,15	-8,66	-0,97	-6,48
4,8	4,2	3,8	3,4	4,7	4,46	3,78	3,6	2,08	-6,19	0,52	-5,88
4,5	3,9	3,6	3,2	4,289	4	3,45	3,29	4,68	-2,56	4,16	-2,8
4,2	3,7	3,4	3	3,94	3,74	3,17	3,02	6,19	-1,08	6,76	-0,66
3,8	3,5	3,2	2,9	3,63	3,46	2,93	2,79	4,47	1,14	8,4	3,8
3,6	3,3	3	2,7	3,38	3,2	2,72	2,595	6,11	3,03	9,33	3,88
3,3	3,1	2,9	2,6	3,2	3,02	2,55	2,43	3	2,58	12	6,5
3,1	2,9	2,7	2,5	3,02	2,87	2,43	2,3	2,58	1,03	10	8
3	2,8	2,5	2,3	2,89	2,75	2,33	2,22	3,66	1,78	6,8	3,47
2,8	2,6	2,4	2,1	2,84	2,7	2,29	2,18	-1,428	-3,84	4,58	-3,8
2,6	2,4	2,2	2	2,83	2,697	2,28	2,175	-8,8	-12	-3,63	-8,75

Используя значения таблицы 4 определим погрешность вычисления коэффициента массоотдачи между экспериментом и расчетными β_3 , $\beta_{\text{выч}}$ по формуле:

$$\Delta = \frac{\beta_3 - \beta_{\text{выч}}}{\beta_3} 100\% \quad (6)$$

Список литературы

1. Мухленов, И.П. Технология катализаторов. / И. П. Мухленов, Е. И. Дробкина, В. И. Дерюкина, В. Е. Солоко. //Л. : Химия, 1979 -325 с.
2. Хушвахтов, А.А. Повышение рабочего ресурса агрегатов пароводяного тракта ТЭС путем воздушной консервации с использованием силикагеля. / Алишер Асанович Хушвахтов.// Автореф.дисс..... к. т. н., Томск, 2014 – 21 с.
3. Сафаров, М.М. Теплофизические свойства окиси алюминия с металлическими наполнителями в различных газовых средах. Дис. на.... к.т.наук, Душанбе - 1986. С.156.
4. Сафаров, М.М., Мирзомамадов 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.
5. Сафаров, М.М., Мирзомамадов А.Г., Абдуназаров С.С., Зарипова М.А., Назруллоев А.С., Неъматов А. Адсорбционные и теплофизические свойства наноструктурной пористой гранулированной окиси алюминия с различными фракциями. Сборник материалов. Международная научно-практическая конференция, посвященная 1150-летию персидско-таджикского учёного-энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абу Бакра Мухаммада ибн Закария Рази. Институт химии имени В.И. Никитина АН РТ, 2015, С.125-128.

УДК 663.4.083

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧЕНОЧНОГО
ПАШТЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАРОСТАТИЧЕСКОЙ
И БАРОЦИКЛИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИЙ**
**COMPARATIVE EVALUATION OF PRODUCTION PROCESS OF LIVER PATE USING
BAROSTATIC AND BAROCYCLIC TECHNOLOGY**

Сергей Анатольевич Соколов, Николай Николаевич Севаторов
Sergei A. Sokolov, Nikolay N. Sevatorov

*Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского», Донецк*
*Donetsk National University of Economics and Trade named
after Mikhaylo Tugan-Baranovsky, Donetsk*
(e-mail: sokoloff1906@mail.ru)

Аннотация: представлены результаты экспериментальных исследований процесса производства печеночного паштета с использованием высокого статического и циклического давлений

Abstract: The paper presents the results of experimental studies of the process of production of liver pate with high static and cyclic pressure.

Ключевые слова: высокое давление, бароциклическая обработка, печеночный паштет.

Keywords: high pressure, barocyclic treatment, liver pate.

В последние годы в области производства и переработки продовольствия предложен качественно новый путь сохранения пищевых продуктов, а также получения новых продуктов, заключающийся в применении высокого давления (ВД).

Анализ информационных источников по данной тематике позволяет сделать выводы о том, что ВД является одним из перспективных методов обработки пищевого сырья, практически исключая потерю питательных компонентов и экстрактивных веществ, которые наблюдаются при практически любом традиционном тепловом воздействии, оказывает бактериостатическое и бактерицидное действие на жизнедеятельность микроорганизмов, кроме этого отмечается, что обработанные давлением продукты имеют специфические вкусоароматические свойства, существенно отличающиеся от органолептики изделий, изготовленных с применением традиционных способов.

Ранее нами были проведены исследования процесса производства печеночного паштета с использованием высокого давления и разработан атермический способ производства печеночного паштета с использованием высокого гидростатического давления (ВГД) [1].

Теоретическими и экспериментальными исследованиями была установлена возможность применения ВГД для производства паштетов атермическим способом. Экспериментальными исследованиями установлены рациональные параметры процесса атермического способа производства паштетов с помощью ВГД: величина давления - 600 МПа, продолжительность процесса - 20 мин.

Известно, что повышение значения режимных параметров любого технологического процесса приводит к увеличению энергозатрат. Использование более высоких давлений также сопряжено с дополнительными затратами энергии, в этой связи безусловно важным является снижение предельного давления при минимальной продолжительности процесса и достижения требуемого эффекта. Анализ литературных данных показал, что применение бароциклической обработки пищевых продуктов позволяет снизить величину давления с сохранением качественных показателей продукта [2].

Целью данной работы была сравнительная оценка атермического процесса производства печеночного паштета с использованием высокого гидростатического давления и бароциклической обработки.

Обработка образцов сырого паштетного фарша проводилась на лабораторной установке второго поколения, разработанной и созданной на базе лаборатории «Использование высокого давления в пищевых технологиях» ДонНУЭТ [3]. Параметры обработки ВГД и бароциклической обработки приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры обработки печеночного паштета

№ образца	Давление, МПа	Время выдержки, мин
Баростатический режим		
1	600	20
Бароциклический режим		
2	0,1-100-0,1-100-0,1-100-0,1	5-1-5-1-5
3	0,1-200-0,1-200-0,1-200-0,1	5-1-5-1-5
4	0,1-300-0,1-300-0,1-300-0,1	5-1-5-1-5
5	0,1-400-0,1-400-0,1-400-0,1	5-1-5-1-5
6	0,1-500-0,1-500-0,1-500-0,1	5-1-5-1-5
7	0,1-600-0,1-600-0,1-600-0,1	5-1-5-1-5

Известно, что для обеспечения кулинарной готовности продукта необходимо достижение его микробиологического благополучия и инактивации фермента кислой фосфатазы [4]. Исходя из этого, в обработанных образцах контролировались микробиологические показатели, каталитическая активность кислой фосфатазы, а также органолептические показатели.

Результаты экспериментальных исследований мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов в печеночном паштете, обработанном высоким статическим и циклическим давлением, выражены количеством колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 см³ продукта и представлены на рисунке 1.

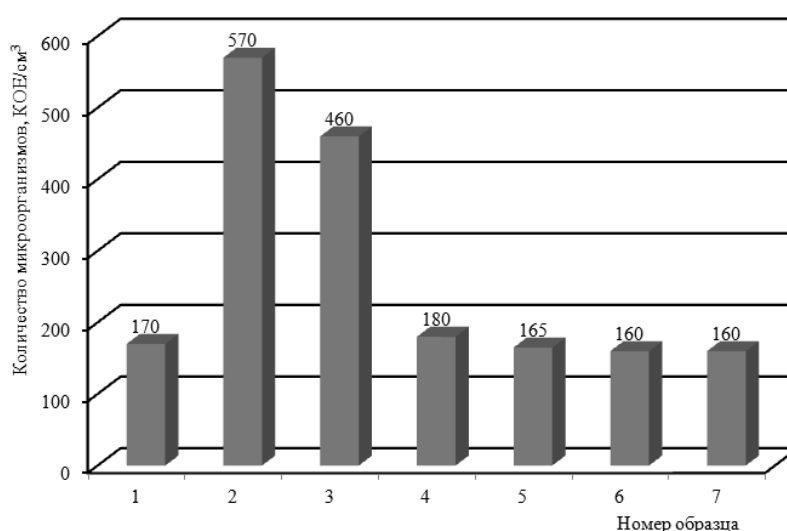


Рис. 1. Микробиологические показатели печеночного паштета, обработанного высоким статическим и циклическим давлениями

Методика определения остаточной активности кислой фосфатазы основана на фотометрическом определении в продукте интенсивности развивающейся окраски, зависящей от остаточной активности кислой фосфатазы, выраженной массовой долей фенола. Результаты данных исследований представлены на рисунке 2.

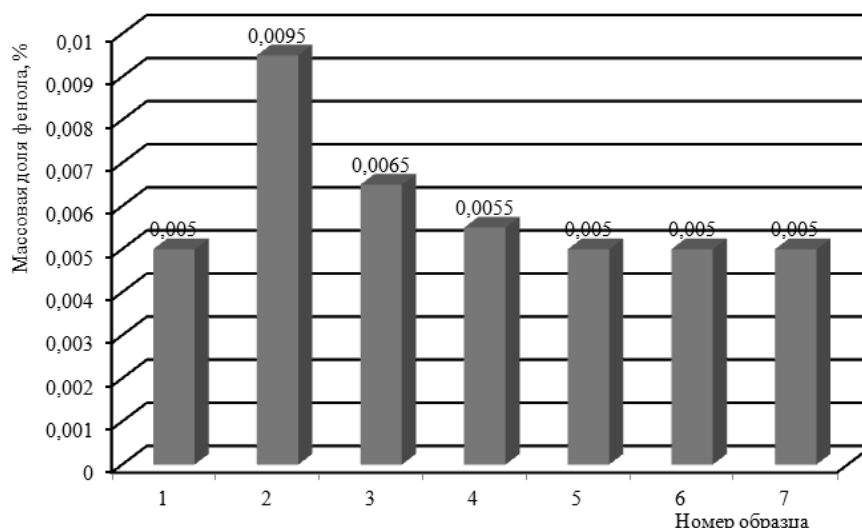


Рис. 2. Массовая доля фенола в печеночном паштете, обработанном высоким статическим и циклическим давлениями

При изучении органолептических характеристик паштет обрабатывали давлением 600 МПа (образец №1) в статическом режиме и давлениями 400 и 500 МПа (образцы №4 и №5) в циклическом режиме нагружения.

Для органолептической оценки полученного паштета была проведена экспертиза с привлечением экспертной группы в составе 10 дегустаторов. За окончательный показатель брали усредненный результат по 10-балльной системе.

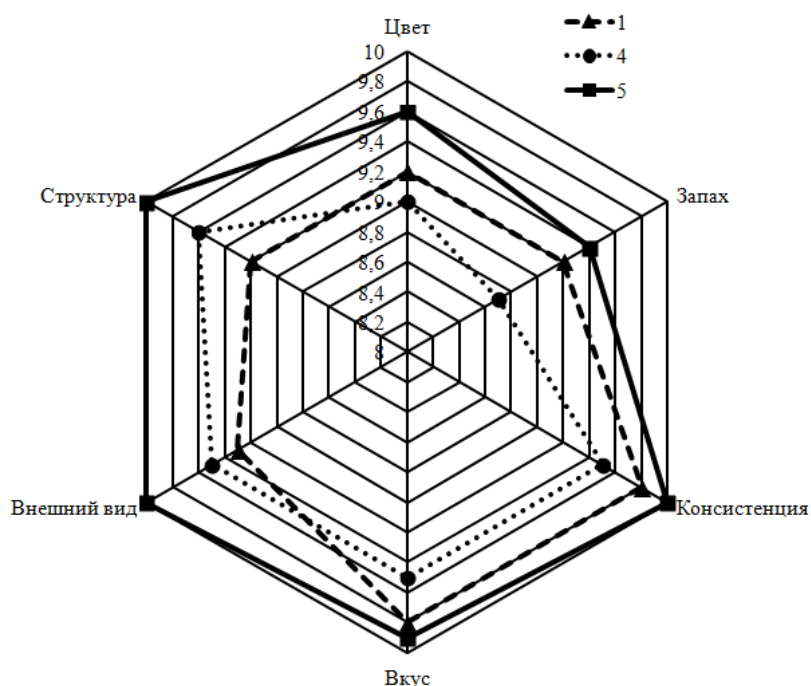


Рис. 3. Органолептические показатели печеночного паштета, обработанного высоким статическим и циклическим давлениями

На основе полученных экспериментальных данных можно прийти к следующим выводам:

1. Сравнительный анализ результатов исследования микробиологической загрязненности паштета, обработанного в статическом и циклическом режимах нагружения

показывает, что общее количество микробных клеток в 1 см³ продукта при циклическом характере нагружения величиной 400 МПа ниже, чем его значение при статическом режиме при значении давления 600 МПа.

2. Сравнительная оценка результатов исследования по изучению остаточной активности кислой фосфатазы печеночного паштета, обработанного в циклическом и статическом режимах нагружения, позволяет сделать заключение, что высокое давление в 400 МПа в циклическом режиме обеспечивает получение продукта со степенью готовности, соответствующей готовности образца, обработанного давлением 600 МПа в статическом нагружении.

3. По мнению дегустаторов, паштет, приготовленный при помощи бароциклической технологии при давлении 400 МПа, производит наилучшие впечатления. Общая оценка группы дегустационной комиссии состоит в том, что паштет, приготовленный при помощи бароциклической обработки, может быть отнесен к деликатесной группе мясных продуктов, так как не имеет аналогов среди паштетов, изготовленных по традиционной технологии.

На основании проведенных исследований, можно утверждать, что процесс производства печеночного паштета с использованием бароциклической обработки позволяет получать готовый продукт без стадии тепловой обработки, который отвечает все нормам санитарного благополучия и требованиям качества. Рекомендуемые параметры процесса - 3 цикла нагружения давлением 400 МПа с экспозицией по 5 минут при сбросе давления до атмосферного с выдержкой в 1 минуту.

Список литературы

1. Сукманов В.О., Соколов С.А., Севаторов М.М., Приходько І.В. Атермічний спосіб виготовлення печінкового паштету з використанням високого тиску. Патент на корисну модель №37167 МПК(2006) А23L 3/26 25.11.2008 Бюл.№22, 2008.

2. Жаксылыкова М.О. Качественные показатели мяса при воздействии высокого гидростатического давления : автореферат дис. ... канд. техн. наук. М.: / Московская академия прикладной биотехнологии, 1994. 20с.

3. Разработка экспериментального комплекса по определению физических характеристик продуктов, обработанных высоким давлением / Сукманов В. А. [и др.] // Зб. наук. пр. Луган. нац. аграр. ун-ту. Сер. Техн. науки. - Луганськ, 2005. - Вип. 49. - С. 274-282.

4. Медико-биологические требования и санитарные нормы качества продовольственного сырья и пищевых продуктов. Утвержд. 1-08-89. №5061-89. Мин.здравоохр.СССР. – С. 151-163.

УДК 66.022.389

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АППРЕТИРОВАНИЯ ПРЕССОВЫХ СУКОН ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ В СОСТАВ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ПОЛИУРЕТАНОВОГО ЛАТЕКСА
IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF DRESSING OF PRESS CLOTH BY INTRODUCTION TO POLYMERIC COMPOSITION'S STRUCTURE OF POLYURETHANE LATEX

Григорий Игоревич Хазанов, Маргарита Алексеевна Апарушкина
Grigory I. Hazanov, Margarita A. Aparushkina

Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow
(e-mail: hasanov_gr_1957@rambler.ru, paxt@yandex.ru)

Аннотация: В статье исследовалось влияние аппретирующего состава смола-латекс на воздухопроницаемость и капиллярную пористость прессовых сукон, определен оптимальный состав аппрета, получены уравнения для расчета воздухопроницаемости и капиллярной пористости.

Abstract: In article influence of the finishing structure pitch-latex on air permeability and capillary porosity of press cloth was investigated, the optimum composition of finish coat is defined, the equations for calculation of air permeability and capillary porosity are received.

Ключевые слова: полиуретановый латекс, аппретирующий состав, технические сукна.
Keywords: the polyurethane latex, finishing structure, technical cloth.

Представленная работа является продолжением исследований, направленных на усовершенствование технологии аппретирования технических сукон для прессовой части бумагоделательных машин. Определенный практический интерес представляет введение в состав полимерных композиций латексов. Нами была изучена композиция, содержащая в своем составе: эпоксидную смолу ЭТМ, отвердитель м-фенилендиамин (20% от массы смолы ЭТМ) и полиуретановый латекс Латур 1052-3Ф. Смола ЭТМ - это растворимая в воде эпоксидная смола. Ее применение позволяет устранить необходимость использования растворителей, решает проблему стабильности полимерных композиций, из которых не выпадает осадок [1].

С целью выявления оптимального аппретирующего состава исследовалось влияние концентрации смолы и латекса на воздухопроницаемость аппретированных образцов, которая должна иметь максимальное значение.

Величина воздухопроницаемости определялась после испытания образцов в течение 72 ч. на лабораторном стенде, представляющим собой модель прессовой части бумагоделательной машины.

Факторы, уровни и интервалы их варьирования приведены в таблице 1, а результаты эксперимента в таблице 2.

Таблица 1. Факторы, уровни и интервалы их варьирования для состава смола ЭТМ – м-фенилендиамин – Латур 1052-3Ф

Факторы	Уровни варьирования					Интервал варьирования
	X ₁ , X ₂	-1,414	-1	0	1	
K ₁	16	20	30	40	44	10
K ₂	100	86	50	15	0	-35

K₁ (г/л), X₁ – концентрация смолы ЭТМ в натуральном и безразмерном масштабе.

K₂ (% от ЭТМ), X₂ – концентрация латекса Латур 1052-3Ф в натуральном и безразмерном масштабе.

Таблица 2. Результаты планируемого эксперимента для состава смола ЭТМ – м-фенилендиамин – Латур 1052-3Ф

№ п/п	X ₁	X ₂	У _{экс}	У _{рас}	(У _{экс} – У _{рас}) ²
1	+	+	362,8	364,4	2,56
2	-	+	442	441,6	0,16
3	+	-	446	426,2	353,44
4	-	-	375	354	441
5	-1,414	0	373,3	383,2	98,01
6	1,414	0	373,3	380,4	50,41
7	0	-1,414	280	403	529
8	0	1,414	426,6	420,6	36
9	0	0	415,7	404	136,89
10	0	0	392	404	144
11	0	0	407,8	404	14,44
12	0	0	399,1	404	24,01
13	0	0	405	404	1,44

У_{рас}, У_{экс} – расчетное и экспериментальное значение воздухопроницаемости, дм³/м²ч.

В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение (1) для определения воздухопроницаемости:

$$Y = 404 - X_1 + 6,2X_2 - 37,6X_1X_2 - 11(X_1)^2 + 3,9(X_2)^2 \quad (1)$$

Как следует из уравнения, для получения положительного результата необходимо уменьшить концентрацию латекса, т.е. введение Латюра в аппретирующий раствор не целесообразно.

Кроме того, нами изучалась возможность использования полиуретановой дисперсии совместно с полимерным отвердителем. Применение полимерных отвердителей позволяет существенно снизить влияние температуры термообработки на свойства получаемой полимерной пленки. Были изучены композиции, содержащие в своем составе: смолу ЭТМ – 669 отвердитель – Латур 1052-3Ф.

Для определения рационального аппретирующего состава смола ЭТМ – отвердитель 669 – Латур 1052-3Ф исследовалось влияние концентрации смолы и латекса на капиллярную пористость получаемых изделий, которая должна иметь максимальное значение.

Компоненты смолы ЭТМ/отвердитель 669 брались в соотношении 1,9/1.

Факторы, уровни и интервалы их варьирования приведены в таблице 3, а результаты эксперимента в таблице 4.

Таблица 3. Факторы, уровни и интервалы их варьирования для состава смола ЭТМ – отвердитель 669 – Латур 1052-3Ф

Факторы	Уровни варьирования					Интервал варьирования
	X ₁ , X ₃	-1	0	1	1,414	
K ₁	15	16,5	20	23,5	25	3,5
K ₃	5	6,5	10	13,5	15	3,5

K₁ (г/л), X₁ – концентрация смолы ЭТМ в натуральном и безразмерном масштабе.

K₃ (г/л), X₃ – концентрация латекса Латур 1052-3Ф в натуральном и безразмерном масштабе.

Таблица 4. Результаты планируемого эксперимента для состава смола ЭТМ –отвердитель 669 – Латур 1052-3Ф

№ п/п	X ₁	X ₃	У _{2экс}	У _{2рас}
1	+	+	1,48	1,45
2	-	+	6,68	6,68
3	+	-	4,14	4,17
4	-	-	2,84	2,87
5	-1,414	0	5,72	5,69
6	1,414	0	2,96	2,91
7	0	-1,414	2,96	2,9
8	0	1,414	3,65	3,66
9	0	0	1,7	1,92
10	0	0	1,88	1,92
11	0	0	2,1	1,92
12	0	0	2	1,92
13	0	0	1,96	1,92

У_{2рас}, У_{2экс} – расчетное и экспериментальное значение капиллярной пористости.

После обработки экспериментальных данных было получено уравнение (2) для расчета капиллярной пористости:

$$U_2 = 1,92 - 0,98 X_1 + 0,27 X_3 - 1,83 X_1 X_3 + 1,19 (X_1)^2 + 0,68 (X_3)^2 \quad (2)$$

Как следует из уравнения, для увеличения капиллярной пористости необходимо повысить концентрацию латекса и снизить содержание смолы. Были выбраны рациональные условия аппретирования прессовых сукон: смола ЭТМ – 15 г/л, отвердитель 669 – 9 г/л, Латур 1052-3Ф – 15 г/л. Полученная полимерная композиция была использована для выпуска опытной партии прессовых сукон для бумагоделательных машин.

Список литературы

1. Хазанов Г.И., Коротких Н.И., Козинда З.Ю. и др. Композиция для аппретирования волокнистых материалов А.с. 1799936 (СССР) // Б.И. 1993. №5. С. 10.

**СЕКЦИЯ 6.
«УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ.
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ»**

УДК 620.179.14

**ВНУТРИТРУБНАЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА
ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ
INTRATUBAL TOOL DIAGNOSTICS OF THE FUNCTIONING INDUSTRIAL
CHIMNEY**

**Владимир Андреевич Акатьев*, Евгений Владимирович Метелкин*,
Сущев Сергей Петрович****

Vladimir A. Akatev*, Evgeniy V. Metelkin *, Sergey P. Suchev**

** Российский государственный социальный университет, Россия, Москва*

** Russian State Social University, Russia, Moscow*

***Центр исследований экстремальных ситуаций, Россия, Москва*

***Center of researches of extreme situations, Russia, Moscow*

Аннотация: Рассмотрена оптическая дефектоскопия функционирующей дымовой трубы с использованием автономного аппарата, имеющего видеокамеры. Для энергосбережения и повышения качества контроля состояния внутренней поверхности трубы предложено использовать безинерционные светодиодные излучатели.

Abstract: Optical defectoscopy of the functioning chimney with use of the independent device having video cameras is considered. For energy saving and improvement of quality of control of a condition of an internal surface of a pipe it is offered to use bezinertsionny LED radiators.

Ключевые слова: дефект, дымовая труба, послойный оптический контроль, внутренняя поверхность трубы, автономный аппарат, видеокамера.

Keywords: defect, chimney, layer-by-layer optical control, internal surface of a pipe, independent device, video camera.

Прогнозирование технического состояния дымовых труб основывается на использовании результатов различных методов неразрушающего контроля (НК). К числу основных методов принадлежит и внутритрубная оптическая дефектоскопия дымовых труб с движущегося в трубе автономного аппарата (АА) [1 - 7]. Видеокамеры, расположенные на АА, производят послойную съемку подконтрольных полос внутренней поверхности трубы (рис.1).

Система аэродинамической стабилизации в условиях движения АА на спуск в восходящем закрученном потоке газов позволила ограничить амплитуду колебаний оси АА от вертикальности, удерживая её в пределах 5 градусов [3, 7]. Однако, при указанных ограничениях движения видеокамер вызывают эффект «смазанности» изображений. Этот эффект можно снизить, уменьшив выдержку диафрагмы при съемке и значительно увеличив освещенность зоны съемки. Однако, увеличение освещенности в существующей конфигурации АА требует значительного увеличения расхода энергии на подсветку, что зачастую не представляется возможным.

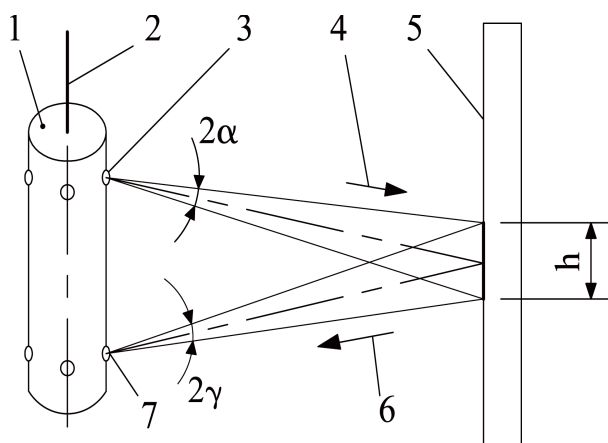


Рис.1. Схема контроля футеровки:

1 – автономный аппарат;
 2 – тросовая подвеска;
 3 – излучатель; 4 – прямой поток света;
 5 – футеровка; 6 – отраженный поток
 света; 7 – фотокамера;
 2α – угол раскрытия светового потока;
 2γ – угол обзора фотокамерой кольцевой
 участка съемки в вертикальной
 плоскости

За время движения автономного аппарата в трубе кварцево-галогенные лампы включаются в работу примерно 100 раз через каждые 10-11 секунд [3, 4]. Учитывая, что лампы требуют предварительного разогрева в течение 2-3 секунд, их применение при импульсно-циклическом режиме приводит к расточительным затратам энергии на подсветку [7].

Исключить расточительные потери энергии на предварительный разогрев спиралей ламп можно применением матричных светодиодов вместо ламп накаливания. В циклическом режиме подсветки можно сэкономить энергию и направить её на повышение освещенности фотографируемых участков съемки дымовой трубы и снижение выдержки видеокамер.

Для подсветки внутренней полосы фотографирования дымовой трубы диаметром 14 м мощность кварцево-галогенных ламп, как показывают расчеты, составляет не менее 1200 Вт [4]. При движении АА в трубе система приемных видеокамер одновременно производит послойную съемку полос поверхности трубы. При этом каждая видеокамера производит одноразовое фотографирование с периодом равным 11 с, который соответствует спуску АА на высоту контролируемой полосы с запасом (10-15 %) на наложение. В то же время момент включения кварцево-галогенного излучателя опережает не менее чем на 2 с момент включения видеокамер, поскольку к моменту включения камер спираль излучателя должна быть разогрета до температуры накала. При контроле дымовой трубы высотой 120 м суммарная длительность работы излучателя системы подсветки составит примерно 180 с. Оценочный расход электроэнергии на подсветку составляет около 250 кДж [7].

Расход энергии от аккумулятора на подсветку можно существенно уменьшить, если применить светодиоды вместо кварцево-галогенных ламп. Светодиоды не создают электромагнитных излучений в области инфракрасных и ультрафиолетовых спектров частот, они не обладают инерционностью и являются эффективными при импульсно-периодическом режиме работы. Схема размещения светодиодов показана на рис.2.

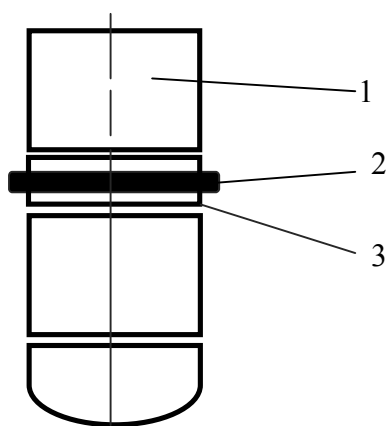


Рис.2. Схема размещения светодиодных излучателей:

1 – автономный аппарат;
 2 – секция светодиодных излучателей;
 3 – корпус секции светодиодных излучателей

Время реакции на включение напряжения питания (стартовая инерция) для светодиода составляет десятки микросекунд, в то время как для галогенного излучателя оно составляет 2-3 секунды. В импульсно-периодическом режиме с периодом 11 с переход на светодиоды позволит сократить суммарный расход электрической энергии на подсветку более чем в 10 раз. Высвободившуюся энергию можно израсходовать на повышение освещенности зоны подсветки, что позволит в несколько раз уменьшить выдержку диафрагмы при съемке и соответственно исключить эффект смазанности изображений контролируемых участков поверхности трубы.

Таким образом, модернизация автономного аппарата (АА), осуществляющего при спуске на тросовой подвеске внутри функционирующей дымовой трубы послыйный оптический контроль её внутренней поверхности, заключается в оснащении системы подсветки полос контроля экономичными безинерционными матричными светодиодами. Оснащение АА светодиодами позволит направить высвободившуюся энергию на повышение освещенности зоны съемки, что в конечном итоге позволит снизить выдержку диафрагм оптических приемников и соответственно исключить эффект смазанности изображений контролируемых участков поверхности трубы, т.е. повысить разрешающую способность при контроле.

Список литературы

1. Акатьев В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П. и др. Способ контроля внутренней поверхности дымовой трубы и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RUS 2152065. 2000.
2. Акатьев В.А., Суцев С.П. Об оценке эксплуатационной безопасности дымовых труб с помощью мобильного комплекса // Научный журнал проблем комплексной безопасности. 2005. № 1. С.77-91.
3. Акатьев В.А., Александров А.А., Волкова Л.В., Суцев С.П. Способ контроля внутренней поверхности дымовой трубы и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RUS 2545062. 26.08.2013.
4. Акатьев В.А., Суцев С.П. Технология и параметры автономного аппарата для контроля футеровки функционирующей дымовой трубы // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – № 3. – С.32-44.
5. Акатьев В.А., Ларионов В.И., Милютин Н.П., Суцев С.П., Дмитриев М.В. Совершенствование способов и средств внутритрубного контроля функционирующей дымовой трубы // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № S1. С.1-24.
6. Суцев С.П., Ларионов В.И., Акатьев В.А. и др. Техническое диагностирование футеровок промышленных дымовых труб без остановки технологических процессов // Безопасность труда в промышленности. - 2003.- № 6. - С.38-41.
7. Akat'ev V.A., Metelkin E.V., Volkova L.V. Intratubal optical Defectoscopy of Working chimneys // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. T. 51. № 9. С. 587-593.

УДК 620.118

**МЕТОД И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ
METHOD AND MEASUREMENT SYSTEM FOR NONDESTRUCTIVE TESTING OF
STRUCTURAL TRANSITIONS IN POLYMERIC MATERIALS**

**Нина Филипповна Майникова, Николай Павлович Жуков, Олег Николаевич Попов,
Иван Владимирович Рогов
Nina F. Mainikova, Nikolay P. Zhukov, Oleg N. Popov, Ivan V. Rogov**

*Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(e-mail: Zhukoff.NP@yandex.ru)*

Аннотация: Представлено описание теплового метода неразрушающего контроля структурных переходов в полимерных материалах. Сформулирована краевая задача нестационарной теплопроводности. Приведено решение задачи, описывающее процесс распространения тепла в исследуемом полуограниченном теле в предположении отсутствия структурного перехода, которое впоследствии использовано для решения задач оптимизации измерительного зонда при реализации теплового метода неразрушающего контроля структурных переходов в полимерных материалах.

Abstract: The description of a thermal method of nondestructive control of structural transitions in polymeric materials is submitted. The regional problem of non-stationary heat conductivity is formulated. The solution of a task describing process of distribution of heat in a studied semi-limited body in the assumption of lack of structural transition which is used subsequently for the solution of problems of optimization of a measuring probe at realization of a thermal method of nondestructive control of structural transitions in polymeric materials is provided.

Ключевые слова: измерительная система, математическая модель, неразрушающий контроль, полимерный материал, структурный переход.

Keywords: measurement system, mathematical model, nondestructive control, polymeric material, structural transition.

Полимерные материалы (ПМ) находят широкое применение в самых различных отраслях промышленности, что обусловлено разнообразием их свойств, которые можно варьировать, создавая новые типы полимеров, разрабатывая новые технологии конструирования ПМ из уже известных полимеров или путем их модифицирования. Практическое использование ПМ не возможно без глубокого изучения суперпозиций их состояний и переходов, информация о которых необходима для назначения технологических режимов их переработки и определения условий эксплуатации изделий.

Известен контактный метод теплового неразрушающего контроля (НК) структурных переходов в ПМ по изменениям их теплофизических свойств (ТФС) при воздействии на поверхность объекта исследования от круглого источника тепла постоянной мощности в виде диска, встроенного в подложку измерительного зонда (ИЗ). Однако данный метод имеет существенные ограничения по времени и температуре, так как в методе реализуется квазистационарная стадия [1].

При распространении тепла в полуограниченном теле от линейного источника тепла постоянной мощности квазистационарная стадия не реализуется, скорость нагрева выше, чем в методе с использованием круглого источника тепла. При применении двух линейных нагревателей (в виде узких полос), действующих на поверхности исследуемого объекта, в расположенной между нагревателями области градиент температуры меньше, чем при использовании одного линейного нагревателя. Это существенно снижает ограничения на

толщину исследуемого объекта, увеличивает сигнал на термоприемнике, находящемся между нагревателями, без значительного увеличения напряжения на них (рис.1).

Для схемы, представленной на рис.1, тепловое воздействие на исследуемое тело из ПМ, имеющее равномерное начальное температурное распределение, осуществляется с помощью двух линейных нагревателей постоянной мощности в виде полос, встроенных в подложку ИЗ. Начальное температурное распределение контролируется одновременно тремя термоэлектрическими преобразователями (ТП1, ТП2, ТП3), расположенными на контактной поверхности подложки ИЗ. ТП2 расположен между нагревателями на горизонтальной оси контактной поверхности ИЗ, ТП1 и ТП3 находятся на осях нагревателей. В ходе эксперимента каждым ТП фиксируется зависимость избыточной температуры от времени.

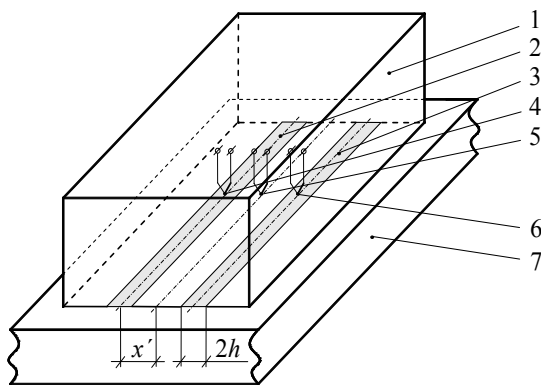


Рис. 1. Измерительная схема:
1 – подложка; 2, 3 – нагреватели;
4, 5, 6 – ТП1, ТП2, ТП3;
7 – исследуемое изделие.

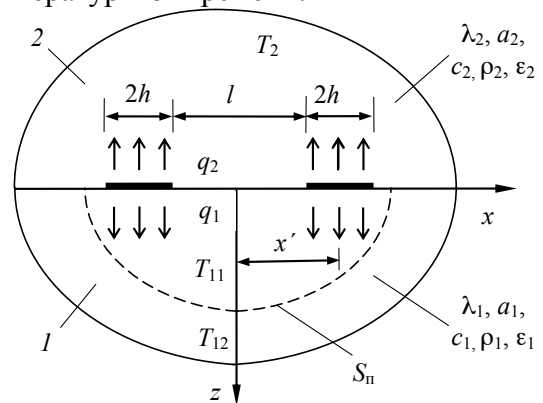


Рис. 2 Тепловая схема .
1 – исследуемое изделие;
2 – подложка ИЗ.

Два полуограниченных тела (рис. 2) с различными ТФС находятся в идеальном тепловом контакте с двумя линейными источниками тепла постоянной мощности в виде полос шириной $2h$ каждый. В начальный момент времени избыточная температура тел во всех точках пространства одинакова и равна нулю. В момент времени $\tau = 0$ на поверхности исследуемого ПМ начинают действовать два источника с постоянной линейной мощностью q_0 , обладающие удельной теплоемкостью c_n каждый. При температуре $T = T_n$ ПМ (тело1) имеет фазовый переход (ФП), сопровождающийся поглощением (выделением) тепла Q_n .

ТФС полимерных материалов (тело1) при изменении температуры на $20...30^\circ\text{C}$ до и после структурного перехода изменяются незначительно по сравнению с аномалиями ТФС при структурном переходе. При нагреве и остывании системы структурные переходы в ПМ, сопровождающиеся тепловыми эффектами, проявляются на экспериментально полученных термограммах и могут быть выявлены по аномалиям на температурных зависимостях ТФС.

Математическая постановка задачи:

$$\frac{1}{a_{11}} \frac{\partial T_{11}(x, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_{11}(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{11}(x, z, \tau)}{\partial z^2}, \quad x > 0, z > 0, \tau > 0, T_{11}(x, z, \tau) > T_n; \quad (1)$$

$$\frac{1}{a_{12}} \frac{\partial T_{12}(x, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_{12}(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{12}(x, z, \tau)}{\partial z^2}, \quad x > 0, z > 0, \tau > 0, T_{12}(x, z, \tau) < T_n; \quad (2)$$

$$\frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2(x, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_2(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2(x, z, \tau)}{\partial z^2}, \quad x > 0, z < 0, \tau > 0; \quad (3)$$

$$T_1 = \begin{cases} T_{11}, & T_1(x, z, \tau) > T_n, \\ T_{12}, & T_1(x, z, \tau) < T_n, \end{cases} \quad (4)$$

$$T_1(x, z, 0) = T_2(x, z, 0) = T_0; \quad (5)$$

$$T_1(x, 0, \tau) = T_2(x, 0, \tau); \quad (6)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, 0, \tau)}{\partial z} = \begin{cases} 0, & 0 < |x| < \frac{l}{2} \\ q_1, & \frac{l}{2} < |x| < \frac{l}{2} + 2h; \\ 0, & \frac{l}{2} + 2h < |x| \end{cases} \quad (7)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, 0, \tau)}{\partial z} = \begin{cases} 0, & 0 < |x| < \frac{l}{2} \\ q_2, & \frac{l}{2} < |x| < \frac{l}{2} + 2h; \\ 0, & \frac{l}{2} + 2h < |x| \end{cases} \quad (8)$$

$$q_1 + q_2 = q_0 - 2q_n; \quad (9)$$

$$T_1(x, z, \tau) = T_2(x, z, \tau) = T_0, \quad x^2 + z^2 \rightarrow \infty; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_1(0, z, \tau)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T_2(0, z, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (11)$$

$$-\lambda_{11} \sqrt{\left(\frac{\partial T_{11}(S_n, \tau)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{11}(S_n, \tau)}{\partial z}\right)^2} + \lambda_{12} \sqrt{\left(\frac{\partial T_{12}(S_n, \tau)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{12}(S_n, \tau)}{\partial z}\right)^2} = V_n Q_n; \quad (12)$$

$$\lambda_1 = \begin{cases} \lambda_{11}, & T_1(x, z, \tau) > T_n; \\ \lambda_{12}, & T_1(x, z, \tau) < T_n; \end{cases} \quad (13)$$

$$V_n = \sqrt{\left(\frac{\partial x_n}{\partial \tau}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_n}{\partial \tau}\right)^2}; \quad (14)$$

$$S_n(\tau) = \{(x_n, z_n) | T_1(x_n, z_n, \tau) = T_n\}. \quad (15)$$

Здесь T_{11} – распределение температуры в исследуемом ПМ в первой фазе (после структурного перехода); T_{12} – распределение температуры во второй фазе ПМ (до структурного перехода); T_n – температура структурного перехода, который происходит на границе раздела двух фаз; x, z – координаты; τ – время; $T_1, T_2, \lambda_1, \lambda_2$ – значения избыточной температуры и теплопроводности ПМ и подложки ИЗ, соответственно; a_2 – температуропроводность подложки ИЗ; a_{11}, a_{12} – температуропроводность ПМ после и до структурного перехода, соответственно; $\lambda_{11}, \lambda_{12}$ – теплопроводность ПМ после и до структурного перехода, соответственно; l – расстояние между нагревателями; S_n – граница структурного перехода; V_n – скорость движения границы структурного перехода; q_0 – мощность, выделяющаяся на единицу длины нагревателя, q_1, q_2 – части мощности, идущие на нагрев исследуемого ПМ и подложки ИЗ, соответственно; q_n – мощность, затрачиваемая на разогрев нагревателя.

Аналитически решить задачу нестационарной теплопроводности (1) – (15) при наличии структурного перехода в одном из тел, затруднительно вследствие ее нелинейности (так как не известны изменения ТФС ПМ в температурном интервале структурного перехода и не известен закон движения границы структурного перехода).

Известно, что если пренебречь теплоемкостью нагревателя и оттоком

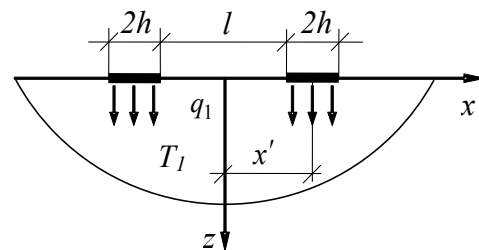


Рис. 3 – Схема распространения тепла от действия двух линейных нагревателей в полуграниченном теле.

тепла в материал подложки, то тепловую схему для представленной задачи можно представить в следующем виде (рис. 3).

Математическая модель распределения тепла в полуограниченном теле от действия двух линейных нагревателей (рис. 3) может быть записана в виде прямой задачи теплопроводности:

$$\frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1(x, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_1(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, z, \tau)}{\partial z^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < \infty, \quad z > 0; \quad (16)$$

$$T_1(x, z, 0) = T_0; \quad (17)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, 0, \tau)}{\partial z} = \begin{cases} 0, & 0 < |x| < \frac{l}{2} \\ q_1, & \frac{l}{2} < |x| < \frac{l}{2} + 2h; \\ 0, & \frac{l}{2} + 2h < |x| \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_1(0, z, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (19)$$

$$T_1(x, z, \tau) = T_0, \quad x^2 + z^2 \rightarrow \infty. \quad (20)$$

Решение задачи (16) – (20), описывающее процесс распространения тепла в исследуемом полуограниченном теле в предположении отсутствия структурного перехода, было получено по принципу суперпозиции на основании известных ранее решений [2].

$$\begin{aligned} T_1(x, 0, \tau) = & \frac{q_1 a_1^{0,5} \tau^{0,5}}{\pi^{0,5} \lambda} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{h + (x - x')}{2a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \right] - \frac{h + (x - x')}{2\pi^{0,5} a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(h + (x - x'))^2}{4a_1 \tau} \right] + \right. \\ & + \operatorname{erf} \left[\frac{h - (x - x')}{2a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \right] - \frac{h - (x - x')}{2\pi^{0,5} a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(h - (x - x'))^2}{4a_1 \tau} \right] \\ & + \operatorname{erf} \left[\frac{h + (x + x')}{2a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \right] - \frac{h + (x + x')}{2\pi^{0,5} a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(h + (x + x'))^2}{4a_1 \tau} \right] \\ & \left. + \operatorname{erf} \left[\frac{h - (x + x')}{2a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \right] - \frac{h - (x + x')}{2\pi^{0,5} a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(h - (x + x'))^2}{4a_1 \tau} \right] \right\} \quad (21) \end{aligned}$$

где τ – время, с; x – координата, м; h – половина ширины нагревателя, м; $x' = \frac{l}{2} + h$ – расстояние от центра контактной плоскости ИЗ до оси нагревателя, м; a_1 – температуропроводность, м²/с.

Выражение для температуры поверхности $z = 0$ в точке с координатой x от действия двух нагревателей для больших значений τ :

$$\begin{aligned} T_1(x, 0, \tau) = & \frac{q_1 h}{\pi \lambda_1} \left\{ 2 \ln \left(\frac{a_1 \tau}{h^2} \right) + 4 - 2\gamma + 4 \ln(2) - \right. \\ & - \frac{h + (x + x')}{2h} \ln \left(\frac{h + (x + x')}{h} \right)^2 - \frac{h - (x - x')}{2h} \ln \left(\frac{-h + (x - x')}{h} \right)^2 - \\ & \left. - \frac{h + (x - x')}{2h} \ln \left(\frac{h + (x - x')}{h} \right)^2 - \frac{h + (-x - x')}{2h} \ln \left(\frac{h - (x + x')}{h} \right)^2 \right\}. \quad (22) \end{aligned}$$

Найденные решения (21) и (22) применены в качестве основы математического, алгоритмического обеспечений измерительной системы (ИС), а также использованы для определения оптимальных конструктивных и режимных характеристик ИЗ при реализации теплового метода НК структурных переходов в ПМ [3].

ИС НК структурных переходов в ПМ состоит из персонального компьютера (ПК), ИЗ, блока управления питанием (БУП), измерительно-управляющей платы. Зонд обеспечивает создание теплового воздействия на исследуемое изделие с помощью двух линейных нагревателей (Н1 и Н2). Фиксирование температуры в точках контроля осуществляется термопреобразователями ТП1, ТП2, ТП3.

При измерениях ИЗ устанавливают контактной стороной на поверхность исследуемого изделия. Мощность и длительность теплового воздействия задаются программно БУП через интерфейс и цифро-аналоговый преобразователь. Холодные спаи ТП выведены в блок холодных спаев, где распаяны на коммутационную плату. Значение температуры холодных спаев ТП фиксируется датчиком температуры. ТП соединены таким образом, что помимо дифференциальных сигналов фиксируются сигналы непосредственно с самих ТП. Сигналы с ТП поступают через мультиплексор, усилитель, аналого-цифровой преобразователь, буфер обмена и интерфейс в ПК.

При создании ИС были использованы современные пакеты программ *Microsoft Excel, Maple, Matlab, LabVIEW, Multisim, COMSOL Multiphysics*, что позволило реализовать эффективный и детальный анализ работоспособности ИС на всех этапах ее проектирования.

ИС позволяет реализовать метод НК структурных переходов в ПМ, предусматривающий нагрев участка поверхности исследуемого объекта двумя линейными нагревателями постоянной мощности, регистрацию и обработку термограмм нагрева, полученных в расположенных на поверхности объекта точках, а температуру структурного перехода определяют:

- по аномалиям на температурных зависимостях ТФС ПМ;
- по существенным изменениям коэффициентов модели и их дисперсий в температурном интервале структурного перехода;
- по изменениям скоростей нагрева ПМ в контролируемых точках;
- по существенным изменениям дисперсии значений температуры в контролируемых точках;
- по изменениям разности значений температуры поверхности исследуемого объекта из ПМ в контролируемых точках, расположенных на центральной оси контактной поверхности подложки ИЗ и оси каждого нагревателя.

Список литературы

1. Многомодельные методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов: учебное пособие / С.В. Мищенко, Ю.Л. Муромцев, Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов, О.Н. Попов; под ред. С.В. Мищенко. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 112 с.
2. Математическое моделирование теплопереноса от двух нагревателей в полуограниченном теле / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов, О.Н. Попов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 327 – 332.
3. Попов, О.Н. Оптимизация конструкции измерительного устройства, реализующего неразрушающий контроль полимерных материалов / О.Н. Попов // Молодой ученый. – 2015. – № 22 (102). – С. 177 – 180.

УДК 631.365.22

**РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕРНА В ШАХТНЫХ СУШИЛКАХ
REGULATION OF TEMPERATURE OF GRAIN IN SHAFT DRYERS****Николай Михайлович Андрианов^{*,**}, Мэй Шуньчи^{**}, Сюе Юн^{**}
Nikolay M. Andrianov^{*,**}, Mei Shunqi^{**}, Xue Yong^{**}**** Новгородский государственный университет – НовГУ, Россия, Великий Новгород*** Novgorod State University – NovSU, Russia, Veliky Novgorod
(e-mail: Nikolay.Andrianov@novsu.ru)**** Уханьский текстильный университет, Кумай, Ухань**** Wuhan Textile University, China, Wuhan
(e-mail: meishunqi@vip.sina.com)*

Аннотация: На основе экспериментальных данных выполнен анализ динамики процессов регулирования температуры зерна в шахтных сушилках. Установлено, что статические и динамические характеристики сушильной камеры зависят от технологических особенностей рабочего процесса. Для лучшей стабилизации режимов предлагается система регулирования температуры зерна.

Abstract: On the basis of experimental data performed the analysis of the dynamics of the processes of regulation of temperature of grain in the shaft drier. It is established that the static and dynamic characteristics of the drying chamber depends on technological features of the workflow. To the best of stabilization regimes is offered system of regulation of temperature of grain.

Ключевые слова: сушилка шахтная, режимы сушки, регулирование, оптимизация.

Keywords: the dryer shaft, drying regimes, regulation, optimization.

В шахтных сушилках, кроме абсолютных значений допустимого нагрева зерна, дополнительно задаются ограничения на разброс этих значений во времени и пространстве [1]. Однако практика показывает, что их выполнение без снижения качества продукта и интенсивности его обработки, затруднительно, что снижает эффективность работы оборудования.

Один из путей интенсификации сушки повышение надежности оперативного контроля температуры зерна, что позволяет с меньшей погрешностью осуществить ее регулирование и приблизить режимы к предельно допустимым. Надежность контроля обеспечивается не только высокой точностью измерительного оборудования, но и оптимальным размещением датчиков, применением рациональных алгоритмов их опроса и т.п. Решение этих задач требует учета множества технологических особенностей сушилок.

Как объект управления, сушилка – сложная динамическая система [2–9], состояние которой определяется температурой $\vartheta_3(t)$ и влажностью $W(t)$ зерна, их начальные значения $\vartheta_{30}(t)$ и $W_0(t)$ определяют условия сушки, а температура теплоносителя $\vartheta_1(t)$ и экспозиция $\omega(t)$ – режим обработки.

Установлено, что входные переменные $\vartheta_{30}(t)$ и $W_0(t)$ изменяются стохастически (табл. 1), что возбуждает колебания выходных переменных $\vartheta_3(t)$ и $W(t)$ в интервале, превышающем агротехнический допуск [3–4, 9]. Период колебаний существенных частот сопоставим с экспозицией.

Значения коэффициентов взаимной корреляции процессов $W_0(t) - \vartheta_3(t)$ и $W(t) - \vartheta_3(t)$ в зависимости от режима переменны (табл. 2) и принимают как положительные, так и отрицательные значения. При низких влажностях зерна ($W_0 < 20\%$) они отрицательны, а при высоких – положительны.

Таблица 1. Оценки характеристик случайных функций

Показатель	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение
Влажность, %:		
на входе $W_0(t)$	15,2...33,6	0,70...1,70
на выходе $W(t)$	13,5...29,8	0,14...2,60
Температура, °С:		
на входе $\vartheta_{30}(t)$	9,9...18,1	0,40...2,50
на выходе $\vartheta_3(t)$	21,1...31,0	0,23...5,30

Таблица 2. Коэффициенты взаимной корреляции процессов

Наименование процессов	Диапазон изменения
$W_0(t) - \vartheta_3(t)$	-0,48...0,32
$W_0(t) - W(t)$	0,37...0,61
$W(t) - \vartheta_3(t)$	-0,77...0,39

Корреляционной связи процессов $\vartheta_{30}(t) - \vartheta_3(t)$ не обнаружено, но обнаружена тесная связь процессов $W_0(t) - \vartheta_3(t)$, чем подтверждается, что основным возмущением сушки являются колебания $W_0(t)$.

Наибольшие значения коэффициента корреляции процессов $W(t) - \vartheta_3(t)$ 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.

Наибольшее и однозначное влияние на ϑ_3 оказывает температура теплоносителя ϑ_T , а на влажность W экспозиция [7, 8], значение которой определяется частотой колебаний ω выгрузного аппарата. Изменение ω неоднозначно влияет на ϑ_3 (рис 1), из чего следует, что ее нельзя использовать для управления температурой ϑ_3 . Таким образом, в системе ϑ_T должна использоваться для управления температурой зерна, а ω для управления его влажностью.

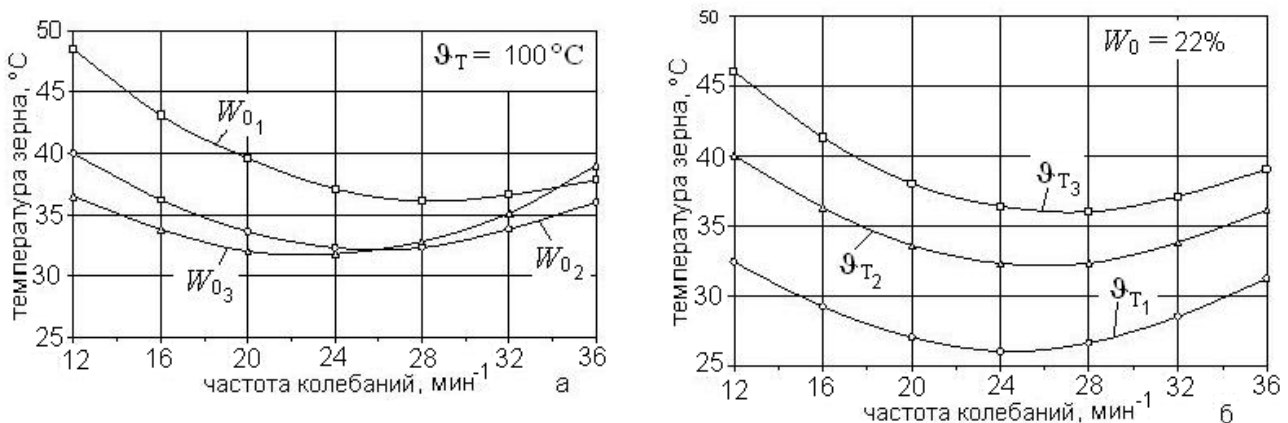


Рис. 1. Изменение ϑ_3 в зависимости от частоты колебаний выгрузного аппарата: а – при $W_{01}=18\%$, $W_{02}=22\%$, $W_{03}=26\%$; б – при $\vartheta_{T1}=70^\circ\text{C}$, $\vartheta_{T2}=100^\circ\text{C}$, $\vartheta_{T3}=130^\circ\text{C}$

Динамические свойства сушилки (табл. 3) в различных по высоте зонах описываются разными передаточными функциями, что обусловлено качественными отличиями протекающих в них процессов [8]. Изменчивость по высоте значений параметров передаточных функций (табл. 4) характеризует её как распределенную динамическую систему. Постоянные времена возрастают в направлении увеличения ряда коробов. Установлено, что большим значениям W_0 и ω соответствуют меньшие значения постоянных времени, интервал изменения которых достигает 20%.

Таблица 3. Передаточные функции и коэффициенты передачи сушилки СЗШ-8

Канал передачи	Коэффициент передачи		Передаточная функция	
	Единица измерения	Пределы изменения	2–4 ряд коробов	6–15 ряд коробов
$\vartheta_T - \vartheta_3$	$^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$	0,035–0,351	$\frac{K_{\vartheta_T \vartheta_3} \cdot e^{-\tau_{01} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\vartheta_T \vartheta_3} \cdot e^{-\tau_{01} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$\omega - \vartheta_3$	$^{\circ}\text{C}/\text{мин}^{-1}$	- 1,13–0,785	$\frac{K_{\omega \vartheta_3}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\omega \vartheta_3} (T'' \cdot p^2 + T' \cdot p + 1)}{T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$W_0 - \vartheta_3$	$^{\circ}\text{C}/\%$	-1,769–1,009	$K_{W_0 \vartheta_3} \cdot e^{-\tau \cdot p}$	$K_{W_0 \vartheta_3} \cdot e^{-\tau \cdot p}$

Таблица 4. Постоянные времени передаточных функций

Постоянная времени	Пределы изменения по каналам передачи, мин	
	$\vartheta_T - \vartheta_3$	$\omega - \vartheta_3$
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	–

Процессы нагрева и изменения влажности зерна взаимосвязаны, что позволяет рассматривать два периода их протекания (рис. 2). Первый характеризуется интенсивным повышением ϑ_3 . Скорость изменения ϑ_3 в этом периоде определяется только теплоинерционными свойствами зернового слоя, так как изменение его влажности из-за большой инерционности невелико. Продолжительность периода составляет 20–25 минут.

Во втором периоде начинается интенсивное изменение W , что приводит к постепенному перераспределению составляющих теплового баланса. Доля теплоты, затрачиваемая на испарение влаги из зерна, возрастает, поэтому процесс его нагрева существенно замедляется. Дальнейшее изменение ϑ_3 полностью определяется инерционностью поля его влагосодержания, поэтому, время τ окончания переходных процессов определяется экспозицией сушки.

Для разработки системы важно правильно оценить инерционные свойства сушилки. Расчет регулятора по завышенным данным ведет к снижению быстродействия системы, а необоснованное занижение – к потере устойчивости. Применительно к каналу регулирования температуры зерна ($\vartheta_T - \vartheta_3$) обоснованным является выбор постоянных времени передаточной функции на основе информации о затухании переходных процессов, обусловленных теплоинерционными свойствами зернового слоя. Из полученных данных их можно принять равными $T_1=4,9-6,1$ мин, $T_2=2,3-3,1$ мин. Причем, меньшие значения соответствуют большим значениям W и ω .

Неравномерность W и ϑ_3 в нижнем горизонтальном сечении сушилки оценили по их отклонениям от средних значений. Разброс W в отдельных точках сечения достигают $\pm 2,5\%$, а $\vartheta_3 - \pm 7^{\circ}\text{C}$, что превышает агротехнический допуск. Неодинаковый нагрев зерна обуславливает необходимость построения многоточечной системы контроля его температуры.

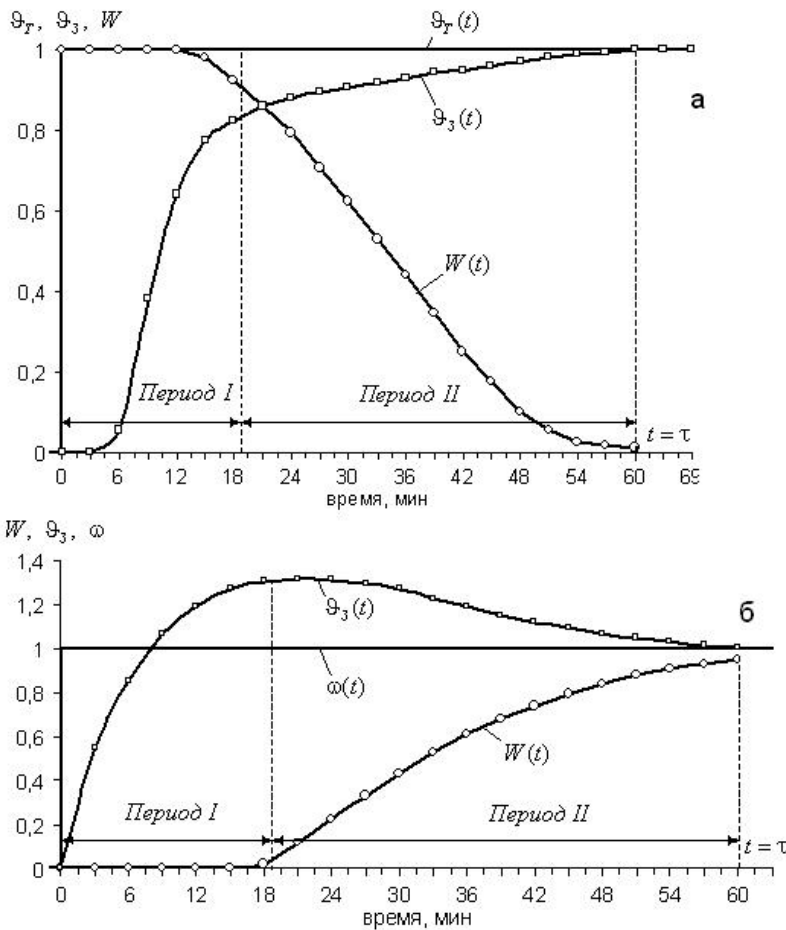


Рис. 2. Переходные процессы, возбужденные скачкообразным изменением температуры $\vartheta_T(t)$ (а) и экспозиции $\omega(t)$ (б)

Стабилизация теплового режима 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 в камеру сушки.

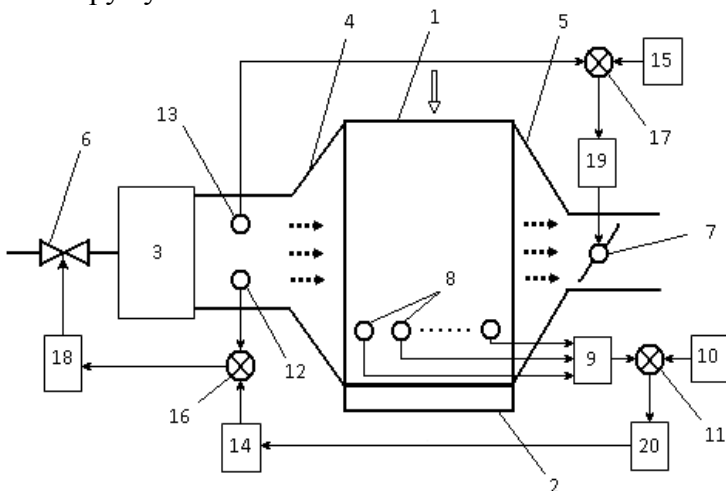


Рис. 3. Схема системы регулирования температуры зерна (обозначения в тексте):
 \Rightarrow – направление движения зерна;
 $\cdots \Rightarrow$ – направление движения теплоносителя

Система регулирования температуры зерна включает датчики 8, блок селекции 9, выделяющий максимальный сигнал, задатчик 10 и элемент сравнения 11, сигнал рассогласования которого через корректирующий элемент 20 определяет задание

Неоднозначность приращения ϑ_3 при изменении W и ω (см. табл. 2, 3 и рис. 1) 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 обнаружения зон максимального нагрева.

С учетом полученных данных разработана система [10-11] (рис. 3). Она содержит камеру сушки 1 с устройством 2 для регулирования экспозиции. Теплоноситель из теплогенератора 3, подается в сушилку через диффузор 4, а удаляется из нее вентилятором через диффузор 5. Регулирование температуры теплоносителя осуществляется регулирующим органом 6, а скорости газа в зерновом слое – регулирующим органом 7.

подчиненному контуру регулирования температуры теплоносителя. Система обеспечивает распределенный контроль и адаптивное регулирование температуры зерна, что повышает ее точность и интенсивность сушки.

Список литературы

1. Чижиков А. Г. Операционная технология послеуборочной обработки и хранения зерна (в Нечернозёмной зоне). М.: Россельхозиздат, 1981. 191 с.
2. Андрианов Н. М., Мэй Шуньчи Контроль и регулирование температуры зерна в шахтных сушилках // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 8. С.9.
3. Андрианов Н. М. Особенности работы зерновых сушилок // Техника в сельском хозяйстве. 2006. № 4. С. 9.
4. Андрианов Н. М., Мэй Шуньчи Идентификация шахтной зерносушилки в условиях нормальной работы // Фундаментальные исследования. 2015. № 2. Часть 16. – С. 3459.
5. Андрианов Н. М. Повышение эффективности функционирования зерновых сушилок // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 2. С. 175.
6. Андрианов Н. М. Совершенствование технологического процесса в шахтной зерносушилке // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2004. № 7. С. 7.
7. Андрианов Н. М., Галкин А. Д. Регулирование тепловых режимов в сушилках с гравитационным движущимся слоем // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 4. С. 30.
8. Андрианов Н. М. Исследование шахтной зерносушилки как объекта управления // Успехи современного естествознания. 2004. № 9. С. 86.
9. Андрианов Н. М., Манасян С. К. Оценка статистических характеристик потока зернового вороха, поступающего в сушилку // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 2. С. 20.
10. Колесов Л. В., Андрианов Н. М. Устройство для контроля и регулирования температуры // Авторское свидетельство SU 1425622. 1988, Бюл. № 35.
11. Андрианов Н. М., Колесов Л. В. Способ автоматического регулирования процесса сушки зерна и устройство для его осуществления // Патент RU 2135917. 1999, Бюл. № 24.

УДК 620.179.14

СТАБИЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ АВТОНОМНОГО АППАРАТА В ВОСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ ГАЗОВ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ STABILIZATION OF OPTICAL AXES OF DEVICES OF CONTROL OF THE INDEPENDENT DEVICE IN THE ASCENDING STREAM OF GASES OF THE CHIMNEY

Владимир Андреевич Акатьев*, Евгений Владимирович Метелкин*,
Сергей Петрович Суцев**
Vladimir A. Akatev*, Evgeniy V. Metelkin*, Sergey P. Suhev**

*Российский государственный социальный университет, Россия, Москва

* Russian State Social University, Russia, Moscow

**Центр исследований экстремальных ситуаций, Россия, Москва

**Center of researches of extreme situations, Russia, Moscow

Аннотация: Рассмотрены вопросы повышения разрешающей способности внутритрубного контроля функционирующей дымовой трубы путем использования гиросtabilизированной платформы для оптических систем, обеспечивающих контроль состояния внутренней поверхности трубы.

Abstract: Questions of increase of resolution of intra pipe control of the functioning chimney by use of the gyrostabilized platform for the optical systems providing control of a condition of an internal surface of a pipe are considered.

Ключевые слова: дымовая труба, оптический контроль внутренней поверхности, автономный аппарат, видеокамера, светодиодная матрица.

Keywords: chimney, optical control of an internal surface, independent device, video camera, LED matrix.

Дымовые трубы (ДТ) входят в основную технологическую цепочку производств, и поэтому аварии с их обрушениями могут приводить не только к значительным ущербам, но и остановкам производств [2, 3].

Накопленные за время эксплуатации дефекты дымовых труб становятся причиной их обрушений. Для предупреждения аварий труб применяется оптическая дефектоскопия их внутренней поверхности с движущегося в трубе автономного аппарата (АА) [1, 3].

Видеокамеры, расположенные на АА, производят послойную съемку контролируемых полос внутренней поверхности. При этом система аэродинамической стабилизации в условиях движения АА на спуск в восходящем закрученном потоке газов ограничивает амплитуду колебаний оси АА от вертикальности, удерживая её в пределах 5 градусов [4].

Корпус АА с помощью траверсы подвешен на тросе и представляет собой маятниковую систему. С целью обеспечения аэродинамической устойчивости АА в восходящем закрученном потоке дымовых газов на корпусе АА установлены два диска, создающие воздушный пузырь вокруг АА, благодаря которому наклон оси АА при его колебаниях удерживается в пределах 5 градусов [4, 5]. Периодический наклон оптической оси съемки приводит к отклонениям зон фотографирования, вследствие чего вынуждены заблаговременно планировать съемку смежных кольцевых полос поверхности трубы с частичным их наложением одну на другую. Принятое частичное наложение участков съемки предупреждает возможное выпадение участков поверхности трубы из обзора камер, но одновременно приводит к дополнительному расходу энергии на создание подсветки участков при их повторной съемке.

Наклон АА при его колебаниях вызывает смещение полосы контроля, то есть кольцевая полоса контроля по отношению к намеченной зоне контроля с одной стороны трубы смещается вверх, частично захватывая уже отснятую в предыдущем цикле полосу контроля, с противоположной стороны трубы она смещается вниз, частично пропуская намеченную зону контроля. Появление пропущенных при съемке участков поверхности трубы можно предупредить за счет наложения соседних кольцевых полос контроля поверхности друг на друга. Но такое наложение приводит к дополнительным затратам энергии на повторную съемку пограничных участков смежных полос контроля.

Смещение полосы контроля, вызываемых колебаниями АА, можно предупредить, если применить в АА для оптической стабилизации приборов контроля гироскопическую платформу в кардановом подвесе (рис.1) [1, 5].

АА имеет прозрачный цилиндрический кожух 1 с полусферическим обтекателем 2. На кожухе 1 установлены два диска 3 и 4 аэродинамической стабилизации и выступы для крепления строп 5. Стропы 5 свободно проходят через вертикальные отверстия 6 в верхнем диске 3.

Внутри кожуха на кардановом подвесе размещена гиростабилизированная платформа 7. Кардановый подвес состоит из охватывающей платформу кольца 8 с двумя парами осей, расположенных во взаимно перпендикулярных направлениях: внутренних осей 9 и внешних осей 10. Кардановый подвес обеспечивает поворот корпуса 1 аппарата при его колебаниях относительно капсулы 7, что позволяет гиростабилизировать вертикальную ось капсулы.

Капсула 7 имеет прозрачный цилиндрический кожух. В верхней перегородке кожуха установлены матричные светодиодные излучатели 11 и охлаждающие патроны 12 со льдом. В нижней части кожуха 7 по периферии размещены видеокамеры 13.

В нижней части АА размещен приборный отсек 14, который предусмотрен для размещения аккумуляторов, бортового компьютера и другого массивного оборудования.

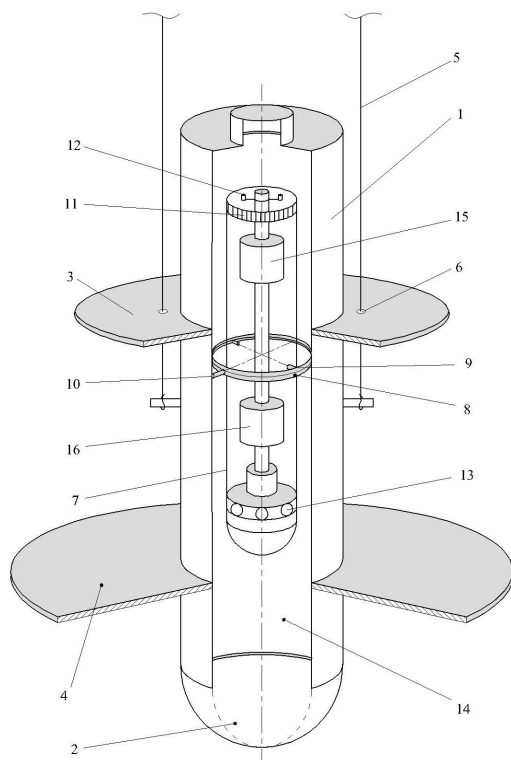


Рис.1. Автономный аппарат с гиросtabilизированной платформой в кардановом подвесе:
1 - цилиндрический кожух;
2 - полусферический обтекатель;
3, 4 - диски аэродинамической стабилизации;
5 – стропы;
6 - вертикальные отверстия;
7 - гиросtabilизированная платформа;
8 - кольца с двумя парами осей, расположенных во взаимно перпендикулярных направлениях;
9 - внутренние оси;
10 - внешние оси;
11 – излучатели;
12 - охлаждающие патроны со льдом
14 - приборный отсек
15, 16 – роторы, вращающиеся в противоположных направлениях

По оси цилиндрической капсулы расположены два ротора 15 и 16, вращающиеся в противоположных направлениях и обеспечивающие при кренах АА вертикальное положение капсулы в пространстве.

Ориентировочные массогабаритные показатели предложенной конструкции АА следующие: масса 130-160 кг, длина – 1500-2000 мм, диаметр корпуса – 450-600 мм, диаметр дисков – 750-1000 мм, диаметр гиросtabilизированной платформы – 300-400 мм.

Диаметр каждого ротора гироскопа - 250 мм. Число оборотов его вращения – 3000 об./мин. Суммарный кинетический момент двух роторов - $3,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Модернизация автономного аппарата, осуществляющего при спуске на тросовой подвеске внутри функционирующей дымовой трубы послойный оптический контроль её внутренней поверхности, заключается в стабилизации пространственного положения оптической оси путем размещения видеокамер внутри автономного аппарата на гиросtabilизированной платформе в кольцевом кардановом подвесе. Модернизация обеспечивает повышение разрешающей способности контроля (трещин в футеровке размером 1 мм), и одновременно, трехкратное снижение расхода энергии на подсветку.

Список литературы

1. Акатьев В.А., Александров А.А., Волкова Л.В., Суцев С.П. Способ контроля внутренней поверхности дымовой трубы и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RUS 2545062. 26.08.2013.

2. Акатьев В.А., Суцев С.П. Об оценке эксплуатационной безопасности дымовых труб с помощью мобильного комплекса // Научный журнал проблем комплексной безопасности. 2005. № 1. С.77-91.

3. Суцев С.П., Ларионов В.И., Акатьев В.А. и др. Техническое диагностирование футеровок промышленных дымовых труб без остановки технологических процессов // Безопасность труда в промышленности. - 2003.- № 6. - С.38-41.

4. Калугин В.Т., Стрижак С.В. Выбор аэродинамической компоновки аппарата-зонда, обтекаемого турбулентным закрученным потоком газа // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э.Баумана, 10.10.2012. <http://technomag.edu.ru/doc/461853.html>.

5. Akat'ev V.A., Metelkin E.V., Volkova L.V. Intratubal optical Defectoscopy of Working chimneys // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. T. 51. № 9. С. 587-593.

УДК 631.576.331.2: 681.542.4

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ЗЕРНА И СЕМЯН
RESEARCH ON CONNECTIONS BETWEEN ELECTRICAL AND
PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF GRAIN AND SEED**

Юрий Петрович Секанов* , Михаил Александрович Степанов,
Анна Сергеевна Колесникова***
Yuriy P. Sekanov* , Mikhail A. Stepanov** , Anna S. Kolesnikova*****

**Российский НИИ сельскохозяйственных приборов, Россия, Москва
(ОАО «РНИИ «Агроприбор»)*

**Russian research institute of agricultural instruments, Russia, Moscow
(e-mail: u.sekanov@gmail.com)*

***ООО «Техносерв - менеджмент», Россия, Москва*

*** ООО «Technoserv – management», Russia, Moscow
(e-mail: mastepanov@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: Приведены результаты исследований взаимосвязей электрических и физико-химических свойств зерна и семян широкого спектра культур.

Abstract: The result of the investigation of correlation between electrical and physicochemical properties of the grain and culture broad spectrum seeds

Ключевые слова: прибор, влагомер, электрическая емкость, частота, зерно, семена, свойства, натура, объемная плотность, всхожесть, корреляция

Keywords: device, hygrometer, capacitance, frequency, grain, seeds, properties, natural, bulk density, germination, correlation

Интенсификация процессов производства и возрастающие требования к качеству сельскохозяйственной продукции предъявляют высокие требования к техническим средствам, используемым в управлении технологическими процессами, в части быстродействия и достоверности получаемой информации. В этой связи, направлению создания измерительной техники и средств автоматизации, базирующихся на неразрушающем контроле, уделяется большое внимание. Метод неразрушающего контроля получил наиболее широкое применение в приборах для определения влажности зерна и семян. Первые образцы таких влагомеров были созданы в первой трети прошлого столетия. В настоящее время в зернопроизводстве средства измерений влажности (полевые, поточные автоматические, лабораторные) играют определяющую роль в обеспечении качества и безопасности продукции, энергоресурсосбережении при уборке, обработке и хранении.

Развитие науки и практики в области влагометрии сыпучих и волокнистых растительных материалов получило отражение в большом числе публикаций [1, 2, 3 и др.].

На уровне производителей зерна доминируют электрические влагомеры, среди которых в настоящее время более 80% составляют приборы зарубежных фирм. Накопленный опыт применения приборов показывает, что их метрологические и эксплуатационные характеристики не в полной мере отвечают требованиям современных технологий. Практика выдвигает требования и к расширению функциональных возможностей влагомеров в части экспресс контроля других важных качественных характеристик зерна и семян. Улучшение метрологических, эксплуатационных характеристик и расширение функций приборов

возможно при расширении и углублении знаний о взаимосвязях электрических и физико-химических свойств контролируемых материалов.

Проблемой, решение которой сопровождается фактически всю историю развития неразрушающего контроля влажности, является компенсация влияния природы (N) материалов в измерительной ячейке датчика. Причем, решение этой проблемы ограничивается, главным образом, основными зерновыми культурами, свойства которых как объектов измерения влажности изучены наиболее полно. Вместе с тем, задачи измерения влажности охватывают значительно больший перечень культур, физико-химические свойства которых существенно отличаются от зерновых: овощные, бахчевые, бобовые и др.

Кроме того, есть факторы, которые влияют на поведение материала в электрическом поле, но могут не иметь тесной связи с природой. Выявление, разработка способов компенсации их влияния на результаты измерений влажности или использования в качестве нового информативного параметра о зерне является резервом дальнейшего повышения достоверности измерений и расширения функциональных возможностей электрических влагомеров.

Исследования выполнены на частоте 50 МГц с использованием диэлектрического влагомера РМ 600 (модель 6040) производства японской фирмы Kett Electric Laboratory. Емкость для образца, равная 240 см^3 , вмещает репрезентативную пробу контролируемого материала. Первичный измерительный преобразователь коаксиальный с межэлектродным расстоянием 18 мм. Наружный электрод превышает по высоте внутренний на 20 мм. Объем пробы заполняет измерительную ячейку по высоте на 15 мм ниже верхней кромки центрального электрода. Такая конструкция позволяет устранить погрешность, вызванную неоднородностью электрического поля у краев электродов. Измерения выполнены на коде 00, отражающем электрическую емкость и вес контролируемой пробы. Наличие в приборе весов позволяет решить две задачи: обеспечить измерение природы контролируемой пробы зерна и компенсировать ее влияние на результаты измерений влажности.

Наши исследования с использованием зерна пшеницы Московская 39 кондиционной влажности показали, что обеспечивается высокая воспроизводимость результатов измерений объемной плотности (ρ) прибором и природы зерна с использованием пурки ПХ-1. Связь этих параметров отражает линейное уравнение с коэффициентом корреляции $r = 0,98$

$$\rho = 1,103N - 85,51 \quad (1)$$

Таким образом, применяемый в работе прибор позволяет получить объективные результаты проводимых исследований. Оценка используемого в приборе метода компенсации влияния ρ на результат измерений влажности является задачей самостоятельного исследования.

Натура является комплексным показателем, который отражает не только внешнюю (форму, размеры, состояние поверхности и др.), но и внутреннюю структуру зерна (содержание жира, золы, белка, клейковины и др.). Поэтому изучение связи природы с электрическими параметрами зерновой массы будет отражать в определенной степени и содержание этих веществ.

Объектом исследований являются зерно основных культур (пшеница, рожь, ячмень, овес, кукуруза) и семена овощных и бахчевых культур. Всего 26 наименований с широкой вариацией их физических и химических свойств. В экспериментах использовали сухие образцы зерна (7,2%...10,1%) и семян (4,1%...6,9%), хранившиеся от 2 до 3-х лет в лабораторном помещении при температуре от 18 до 24⁰С.

Известно, что влияние объемной плотности на электрические свойства зерновой массы в наибольшей степени проявляется на сухом материале [4]. В этой связи использование в работе сухих образцов зерна и семян позволяет наиболее полно отразить связь этих параметров и минимизировать эффект влияния влажности на полученные результаты.

Исследования показали, что для всего перечня культур имеет место тесная связь электрической емкости (С, пФ) с объемной плотностью (ρ , г/см³) зерна и семян в измерительной ячейке датчика (Рис. 1).

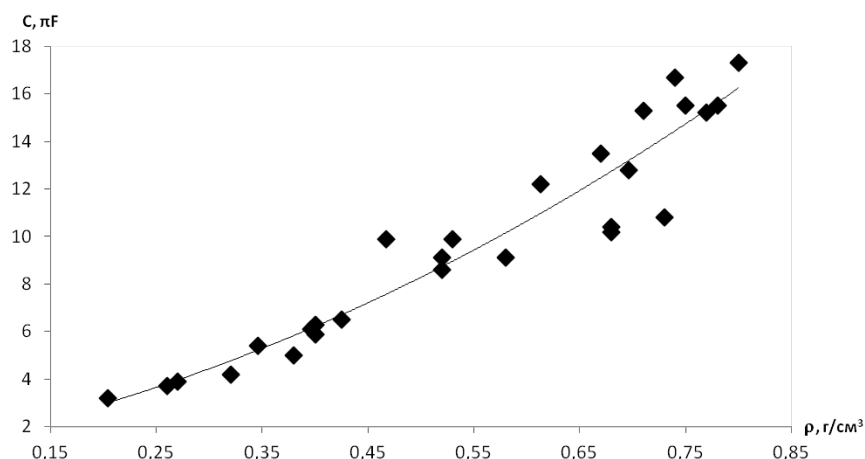


Рис. 1 Связь электрической емкости с объемной плотностью зерна и семян.

Полученная зависимость аппроксимирована уравнением второго порядка с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9113$

$$C = 14,593\rho^2 + 7,5598\rho + 0,854 \quad (2)$$

Данные раздельной обработки результатов исследований взаимосвязей $C = f(\rho)$ для зерна (10 образцов) и семян (16 образцов) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Аппроксимирующие уравнения взаимосвязей электрической емкости и объемной плотности для зерна и семян.

Объект изучения	Уравнения аппроксимации	R^2	S	Примечание
Зерновые культуры	$C = 9,2346\rho^2 + 11,604\rho + 1,7024$	0,9146	2,176	S-чувствительность электрической емкости к изменениям объемной плотности $\rho=0,1\text{г/см}^3$
Семена овощных и бахчевых культур	$C = 17,855\rho - 0,9589$	0,9441	1,79	

Из приведенных данных следует, что между C и ρ для каждого объекта изучения характерна тесная связь, а чувствительность электрической емкости (S) к изменениям объемной плотности для зерна выше, чем для семян, что может быть вызвано более сильным влиянием его внутренней структуры.

Установлено, что влияние плотности семян (ρ_c) овощных и бахчевых культур на электрическую емкость существенно слабее, чем влияние их объемной плотности. Электрическая емкость с плотностью семян связана линейной зависимостью с положительной корреляцией ($r = 0,65$).

$$C = 9,936\rho_c - 3,334 \quad (3)$$

Откуда следует, что при свободной засыпке семян в измерительную ячейку датчика влияние их внешних факторов (форма, размеры, поверхность и др.) на электрический параметр является превалирующим по сравнению с внутренней структурой. Разработка методов и технических средств компенсации их влияния остается важной задачей повышения метрологических характеристик создаваемых средств измерений.

Такие составляющие внутренней структуры семян, как содержание жира и золы, в наших исследованиях не оказали заметного влияния на электрическую емкость. Для овощных культур лучшие оценки их взаимосвязи с электрической емкостью дали линейные уравнения с положительной корреляцией для жира ($r = 0,35$) и отрицательной для золы

($r = -0,34$). Аналогичной зависимости электрической ёмкости от содержания золы получены для ржи и пшеницы в работе [5].

Всхожесть относится к важнейшим качественным показателям зерна и семян. Однако ее определение длительно и трудоемко. Поиск методов и технических решений быстродействующей оценки данного параметра непосредственно производителем зерна является актуальной задачей. Результаты работы [6] позволяют позитивно рассматривать проведение исследований в этом направлении.

Зерновая масса состоит из разнокачественных зерновок, отличающихся свойствами. С тем, чтобы не размывать связей электрических параметров с продуктивными (всхожесть, энергия прорастания) свойствами зерна в исследованиях использовали зерновую массу с однородными свойствами. Возможен ряд технических решений, позволяющих осуществить разделение исходной массы зерна на фракции с достаточно однородными свойствами: с использованием рассевов, диэлектрических сепараторов и др. Качественно решить эту задачу позволяет применение диэлектрических сепараторов, в которых определяющим фактором разделения является объемная плотность, аккумулирующая в себе внешнюю и внутреннюю неоднородности. Базируясь на параметрах фракций зерновой массы ячменя, полученных диэлектрическим сепарированием [5], были получены корреляционные зависимости электрической емкости от всхожести ($B, \%$) и энергии прорастания ($\mathcal{E}, \%$):

$$C = -0,0197B^2 + 3,3618B - 129,84 (R^2 = 0,9539) \quad (4)$$

$$C = -0,016\mathcal{E}^2 + 2,071\mathcal{E} - 53,07 (R^2 = 0,9291)$$

Откуда следует, что электрическая ёмкость тесно связана с всхожестью и энергией прорастания ячменя. Для этих зависимостей характерна близость по уровню корреляционной связи параметров, что объясняется тесной связью всхожести и энергии прорастания зерна. Отражение этой связи является линейное уравнение с коэффициентом корреляции $r = 0,93$, приведенное ниже:

$$B = 0,83\mathcal{E} + 31,67 \quad (5)$$

Влажность фракций в выполненных исследованиях не является фактором влияния на полученные оценки взаимосвязей электрических и биохимических свойств, так как ее изменения от фракции к фракции не существенны.

В заключение статьи отметим, что при огромном многообразии культур и сортов зерна и семян, отличающихся внешней и внутренней неоднородностями, компенсация влияния объемной плотности в средствах неразрушающего контроля их свойств, остается важной задачей научных исследований. Полученные в результате выполненных исследований зависимости электрической ёмкости от всхожести и энергии прорастания ячменя позволяют рассматривать задачу создания средства быстродействующего неразрушающего контроля всхожести перспективной.

Список литературы

1. Берлинер М.А. Измерение влажности. М.: Энергия, 1973. с. 400
2. Секанов Ю.П. Влагометрия сельскохозяйственных материалов. М.: Агропромиздат, 1985. с. 160
3. Кричевский Е.С., Волченко А.Г., Галушкин С.С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. с. 136
4. Баталин М.Ю. Экспериментально-теоретическое обоснование основных параметров полевого влагомера зерна и семян сельскохозяйственных культур. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: Всесоюзный НИИ механизации сельского хозяйства (ВИМ), 1981. с.20
5. Секанов Ю.П. Результаты исследований электрических свойств зерновой массы. Труды Всероссийского НИИ механизации сельского хозяйства (ВИМ). Том 129. Москва, 1997. с.137-145
6. Секанов Ю.П., Левина Н.С., Шалаева Л.А. Исследование свойств фракций зерна ячменя, выделенных диэлектрическим сепарированием. //Техника в сельском хозяйстве. 2004. №2. с.34-36

УДК 681.5: 664.723

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ СУШКОЙ ЗЕРНА В СУШИЛКАХ
ШАХТНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ
GRAIN DRYING SYSTEM AUTOMATED CONTROL IN SHAFT-TYPE DRYERS BASED
ON FUZZY SETS**

**Константин Владимирович Соснин, Виктор Васильевич Ткачев,
Николай Иванович Школа
Konstantin V. Sosnin, Victor V. Tkachev, Nickolay I. Shkola**

*Национальный Горный Университет, Украина, Днепрпетровск
National Mining University, Ukraine, Dnepropetrovsk
(e-mail: sosnink@nmu.org.ua)*

Аннотация: Статья посвящена повышению качества сушки зерна путем автоматизации процесса управления. Модель управления процессом сушки на основе нечетких множеств учитывает параметры, в том числе, не измеряемые техническими средствами: цвет, запах, качество оболочки. Оценка управления сушкой зерна представлена в числовом и лингвистическом представлении.

Abstract: Control performance increasing of grain drying process by automation of process control is considered in this work. The model of control based on membership function and takes into account grain quality parameters including those not measured by technical equipment: grain's color, smell and quality of grain shell. The control performance index of grain drying process has been estimated in terms of numerical and linguistic representation.

Ключевые слова: шахтная сушилка, качество управления, нечеткие множества.

Keywords: shaft-type dryer, control performance index, fuzzy sets.

Сохранение качественных характеристик зерна на заготовительном предприятии, эффективность работы предприятия определяется качеством сушки.

Целью работы является повышение эффективности сушки зерна на основе усовершенствования методов и моделей автоматизированного управления на основе применения нечетких множеств в составе системы интеллектуальной поддержки принятия решений сушки зерна в сушилках шахтного типа. Объектом исследований является процесс управления сушкой зерна в сушилках шахтного типа. Предметом исследований методы и модели управления сушкой зерна в сушилках шахтного типа.

На 96 % предприятий используются шахтные сушилки, в которых зерно под действием гравитационных сил движется вниз и продувается горячим воздухом (зона нагрева) и холодным воздухом (зона охлаждения). Если зерно пересушить это приведет к избыточному снижению его веса, и возможно, к снижению качества зерна, к перерасходу топлива/энергии. Если зерно недосушить это приведет к дополнительным мероприятиям при хранении зерна, а именно: регулярному контролю температуры и мероприятиям по своевременному охлаждению зерна, т.е. потребует дополнительных ресурсов и энергозатрат.

Для обеспечения качественной сушки Сотрудники лаборатории качества не реже чем каждые два часа, отбираются пробы зерна на анализ, результаты заносятся в журнал. Часть параметров качества зерна определяется при помощи технических средств, а другая часть - органолептическим методом. Качество оболочки, цвет, запах зерна не измеряются техническими средствами, а субъективно оцениваются органами чувств. И эти качественные параметры используют опытные операторы для управления процессом сушки зерна. Оператор на основании результатов лабораторных анализов качества (раз в 2 часа), системы автоматического контроля состояния оборудования и личного контроля (в любой момент) оценивает «состояние процесса сушки». Ограниченность штатной системы контроля

параметров (только температура), длительность выполнения лабораторного анализа (больше часа), обуславливают выбор управляющего воздействия оператором на основании его личной оценки, его собственного опыта.

Задачей сушки является снижение влажности при сохранении других показателей качества зерна и семян. В целом задача сушки разделяется на правила для каждого параметра в виде формул. Для наиболее важного параметра – «влажность зерна после сушки» правило имеет вид:

$$откл K_3 B_{вых} = |K_3 B_{вых} - K_3 B_{вых.ц}| \rightarrow \min \quad (1)$$

где $откл K_3 B_{вых}$ – отклонение параметра влажность после сушки от целевого значения;

$K_3 B_{вых.ц}$ - целевое значение параметра влажность после сушки;

$K_3 B_{вых}$ - значение параметра после сушки.

Над решением проблемы, моделированием управления сушкой работал целый ряд научных школ [1, 2, 3, 4, 5]. Их исследования были направлены на создание моделей процесса сушки. Модели используют данные, не измеряемые на предприятиях, и не учитывали параметров субъективно оцениваемых оператором. Примерами не измеряемых на предприятии параметров являются: эмпирический коэффициент теплообмена; эмпирический коэффициент массообмена; влагосодержание (г/кг), барометрическое давление (мм.рт.ст.) и удельный вес (кг/м³) сушильного агента; коэффициент испарения воды со свободной поверхности (г/м²•ч•мм.рт.ст); доля геометрической наружной поверхности зерна, с которой происходит испарение по закону Дальтона и т.д. Наибольший интерес для практического использования выявилась попытка описать управление процессом сушки зерна в упрощенной модели нечеткого вывода [6, 7]. Однако предложенная авторами модель сушки из трех лингвистических переменных не отображала процесс сушки зерна на производстве, в ней отсутствовала оценка качества сушки. В результате анализа было выбрано направление создания многопараметрической модели на основе нечетких множеств, которая наиболее полно учитывает измеряемые и субъективно оцениваемые данные качества зерна после сушки.

В результате анализа были сформулированы следующие задачи:

- выполнить моделирование процесса управления сушкой зерна оператором на основе модели нечетких множеств, определить и исследовать качество управления для автоматизации поддержки принятия решений по выбору величины управляющих воздействий при сушке зерна;

- предложить техническую реализацию системы интеллектуальной поддержки принятия решений сушки зерна с подсистемой контроля влажности потока зерна в сушилках шахтного типа, оценить показатели эффективности ее использования.

Предложена оценка качества управления сушкой зерна с помощью числовой и лингвистической оценок. Для многопараметрической оценки выборки параметры сводятся к безразмерной величине – степени принадлежности, а также применяется лингвистическая и числовая оценки. Смысл лингвистической оценки при равной значимости параметров, выраженной формулой (2) означает, что выборке присваивается наименьшая лингвистическая оценка из всех лингвистических переменных входящих в выборку.

$$P(Z) = P(z_1, z_2, z_3, \dots, z_j) = \min[\mu_1(z_1), \mu_2(z_2), \dots, \mu_j(z_j)], \quad (2)$$

где $\mu_j(z_j)$ - степень принадлежности параметра j к целевому значению, $P(z_1, z_2, z_3, \dots, z_j)$

- функция принадлежности для параметров $z_1, z_2, z_3, \dots, z_j$. При этом наилучшему результату соответствует максимальное значение $P(Z)$. Такой способ оценки целесообразно использовать, когда любой из параметров одинаково влияет на качество и плохое значение одного не может быть исправлено хорошим значением другого.

При числовой оценке выборки (3, 4) находится сумма произведений отклонения от целевого значения степени принадлежности на весовой коэффициент лингвистической переменной.

$$D(Z) = \sum_{j=1}^r \alpha_j \cdot \mu_j(z_{\text{ЭТ}}, z_j), \quad (3)$$

$$\mu_j(z_{\text{ЭТ}}, z_j) = \mu_j(z_{\text{ЭТ}}) - \mu_j(z_j), \quad (4)$$

где α_j - весовые коэффициенты признаков ($0 \leq \alpha_j \leq 1$; $\sum \alpha_j = 1$); $\mu_j(z_{\text{ЭТ}})$ - целевая степень принадлежности по каждому j -му признаку, $\mu_j(z_j)$ - степень принадлежности по j -му признаку. $D(Z)$ - оценка по нескольким параметрам. При этом наилучший результат достигается при наименьшем значении оценки $D(Z)$. Такой способ оценки целесообразно использовать, когда плохое значение одного из параметров может быть исправлено хорошим значением другого.

На основании анализа процесса сушки зерна были обоснованы лингвистические переменные с функциями принадлежности к целевому значению, с лингвистической оценкой для пшеницы [8,9]. Используемые функции принадлежности отображают принадлежность значения параметра к целевому значению. Для параметра влажность зерна на выходе зерносушилки целевое значение задано в диапазоне 14-15% и оценивается степенью принадлежности равная единице. Всем значениям степени принадлежности дана лингвистическая оценка «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Для параметра отклонение запаха зерна после сушки от начального, степень принадлежности равная единице соответствует оценке отклонение запаха не ощущается.

На основании данных процесса сушки в условиях заготовительного предприятия выполнено имитационное моделирование с многопараметрической оценкой качества управления [8,9] в виде лингвистической и числовой оценок ситуации. Для наглядности, результаты многопараметрической оценки сушки зерна для пяти выборок изображается на плоскости. По величине оценки качества управления сушкой зерна принимается решение о сохранении значений управляемых параметров в базе знаний.

Выполненные исследования позволили сформулировать первый научный результат: впервые получена недетерминированная многопараметрическая математическая модель сушки зерна на основе нечетких множеств. Модель расширяется в соответствии с назначением зерна, нормативными документами и содержит априорные значения параметров, которые измеряются техническими устройствами и оцениваются человеком, в том числе, качество оболочки, цвет, запах зерна, использует оценку эффективности сушки.

Выполнено моделирование выходного состояния сушки зерна, при помощи алгоритма нечеткого вывода И. Мамдани, как наиболее подходящего способа формализации знаний оператора и натурального эксперимента [10, 11]. Для параметров представлены функции принадлежности, база правил по сушке пшеницы, как интегральный опыт операторов. Полученные выходные данные модели сравнивались с данными технологического процесса по сушке и экспертной оценкой. Результаты моделирования полностью совпали с журналом по сушке и экспертной оценкой, адекватны натурному эксперименту, позволяют прогнозировать выходное состояние сушки зерна через трехмерные аксонометрические представления. Качество оценивалось в числовом и лингвистическом представлении.

Выполненные исследования позволили сформулировать второй научный результат: получила дальнейшее развитие имитационная модель нечеткого вывода согласно алгоритма И. Мамдани на примере сушки зерна пшеницы в сушилке ДСП-32. Эта модель, в отличие от существующих, использует совместно с влажностью априорные значения параметров качества, необходимых для учета на заготовительном предприятии, в том числе, качество оболочки, цвет, запах зерна это позволяет прогнозировать значения выходных параметров процесса сушки.

На основании результатов исследований разработана функциональная структура и структура комплекса технических средств системы интеллектуальной поддержки принятия решений сушки зерна [12]. Она представляет собой на верхнем уровне компьютерную сеть с

автоматизированными рабочими местами ответственных за технологический процесс на предприятии, базой знаний. На нижнем уровне - промышленный контроллер, к которому подключена подсистема контроля технологических параметров (влажность, температура).

Предусмотрено два режима работы системы интеллектуальной поддержки принятия решений сушки зерна: обучение и поддержка принятия решений. В режиме обучения, используя недетерминированную модель с многопараметрической оценкой, возможно обучить эффективному режиму сушки, используя все возможные управляющие воздействия. Типовые правила (режимы) сушки, формируются с учетом многопараметрической оценки качества управления и сохраняются в базе знаний в виде продукций. Предполагается, что на предприятии для одной культуры продукционная база знаний содержит несколько десятков продукций.

При работе в режиме поддержки принятия решений, режим сушки выбирается оператором после указания значений контролируемых параметров (наиболее важными являются: культура, влажность и температура зерна до сушки, температура, влажность окружающей среды, качество клейковины и т.д.); целевых параметров режима сушки (наиболее важными являются: влажность после сушки, температура нагрева зерна и т.д.); целевой оценки эффективности сушки зерна в числовом и лингвистическом виде.

Опытная эксплуатация системы интеллектуальной поддержки принятия решений сушки зерна с подсистемой оперативного контроля влажности потока зерна [13, 14] повысило качество сушки зерна, количество качественно высушенного зерна [12]. Для параметра «влажность зерна после сушки» уменьшено более чем в два раза среднеквадратическое отклонение, увеличена с 0,56 до 0,87 относительная длительность нахождения в заданном допуске ($\pm 1,0\%$).

В условиях неполноты информации для построения модели управления сушкой зерна впервые предложено взаимосвязь значений параметров, характеризующих процесс сушки зерна, с качеством зерна после сушки представить недетерминированной моделью на основе нечетких множеств. При этом управление сушкой зерна оценивается измеряемыми и субъективно оцениваемыми параметрами, в том числе, качество оболочки, цвет, запах, а не только влажность и температура, что позволило повысить эффективность сушки зерна.

Список литературы

1. *Лыков А.В. Михайлов Ю.А.* Теория переноса энергии и вещества. Минск: Изд. Академии Наук БССР, 1959. 332 с.
2. *Краус В.Р.* Математическое описание процесса сушки в шахтных зерносушилках // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. 1967. № 9. С. 31–35.
3. Применение математических моделей для совершенствования процессов сушки зерна / [*Остапчук Н. В., Зелинский Г. С., Алейников В. И., Рыбак А. И., Гросул Т. Н., Одякоков В. А.*]. – М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1975. 76 с. – (Серия “Элеваторная промышленность”).
4. *Жидко В.И., Платонов П.Н., Митрофанов Ю.Н.* Пути комплексной автоматизации процесса сушки зерна // Автоматизация процессов сушки в пром-сти и сел. хоз-ве: сб. ст. / Всесоюз. совет НТО; Комитет по сушке. М., 1963. С. 41–54.
5. *Степанов М.Т.* Имитационная математическая модель процесса сушки зерна // Нове в технології зберігання та переробки зерна: Зб. наук. пр. Одес. держ. акад. харч. техн. М-во освіти і науки України. Одеса, 2002. № 24. С. 380–384.
6. *Mansor H. Noor S., Ahmad R., Taip F.S., Lutfi O.F.* Fuzzy Control of Grain Drying Process // 11th International Conference on Computer Modelling and Simulation 25-27 March 2009. Cambridge, UK. 2009. P. 9-13.
7. *Mansor H. Noor S., Ahmad R., Taip F.S., Lutfi O.F.* Intelligent control of grain frying process using fuzzy logic controller // Journal of Food, Agriculture & Environment. 2010. Vol.8(2). P.145–149.

8. Sosnin K., Tkachev V., Us S., Taradaichenko M. Multiobjective identification of convecting drying of grain based on fuzzy sets. Proceedings of the 19th International Drying Symposium, Lyon, France, August 24-27, 2014, ISBN:978-2-7598-1631-6.

9. Ткачев В.В., Ус С.А., Соснин К.В. Идентификация управления сушкой зерна в шахтных зерносушилках на основе нечетких множеств // 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) Иваново: Иван.гос. хим.-технол. ун-т. 2014. С. 121-128. ISBN 978-5-9619-0492-4

10. Ткачев В.В., Соснин К.В. Моделирование управления сушкой зерна в шахтной зерносушилке. // Наукові праці ОНАХТ Міністерство освіти і науки України. Одеса. 2014. № 46. Том.1. С. 223-229.

11. Ткачев В.В., Соснин К.В. Результаты моделирования управления сушкой зерна в шахтной сушилке. // Ползуновский альманах. 2014. №2. С. 87-92.

12. Соснин К.В. Система интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении сушкой зерна. Автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.13.07 «Автоматизация процессов управления». – Кировоград: КНТУ, 2015. 20с.

13. Просянык А.В., Клабуков В.Ф., Соснин К.В. Влагомер зерна в потоке - мал золотник, да дорог // Хранение и переработка зерна. 2002.№8(38). С. 44-46.

14. Просянык А. В., Клабуков В. Ф., Соснин К. В. Влагометрическая подсистема зерна в потоке (результаты опытной эксплуатации) // Хранение и переработка зерна. 2003. №10(52). С. 44-46.

УДК 664.723.047

**ШАХТНАЯ ЗЕРНОСУШИЛКА С ДВУМЯ КОНТУРАМИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ,
КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ
MINE GRAIN DRYER WITH TWO RECIRCULATION LOOP,
AS A CONTROL OBJECT OF THE DRYING PROCESS**

**Николай Иванович Малин
Nikolai I. Malin**

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени
К.А. Тимирязева, Россия, Москва
Russian state agrarian University – MAA after K.A. Timiryazev, Russia, Moscow
(e-mail: mali_nik@mail.ru)*

Аннотация: Дано описание схемы работы шахтной зерносушилки с двумя контурами рециркуляции. Приведены результаты моделирования процесса сушки зерна пшеницы при различных сочетаниях коэффициентов циркуляции в первом и втором контурах, влажности и температуры рециркулируемого зерна, начальной температуры и влажности сырого зерна. Установлены факторы, позволяющие управлять процессом сушки с позиций исключения явлений перегрева и пересушивания рециркулируемого в первом контуре зерна и получения просушенного зерна с заданными конечными параметрами.

Abstract: A description of the scheme of mine dryers with two recirculation loops. Simulation results wheat grain drying process for various combinations of the coefficients in the circulation first and second circuits, the humidity and temperature of recirculated grain moisture and initial temperature of raw grains. The factors that allow to control the drying process from the point of exclusion phenomena of overheating and drying grain recycled in the first circuit and obtaining the dried grains with given finite parameters.

Ключевые слова: Зерносушилка, рециркуляция, моделирование, пересушивание, перегрев, управление.

Keywords: grain dryer, recycling, modeling, overdrying, overheating, control.

Шахтная зерносушилка с двумя контурами рециркуляции конструктивно состоит из двух надсушильных бункеров, двух параллельно работающих (и расположенных) шахт (соответственно первого и второго контура рециркуляции) и напорных камер между ними (верхняя — для подвода агента сушки в 1-ю и 3-ю зоны сушки соответственно первого и второго контура рециркуляции; вторая, диагонально разделенная перегородкой, соответственно для подвода агента сушки во 2-ю зону сушки первого контура рециркуляции и атмосферного воздуха в зону охлаждения второго контура рециркуляции).

Согласно рис. 1, принцип работы этой зерносушилки заключается в чередовании циклов обезвоживания (после отлежки в надсушильных бункерах, где происходит полное выравнивание температуры между отдельными компонентами смеси, и частичное перераспределение влаги между сырыми и сухими зёрнами) плотного подвижного зерна при подводе к нему агента сушки в первом контуре рециркуляции, и плотного малоподвижного слоя зерна при подводе к нему, вначале агента сушки (в зоне досушки второго контура рециркуляции), а затем атмосферного воздуха (в зоне окончательного охлаждения второго контура рециркуляции).

Основное отличие схемы работы этой зерносушилки от ранее проанализированной автором шахтной зерносушилки с одним контуром рециркуляции [1], состоит в наличии второго контура рециркуляции, образованного делением надсушильной емкости на два равных бункера и возвратом в соответствующий надсушильный бункер части охлажденного зерна.

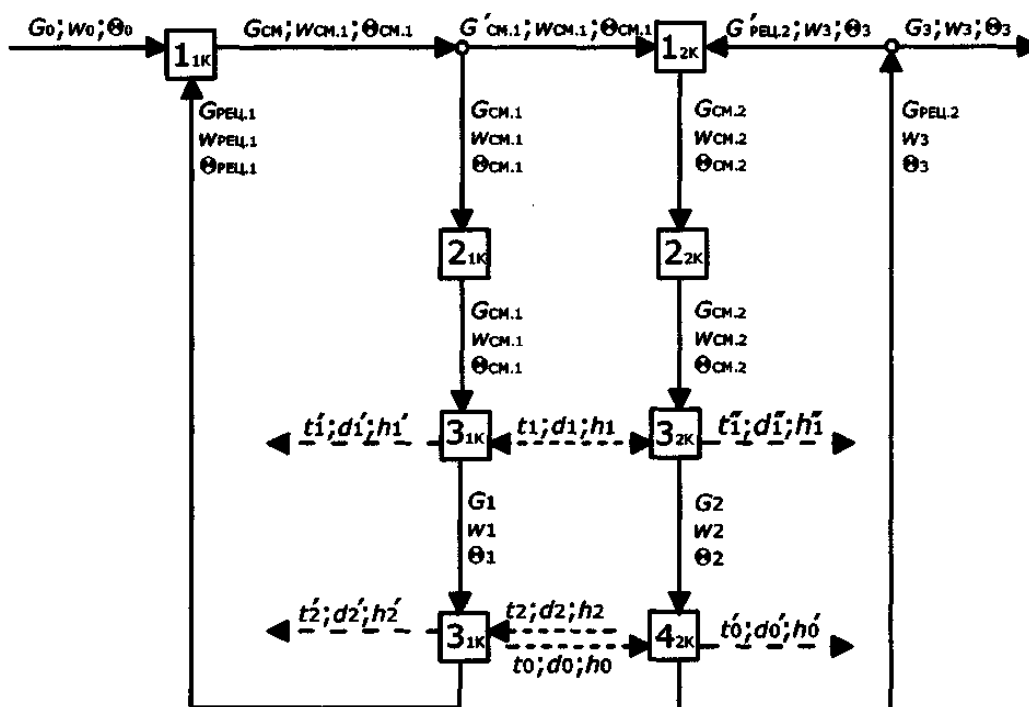


Рис. 1. Функционально-параметрическая схема шахтной зерносушилки с двумя контурами рециркуляции:

$1_{1к}, 1_{2к}$ — смешение зерна различной влажности и температуры, соответственно в 1-м и 2-м контурах рециркуляции; $2_{1к}, 2_{2к}$ — отлежка смеси зерна; $3_{1к}, 3_{2к}$ — подвод к зерну агента сушки; $4_{2к}$ — подвод к зерну атмосферного воздуха

Вновь подаваемое на сушку холодное сырое зерно (с параметрами G_0, w_0 и θ_0) смешивается с нагретым сухим рециркулируемым (с параметрами $G_{pec.1}, w_{pec.1}$ и $\theta_{pec.1}$), образуя многокомпонентную по температуре и влажности смесь (с параметрами $G_{см.}, w_{см.1}$ и $\theta_{см.1}$), с последующим разделением этой смеси на два потока с параметрами, соответственно $G'_{см.1}$ и $G'_{см.2}$.

Далее, при подводе агента сушки к плотному подвижному слою рециркулируемого в

первом контуре зерна с начальными параметрами $G_{см.1}$, $w_{см.1}$ и $\theta_{см.1}$, осуществляется последовательное изменение температуры смеси зерна до значений θ_1 и $\theta_{рец.1}$, и одновременное снижение его влажности до значений w_1 и $w_{рец.1}$.

Параллельно, при досушке и последующем охлаждении рециркулируемого во втором контуре плотного малоподвижного слоя зерна с начальными параметрами $G_{см.2}$, $w_{см.2}$ и $\theta_{см.2}$ (образуемого путем смешения двух потоков зерна с параметрами $G'_{см.1}$, $w_{см.1}$, $\theta_{см.1}$ и $G'_{рец.2}$, w_3 , θ_3), происходит изменение его температуры до значений θ_2 и θ_3 , и одновременное снижение его влажности до значений w_2 и w_3 .

Проблема управления процессом работы всех рециркуляционных зерносушилок заключается в необходимости определения соотношения между параметрами подаваемого на сушку в единицу времени исходного сырого зерна и возвращаемого в сушилку рециркулируемого зерна, с целью получения зерновой смеси с заданными параметрами по расходу, влажности и температуре.

Согласно [2] указанное соотношение можно определить при помощи коэффициента циркуляции N по нижеприведенной формуле

$$N = AK_{н(к)}(w_0^c - w_3^c) / [w_0^c - 0,011(w_0^c)^2 - 9,4], \quad (1)$$

где A — коэффициент пропорциональности, учитывающий особенности конструкции зерносушилки, значение которого для некоторых типов зерносушилок приведено в [3]; $K_{н(к)}$ — коэффициент, учитывающий особенности зерновой культуры ($к$) и назначение ее ($н$) после сушки; w_0^c , w_3^c — влажность сырого и просушенного зерна в расчете на массу сухого вещества, %; с учетом w (влажности на общую массу) $w^c = 100w / (100 - w)$.

Как показали исследования шахтной зерносушилки с одним контуром рециркуляции [1], основным фактором воздействия на параметры рециркулируемого зерна является именно коэффициент циркуляции N при рекомендованном [4] значении коэффициента пропорциональности $A = 3,0$.

В условиях введения второго контура рециркуляции совершенно естественна необходимость внесения коррективов в расчеты коэффициента A (и, как следствие, — N), значение которого следует определить не только для первого, но и для второго контуров рециркуляции.

В связи с этим мы, по аналогии с [1], при моделировании процесса (при рекомендуемых Инструкцией по сушке режимах сушки зерна мягкой пшеницы с хорошей клейковиной и влажностью $w_0 \leq 20$ %) исходили из условия, что после вывода сушилки на установившийся режим (т.е. после многократного пропуска исходного сырого зерна через зоны рециркуляции и досушки) и достижения заданной конечной влажности $w_3 \approx 14$ %, в сушилку вновь начинают подавать сырое зерно, с характерными для него значениями производительности G_0 (кг / с), влажности w_0 (%) и температуры θ_0 (°C).

Анализ результатов серии моделирования процесса сушки в первом контуре рециркуляции (различные сочетания $A_{1к}$, $w_{рец.1}$ и $\theta_{рец.1}$: $A_{1к} = 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25$ и $3,50$; $w_{рец.1} = 14,0, 14,2, 14,4, 14,6, 14,8$ и $15,0$ %; $\theta_{рец.1} = 40, 42, 44, 46, 48$ и 50 °C) при $\theta_0 = 5$ °C и $w_0 = 20,0$ %, подтвердил выводы, сделанные по результатам исследований одноконтурной шахтной рециркуляционной зерносушилки [1], а именно:

после вывода сушилки на установившийся режим и начала подачи в сушилку сырого зерна, процесс сушки в первом контуре рециркуляции стабилизируется (с колебаниями влажности $\pm 0,01$ % и температуры $\pm 0,1$ °C) независимо от начальных параметров рециркулируемого зерна (по $w_{рец.1}$ и $\theta_{рец.1}$) через 7 ... 10 циклов, а если принять во внимание допускаемый (согласно Инструкции по сушке) разброс значений влажности просушенного зерна, т.е. в данном случае после второго контура рециркуляции, $\pm 0,5$ %, то на подобный «стабильный» режим зерносушилка выходит уже через 2 ... 3 цикла прохождения смеси зерна через первый контур рециркуляции;

при $A_{1к} = 2,75$ и ниже (до $A_{1к} = 2,25$) на фоне пересушивания рециркулируемого зерна ($w_{рец.1} = 13,88...13,22$ %) наблюдается его серьезный перегрев (от 4,7 до 21,7 °С);

при $A_{1к} = 3,25$ и выше температура рециркулируемого зерна составляет $\theta_{рец.1} = 45,6...42,4$ °С, что влечет за собой более низкую эффективность межзернового контактного тепло- и влагообмена и, соответственно меньшую величину влагосъема (со снижением коэффициента производительности k_g до значений 0,97...0,95);

при $A_{1к} = 3,00$ температура рециркулируемого в первом контуре зерна (независимо от принятых исходных значений $w_{рец.1}$ и $\theta_{рец.1}$) в большей мере приближается к предельной температуре нагрева (в данном случае $\theta_{рец.1} = 50$ °С), а потому может быть принято оптимальным;

Анализ результатов серии моделирования процесса сушки во втором контуре рециркуляции (при $A_{2к} = 1,00...1,50$, с шагом 0,05) в привязке к приведенным выше параметрам работы первого контура рециркуляции (по $w_{рец.1}$ и $\theta_{рец.1}$ при $A_{1к} = 3,00$), позволил установить следующее:

при $A_{2к} = 1,00$ анализируемая зерносушилка работает как одноконтурная, со всеми характерными для нее особенностями, как по производительности (номинальная, условно принятая за 100 %, при коэффициенте производительности $k_g = 1$), так и по недостаточному эффекту охлаждения просушенного зерна;

при $A_{2к} = 1,05 ... 1,50$ на фоне незначительного перегрева (до 2,4 °С) и пересушивания рециркулируемого зерна ($w_{рец.1} = 14,09...13,51$ %) наблюдается незначительное повышение эффекта охлаждения просушенного зерна (см. табл.) при одновременном снижении производительности зерносушилки ($k_g = 0,99...0,95$).

Следующая серия моделирования, ориентированная на внесение возмущений в процесс сушки (путем подачи на сушку зерна различной начальной температуры и влажности: $\theta_0 = 0, 5, 10, 15$ и 20 °С; $w_0 = 18,0, 19,0$ и 20,0 %), при коэффициентах пропорциональности $A_{1к}$ и $A_{2к}$, равных соответственно 3,0 и 1,0, позволила установить следующее.

Снижение исходной влажности подаваемого на сушку зерна сопровождается пересушиванием рециркулируемого зерна (при $\theta_0 = 5$ °С и $w_0 = 20,00...18$ % $w_{рец.1} = 14,09...13,51$ %), увеличением расходов G_0 (кг / с), $G_{см}$ (т / ч) и производительности ($k_g = 1,00...1,05$), снижением влажности $w_{см.1}$ (и $w_{см.2}$), при практически неизменном значении температуры $\theta_{см.1}$ (и $\theta_{см.2}$), °С.

Параметры зерна, как функция коэффициента пропорциональности $A_{2к}$

Параметры зерна (рис. 1)	Коэффициент пропорциональности $A_{2к}$ (при $A_{1к} = 3,00$)										
	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50
Производительность:											
G_0 , кг / с	8,88	8,83	8,78	8,73	8,69	8,65	8,60	8,57	8,54	8,50	8,47
$G_{см}$, т / ч	95,2	94,7	94,1	93,5	93,1	92,6	92,2	91,7	91,4	90,9	90,6
Температура, °С:											
$\theta_{рец.1}$	49,6	49,9	50,2	50,6	50,8	51,1	51,4	51,7	51,9	52,2	52,4
$\theta_{см.2}$	34,6	33,9	33,3	32,7	32,1	31,6	31,0	30,4	30,0	29,6	29,1
θ_2	41,7	41,2	40,6	40,4	39,9	39,5	39,2	38,9	38,6	38,4	38,1
θ_3	17,3	16,9	16,6	16,2	15,9	15,6	15,4	15,1	14,9	14,7	14,5
Влажность, %:											
$w_{рец.1}$	14,09	14,05	14,01	13,97	13,94	13,91	13,88	13,84	13,82	13,78	13,76
$w_{см.2}$	16,07	15,95	15,84	15,73	15,64	15,56	15,49	15,41	15,35	15,29	15,24
w_2	14,37	14,36	14,34	14,33	14,33	14,32	14,31	14,31	14,30	14,29	14,29
w_3	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Коэффициент k_g	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,95

Подача на сушку зерна с начальной температурой $\theta_0 = 0 \dots 20$ °С при влажности $w_0 = 18,0$ % сопровождается изменением температуры рециркулируемого зерна (служащей в качестве индикатора предельной температуры нагрева зерна в зерносушилке) в пределах $59 \dots 50$ °С, а при влажности $w_0 = 20,0$ % — в пределах $51,0 \dots 45,7$ °С, при коэффициентах производительности k_g , соответственно $1,02 \dots 1,19$ и $0,97 \dots 1,10$.

Выводы:

в достаточно широком диапазоне изменения начальных значений влажности и температуры сырого зерна, уже за $7 \dots 10$ циклов происходит самовыравнивание параметров зерна (с абсолютной погрешностью по влажности $\pm 0,01$ % и температуры $\pm 0,1$ °С), циркулируемого в первом и втором контурах рециркуляции;

введение второго контура рециркуляции, наряду с незначительным повышением эффективности охлаждения просушенного зерна, приводит к некоторому перегреву и значительному пересушиванию рециркулируемого в первом контуре зерна, на фоне снижения производительности (до $k_g = 0,95$) и, естественно, энергоэффективности;

в условиях подачи на сушку зерна влажностью $w_0 \leq 20,0 \dots 18$ % при переменных значениях температуры θ_0 (°С), основным фактором воздействия на температуру $\theta_{\text{рец.1}}$ (°С) и влажность рециркулируемого зерна $w_{\text{рец.1}}$ (%), для предотвращения его перегрева и пересушивания, является температура t_2 (см. рис. 1);

характерные особенности второго контура рециркуляции (особенно при $w_0 < 20$ %) определяют целесообразность определения для него коэффициента циркуляции не по выражению (1), а из соотношения $N_{2к} = A_{2к}$;

выбор оптимального значения коэффициента пропорциональности $A_{2к}$ (при оптимальном значении $A_{1к} = 3,0$) несомненно связан с условиями конкретно решаемой задачи: если необходимо выдержать условие $(\theta_3 - t_0) \leq 10$ °С, то совершенно очевидна необходимость понижения температуры t_2 , с сопутствующим дополнительным снижением производительности (и энергоэффективности); если необходимо использовать только эффект саморегулирования за счет полного перевода зерносушилки на работу по принципу сообщающихся сосудов (элемент автоматизации процесса сушки, когда производительность зерносушилки можно регулировать задвижкой подачи сырого зерна), то достаточно значения $A_{2к} = 1,05 \dots 1,10$ при практически неизменной производительности и энергоэффективности;

изменение параметров подаваемого на сушку сырого зерна сопровождается изменением расходов зерновой смеси, циркулирующей в первом и втором контурах рециркуляции, поэтому на данный момент нерешенным остается вопрос эффективности организации работы рециркуляционных зерносушилок без учета оптимальных значений коэффициентов циркуляции $N_{1к}$ и $N_{2к}$, когда согласно [2] нории производительностью 350 т / ч загружают так, чтобы амперметр показывал $60 \dots 70$ А, производительностью 175 т / ч — $35 \dots 40$, нории производительностью 100 т / ч — $20 \dots 25$ А.

Список литературы

1. *Малин Н.И.* Анализ схемы работы шахтной рециркуляционной зерносушилки с позиций управления процессом сушки // Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК (ПРЭТ-2014). Сборник трудов Международной научно-технической конференции. Иваново, 2014. т.1. С. 58...64.
2. *Малин Н.И.* Справочник по сушке зерна. М.: Агропромиздат, 1986. 159 с.
3. *Малин Н.И.* Энергосберегающая сушка зерна: учебное пособие. М.: КолосС, 2004. 240 с.
4. *Малин Н.И.* Энергосбережение в теплотехнологиях и теплотехнических системах АПК: учебное пособие. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2011. 112 с.

УДК 664.7:621.3.029.6

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА THE ENERGY EFFICIENCY TECHNIQUE OF THERMAL PROCESSING OF GRAIN

Александр Викторович Зыков, Светлана Сергеевна Орлова
Aleksandr V. Zykov, Svetlana S. Orlova

Одесская национальная академия пищевых технологий. Украина, Одесса.
Odessa national academy of food technologies. Ukraine, Odessa.
(email: zav380@yahoo.com, svetlana-orlova-1976@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены пути повышения энергетической эффективности процессов предпосевной и послеуборочной термообработки зерна. Приведены эффективные способы доставки энергии к зерну при помощи тепловых труб и микроволнового поля. Показано влияние совместного действия микроволнового и низкочастотного излучения на всхожесть зерен.

Abstract: The methods of energy efficiency increasing of pre- and post-harvest thermal processing of grain are considered. The effective ways to deliver energy to the grain using heat pipes and microwave field are given. The effect of combined action of microwave and low-frequency radiation on the grain germination is shown.

Ключевые слова: энергоэффективность, тепловая труба, микроволновая энергия.
Keywords: energy efficiency, heat pipe, microwave energy.

В современных условиях постоянно растущей стоимости энергии, все более острой становится проблема рационального использования энергии. Совершенствование зерновых и пищевых производств в этом направлении может осуществляться не только усовершенствованием существующего оборудования, его модернизацией или внедрением импортного, а также и созданием принципиально новой высокоэффективной аппаратуры нового поколения и технологии для качественно новых производств.

Много лет в ОНАПТ проводятся исследования, посвященные эффективному использованию энергии. Эффективным путём решения таких проблем при термообработке зерна является использование в технологиях тепловых труб. Теоретическими и экспериментальными исследованиями показана высокая эффективность использования автономных двухфазных испарительного-конденсационных модулей для утилизации теплоты тепловых выбросов. Использование высокоэффективных методов подвода теплоносителя с помощью тепловых труб и термосифонов позволяет довести технологические установки до высокой энергетической совершенства использования, утилизации и рекуперации теплоты, значительно снизить затраты энергии.

С помощью термосифонов возможна реализация эффективной теплопередачи от газов к зерну без их смешивания. Это позволит получить экологически безопасные технологии сушки при снижении существующего уровня расхода топлива за счет рециркуляции теплоносителя. Представляется, что можно осуществить прямую теплопередачу “ газ - зерно” посредством ТС. Выигрыш может быть за счет того, что устраняется промежуточный теплоноситель - воздух (рис. 1 а).

Принципиально такие аппараты представляют собой прямоугольные шахты с поперечным омыванием гравитационным движущимся слоем зерна конденсационных участков термосифонов. Испарительные участки обогреваются продуктами сгорания. Одна боковая стенка шахты граничит с газоходом. В схеме поперечное обтекание слоем конденсационных участков ТС способствует эффективному перемешиванию зерна.

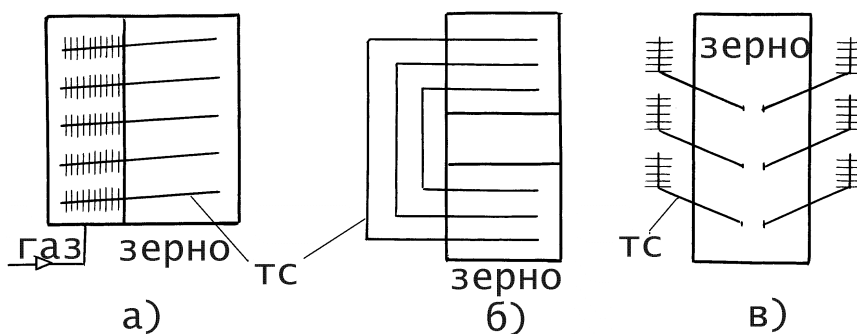


Рисунок 1. Схемы оборудования на основе ТС

В заготовительной системе АПК все большую актуальность приобретают проблемы хранения зерна. Достоинства термосифонов (автономность, возможность трансформации теплового потока, низкое термическое сопротивление и т.п.) предполагают целесообразность использования ТС в технологиях хранения зерна. В этом случае испарители ТС размещаются в зерновой массе силоса, зернохранилища. Конденсационные участки ТС выводятся за стенки зернохранилища (рис. 1.в). Тепловой поток из зерновой массы с помощью пучка ТС отводится в окружающую среду. Поскольку ТС обладают односторонней проводимостью, то возможно эффективное использование суточных колебаний температуры для стабилизации температурных режимов в зерновой массе. Автономность ТС позволяют отводить теплоту и в ночное время суток, когда температура воздуха во многих регионах Украины достаточна для снижения температуры зерновой массы до $7...14^{\circ}\text{C}$.

Эффективным путём комплексного повышения энергоэффективности при термообработке зерна является совместное применение различных схем с термосифонами в зерносушильных технологиях. Так блочная зерносушилка, разработанная на кафедре ПОЭМ, реализует принцип подвода энергии непосредственно к продукту, а также обеспечивает глубокую рециркуляцию энергоносителя [1]. Предложенные системы охлаждения сыпучих продуктов обеспечивают отвод тепла именно из тех мест, где есть перегрев, то есть с середины слоя продукта. Таким образом адресный подвод энергии туда, где она нужна позволяет значительно повысить энергоэффективность процессов за счет отсутствия потерь энергии с промежуточным теплоносителем, уменьшение перегрева или переохлаждения внешних слоев продукта и, соответственно затрат энергии на этот процесс.

Также одним из методов эффективной доставки энергии к продукту является использование микроволнового электромагнитного поля (МВ ЭМП). Целесообразность применения МВ ЭМП в пищевой промышленности, медицине, фармакологии в настоящее время определена достаточно ясно. Возможные области применения микроволновой энергии обнаружены сравнительно недавно, и переход от экспериментальной проверки результатов до широкого хозяйственного применения еще не состоялся. Однако перспективность данного направления очевидна.

В частности, доказано, что в основе МВ-обработки зерна лежит энергетическое воздействие электромагнитного поля на клеточную структуру зерна, при котором происходит своеобразное “включение” механизмов роста, что обеспечивает дружные всходы, силу роста и, наконец, повышение урожайности сельскохозяйственных культур.

Микроволновое поле используется для удаления влаги из сыпучих материалов, для получения заданной влажности семян зерновых и масличных культур, в том числе семенного фонда, а также выполняет дезинфекцию, обеззараживание продукта сушки от вредных бактерий, грибков, в том числе плесени [1]. С помощью использования микроволновой излучения можно решить ряд проблем АПК (рис. 2).

Для реализации микроволновой сушки особое значение имеет выбор параметров процесса сушки с учетом того, что зерно является биологически активным объектом.



Рисунок 2 – Использование микроволновой технологии в АПК

Решение проблемы сушильных технологий и поставленных задач требует использования энергии только на нагрев зерна и незначительного количества энергии на удаление влаги за пределы сушильной камеры, а также использования мягких режимов сушки зерна.

Для того, чтобы обеспечить снятие влаги одновременно из внешних и внутренних слоев зерновки необходимо комбинировать традиционную сушку с сушкой зерна на микроволновом оборудовании. Вариантом реализации комплексного подхода к сушке зерна может быть комбинированное взаимодействие физических факторов, которые обеспечиваются электромагнитным полем и псевдооживлением слоя путем продувки его воздухом из окружающей среды. Такой подход характеризуется системой показателей, которые позволяют уменьшить энергетические затраты, сократить продолжительность сушки зерна, улучшить экологическое состояние окружающей среды.

Одним из перспективных направлений является использование суммарного эффекта последовательного действия МВ-поля и низкочастотного магнитного поля (НЧ ЭМП) [2-4]. При этом уменьшаются энергетические затраты на обработку, стоимость установки в связи с использованием менее мощных генераторов микроволнового диапазона, которые не требуют применения системы жидкостного охлаждения. Результаты лабораторной всхожести и энергии прорастания, полученные после совместной обработки при разработанных режимах и проращивания зерна некоторых культур, приведены в табл. 1. Эксперименты выполнялись на установке, предназначенной для электромагнитной биостимуляции предпосевной обработки зернового материала «Биостим-2». Питание установки осуществлялось от сети переменного тока 220 В 50 Гц, потребляемая мощность не превышала 2000 Вт.

Обработку зерновых культур осуществляли импульсным синусоидальным магнитным полем частотой 50 Гц при величинах импульсного магнитного поля величиной 2,5; 5 и 10 мТс.

Проведены эксперименты по последовательной предпосевной обработке зерна различных культур с целью стимуляции их посевных качеств микроволновым и НЧ ЭМП подтвердили положительный эффект.

Лабораторные исследования по предпосевной обработке зерна НЧ ЭМП проведенные на различных резонансных частотах с последующим его проращиванием, определением всхожести и энергии прорастания показали, что при рекомендуемых режимах обработки

всхожесть и энергия прорастания возрастает на 15...20 % по сравнению с контрольными образцами. Следует отметить, что МВ ЭМП является более эффективным для уничтожения семенной инфекции, чем низкочастотное ЭМП. Обнаружено, что эффект последствия при микроволновой обработке сохраняется более длительное время, чем при низкочастотном методе воздействия на зерно различных культур.

Таблица 1 - Изменение энергии прорастания и лабораторной всхожести в зависимости от вида предпосевной обработки

Культура	Вид ЭМП	Энергия прорастания, %	Лабораторна всхожесть, %
Соя рядовая	контроль	48	53
	МВ ЭМП	64	66
	НЧ+МВ ЭМП	68	70
Кукуруза, сорт «Одесская-10»	контроль	45	63
	МВ ЭМП	54	71
	НЧ+МВ ЭМП	63	78
Ячмень рядовой	контроль	42	53
	МВ ЭМП	54	65
	НЧ+МВ ЭМП	58	74
Подсолнечник «Козацкий»	контроль	76	80
	МВ ЭМП	85	88
	НЧ+МВ ЭМП	87	92
Пшеница «Айсберг»	контроль	68	72
	МВ ЭМП	88	90
	НЧ+МВ ЭМП	90	92

Дальнейшее повышение эффективности микроволновой обработки зерна возможно за счет использования механической вибрации. Совместное воздействие механической вибрации и микроволновой обработки значительно снижает неравномерность распределения энергии в рабочей камере [5, 6].

Таким образом, использование технологий направленного энергетического действия позволяет значительно повысить эффективность технологий предпосевной и послеуборочной обработки зерна.

Список литературы

1. Бурдо, О.Г. Эволюция сушильных установок [Текст]: Монография / О.Г. Бурдо. – Одесса: «Полиграф», 2010. – 368 с.
2. Л.Г. Калинин, Г.И. Панченко, С.С. Орлова, Сравнительные характеристики микроволновой и низкочастотной магнитной обработки семян перед посевом // Хранение и переработка зерна. – 2004. – № 5. – С. 25-27.
3. Л.Г. Калинин, С.С. Орлова, Методика оцінки режимних параметрів мікрохвильової обробки сипких систем / Хранение систем // Хранение и переработка зерна, 2004, № 8. – С. 34-36.
4. Калинин Л.Г., Малиновський В.В., Орлова С.С. Експлуатаційні показники мікрохвильового пристрою “Мікростім-2” для передпосівної обробки насіння // Наукові праці ОНАХТ - Одеса: 2004. – Вип. 27. – С. 265-268.
5. Л.Г. Калинин, С.С. Орлова Облік нерівномірності розподілу електромагнітного поля в апараті для мікрохвильової обробки зерна // Зернові продукти і комбікорми. – 2005. – № 2. – С. 48-50.
6. Орлова С.С. Мікрохвильова обробка зерна під час руху у віброканалі. Автореф. канд. техн. Наук. – Одеса, ОНАХТ, 2006. – 18 с.

УДК 628.9.04

**ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТА НА
ПРЕДПРИЯТИЯХ С РАЗВИТЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ
THE FEASIBILITY OF IMPLEMENTING ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS IN
ENTERPRISES WITH A STRONG TECHNOLOGICAL CYCLE**

**Сергей Вадимович Гужов
Sergey V. Guzhov**

*Национальный исследовательский университет "МЭИ", Россия, Москва
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, Moscow
(e-mail: GuzhovSV@yandex.ru)*

Аннотация: Внедрение системы энергетического менеджмента на предприятиях с развитым технологическим циклом сдерживается отсутствием показанной гарантии последующего снижения объёмов энергопотребления. В статье приводится расчёт точности и доверительного интервала эффективности внедрения СЭнМ на основании достоверных статистических данных.

Abstract: The introduction of an energy management system for enterprises with developed production cycle is hampered by lack of guarantee shows the subsequent decrease of energy consumption. In the article the calculation of precision and confidence interval of the effectiveness of implementation of energy management based on reliable statistical data.

Ключевые слова: энергоменеджмент, точность, доверительная вероятность, энергосбережение.

Keywords: energy management, accuracy, confidence level, energy saving.

26 октября 2012 г. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 568–ст ГОСТ Р ИСО 50001-2012 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению» утверждён и введён в действие. Стандарт предлагает следующий порядок реализации изменений: «планирование (plan) – осуществление (do) – проверка (check) – действие (act)». За прошедшее время данная последовательность была дополнена: I– ситуационный анализ (макроэкономические факторы, кооперационные связи, конкурентная среда); II– прогнозные расчеты (динамика основных рыночных параметров, динамика технико-экономических параметров); III – планирование целей развития (формирование приоритетов развития, ТЭО целей, расчет экономической эффективности); IV – планирование стратегических действий (формирование программы развития, обеспечения конкурентоспособности, ресурсо- и энергосбережение).

Структура документа включает в себя концепцию цикличного прохождения этапов: энергетическое планирование; внедрение и функционирование; проверка; анализ со стороны руководства. Данный подход соответствует процессному подходу модели ключевых аспектов деятельности компании, включающий аспекты: финансовая деятельность, отношения с потребителями, обучение и развитие, организация бизнес-процессов внутри организации. Сегментами внедрения системы энергетического менеджмента, как и любого менеджмента, будут являться:

1. Обучение ответственного персонала и получение эффекта, не относящегося к области эффектов от технических решений;
2. Внедрение инструмента планирования, позволяющего накапливать профильную информацию, анализировать её, принимать управленческие решение и изучать эффективность вносимых изменений. Часто таким инструментом является электронная информационно-аналитическая система;

3. Реализация мероприятий, имеющих ожидаемым результатом снижение объемов потребляемых энергоресурсов.

Поскольку ГОСТ Р ИСО 50001-2012 может распространяться на все организации Российской Федерации, рассмотрим его влияние на структуру закупок компаний в данной отрасли.

Основной задачей при анализе влияния факта внедрения ГОСТ Р ИСО 50001-2012 на повышение активности в каждом и сегментов энергоменеджмента является задача определения минимального числа статистических данных (N_{MIN}), с достаточными для дальнейшего анализа точностью δ и доверительной вероятностью γ . Исследуемый массив (X) анализируемых данных (x_i) классифицируется как выборка k непрерывных случайных величин. При необходимости оценить математическое ожидание s наперед заданной точностью δ и доверительной вероятностью γ , минимальный объем выборки, который обеспечит эту точность, вычисляемую по формуле: $N_{\text{MIN}} = t^2 \cdot s^2 / \delta^2$. Для дальнейшего анализа примем к рассмотрению несколько значений доверительной вероятности γ с расчётом N_{MIN} для каждого из них по формуле (8). Результаты (табл. 1) наглядно демонстрируют γ и δ для двух наиболее часто встречающихся объемов выборки:

- I. при $k = 15$: $\delta = 25\%$ и $\gamma = 1\%$;
- II. при $k = 25$: $\delta = 5\%$ и $\gamma = 0\%$.

Таблица 1. Результаты расчётов $N_{\text{MIN}} = f(\delta, \gamma)$

доверительная вероятность (γ)	минимальное число статистических данных N_{MIN}		
	погрешность $\delta = 5\%$	погрешность $\delta = 25\%$	погрешность $\delta = 50\%$
$\gamma = 0,99$ ($t = 2,58$)	364	15	4
$\gamma = 0,95$ ($t = 1,96$)	210	8	2
$\gamma = 0,90$ ($t = 1,65$)	149	6	1
$\gamma = 0,80$ ($t = 1,29$)	91	4	1
$\gamma = 0,50$ ($t = 0,68$)	25	1	0

На практике часто необходимо решить оптимизационную задачу выбора между погрешностью измерений (чем больше погрешность, тем меньше точности в определении эффекта от внедрения элемента системы энергетического менеджмента) и доверительным интервалом (чем больше интервал, тем больше вероятность пропуска значимых факторов).

Не вызывает сомнений факт ускорения процессов внедрения энергосберегающих технологий посредством проведения предварительного обучения персонала, ответственного за проведение энергосберегающих мероприятий. Анализ взаимосвязи сегмента затрат на обучение ответственного персонала и сегмента затрат на реализацию энергосберегающих мероприятий (рис. 1) проводился на основании выборки 100% исходных данных полученных из официального сайта «Единой информационной системы в сфере закупок». Организациями, наиболее вложившимися в повышение квалификации, являются: в 2012 году Минэнерго России (37 616 500,00 руб.); в 2013 - ФГБУ "РЭА" Минэнерго России (8 000 000,00 руб.) и ПАО "ФСК ЕЭС" (5 962 245,00 руб.); в 2015 - ОАО "Межрегиональная распределительная сетевая компания Юга" (800 000,00 руб.).

Проведённый анализ с точностью не ниже 95% и доверительную вероятность $\gamma \geq 0,50$ показал связь между объемами инвестирования в обучение персонала и последующей отдачей в виде, как минимум, 50%-го роста подготовленных и реализованных проектов внедрения энергосберегающих технологий.

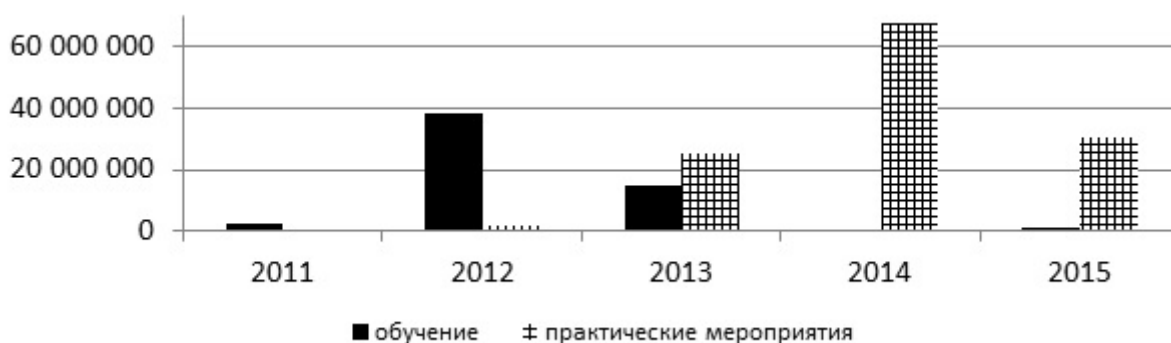


Рисунок 1. Статистика суммарных стоимостей закупок (руб.), совершающихся в сфере развития системы энергетического менеджмента.

Наибольший интерес представляет достоверность взаимосвязи расходов, связанных с внедрением стандарта ГОСТ Р ИСО 50001-2012 «Системы энергетического менеджмента...», и последующих снижений расходов на потребляемые энергоресурсы.

Рассмотрим тенденцию мероприятий «внедрение инструмента планирования», как элемент системы энергетического менеджмента. Наибольший объём данных, имеющий высокую точность (не ниже 80%) и доверительную вероятность $\gamma \geq 0,95$, накоплен в Министерстве Энергетики Российской Федерации. Снижение доли затрат на энергетические ресурсы в себестоимости продукции наблюдается у 62% компаний, причем у 18% из них снижение составило более 5%, а у 44% – от 3 до 5%. Анализ данных о доле затрат на ТЭР в стоимости произведённой продукции за 2011-2014 гг. показал, что внедрение элементов СЭнМ приводит к снижению затрат на ТЭР в среднем на 6-8% (рис. 2). Аналогичную точность (не ниже 80%) и (не ниже 95%) достоверность имеет статистическая информация по внедрению стандарта EN 16001-2009 в Евросоюзе, позволившему снизить энергопотребление в среднем до 30%.

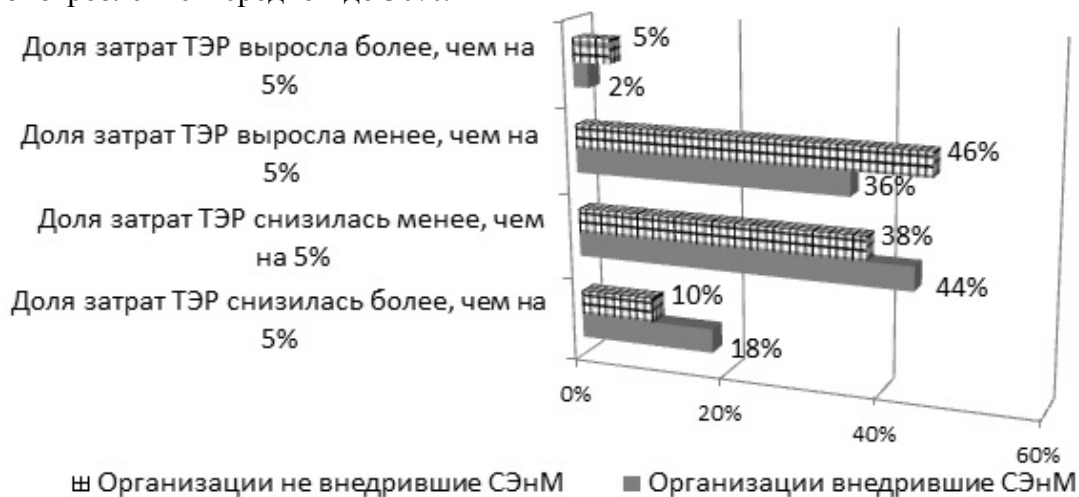


Рисунок 2.

Доля затрат на ТЭР в стоимости произведённой продукции за 2011-2014 гг. для компаний внедривших и не внедривших элементы СЭнМ.

Высокой точностью, но существенной индивидуальностью, а значит низкой индивидуальной доверительной вероятностью, обладают, например, следующие примеры внедрения элементы СЭнМ:

x1) для Воронежской области в результате внесения разработанных корректировок подпрограммы «Внедрение ресурсосберегающих технологий в ЖКХ области» на 2004-2010 годы получен дополнительный социально-экономический эффект в виде снижения потерь: электроэнергии – 9,1 %; тепловой энергии – 4,6 %; холодного и горячего водоснабжения – 5,3 %; газоснабжения – 6,4 %;

х2) для ОАО «Тульский комбайновый завод» в результате внедрения программы энергосбережения достигнуто 10%-е снижение потребления электроэнергии на единицу произведенной продукции;

х3) для ОАО «НИПОМ» внедрение информационного программного комплекса от производителя ООО «Сименс», как элемента СЭнМ позволило экономить до 10-15% затрат на энергопотребление;

х4) для г. Омска внедрённая система энергетического прогнозирования, применённая к проблематике методологии городского строительства, позволила предотвратить годовой ущерб от подтопления на селитебной территории в 83,93 млн. руб. (в базовых ценах 1984 г.);

х5) для ТНК-ВР результаты программы энергосбережения за 2010 год показали фактический объём экономии, равный 69 млн. долл.;

х6) внедрение элементов СЭнМ позволяет экономить до 50% инвестиций, затрачиваемых ранее на работы по повышению энергоэффективности;

х7) для предприятий ОАО «СУЭК-Красноярск» эффект от внедрения организационно-экономического механизма управления энергосбережением за три года реализации программы энергосбережения оценивается в 50 млн. рублей; для города Chattanooga, расположенного на юго-востоке США, внедрение smart greed как элемента системы энергетического менеджмента позволило достичь ежегодной экономии в 3.3 кВт·ч на потребителя;

х8) для ОАО «БЭСК» усовершенствование систем управления и внедрение более 100 тыс. приборов «интеллектуального» учёта привело к: сокращению автотранспортного парка и расходов на ГСМ до 20%; увеличению производительности труда на 60%; сокращению сроков формирования годовой программы закупок на 33%; увеличению полезного отпуска на 13% при снижении потерь (с 9.3% до 8.4% за 2011-2014гг.); сокращению средней продолжительности перерывов электроснабжения более чем в 2 раза;

х9) для ОАО «Арзамасский завод коммунального машиностроения» (ОАО «КОММАШ») внедрение системы АСКУЭ и реконструкция системы электроснабжения позволили существенно снизить аварийность в работе, приносящие ранее убытки на сумму до 9,4 млн. рублей в год. Полученная прямая экономия от повышения энергетической эффективности составила 5,5 млн. руб., что в совокупности составило около 40% от общей суммы энергозатрат предприятия;

х10) для кондитерского комбината ОАО «Кубань» модернизация производственных линий позволило увеличить объём производства на 20-25% и снизить себестоимость выработки на 19,4%. Единовременные инвестиции объёмом 15,5 млн. руб. принесли эффект на сумму 6,5 млн. руб. в первый год;

х11) для ОАО «Янтарьэнерго» при внедрении элементов системы smart greed доля экономии ожидается около 17%;

х12) для тайваньской компании AU Optronics внедрение СЭнМ позволило сократить потребление электрической энергии на 10%, что составляет 55 млн. кВт·ч;

х13) для австрийского муниципалитета Bad Eisenkappel внедрение СЭнМ сократило электропотребление на 25%.

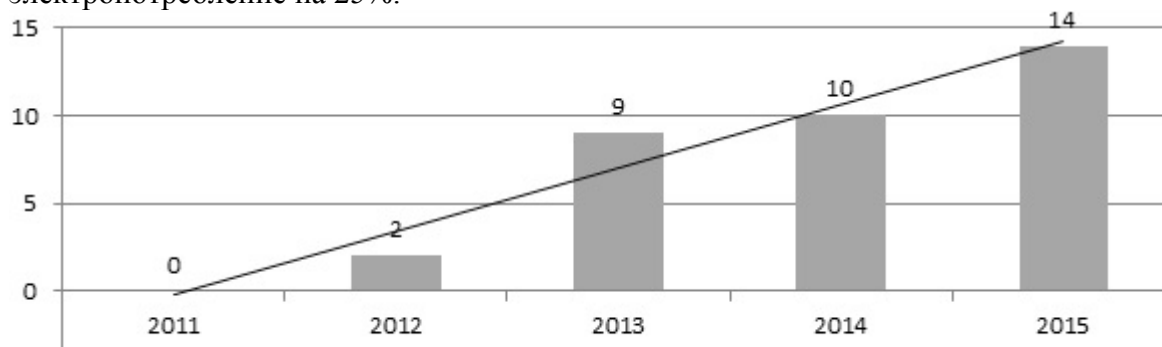


Рисунок 3.

Число энергосервисных контрактов, НМЦК свыше 200 млн.руб

Значительная часть внедрения энергосберегающих мероприятий происходит посредством энергосервисных контрактов. Выборка с официального сайта Единой информационной системы в сфере закупок по энергосервисными контрактам, имеющим начальную (максимальную) цену контракта (НМЦК) свыше 200 млн.руб. приведена на рис. 6. Несмотря на значительную сумму НМЦК заметен рост числа подобных контрактов, что подтверждает тезис о взаимосвязи сегмента затрат на обучение ответственного персонала и сегмента затрат на реализацию энергосберегающих мероприятий. Поскольку источник выборки является единой для всей Российской Федерации базой заключенных контрактов, то полученные данные (рис. 3) имеют с точностью не ниже 95% и доверительную вероятность $\gamma \geq 0,99$.

Агрегирование приведённой выборки: $X=[X1; X13]$ с точностью не ниже 75% и доверительной вероятностью $\gamma \geq 0,99$ позволяет сделать вывод о том, что внедрение системы энергетического менеджмента на предприятиях различного масштаба приводит в среднем к снижению объёмов потребления энергетических ресурсов не менее, чем на 8-17% относительно базового уровня.

УДК 691.11

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ОЦИЛИНДРОВАННЫХ БРЕВЕН MANAGEMENT OF PROCESS OF DRYING OF ROUNDED LOGS

Александр Андреевич Лукаш, Наталья Петровна Лукутцова
Alexander A. Lukasz, Natalya P. Lukuttsova

*Брянский государственный инженерно-технологический университет, Россия, Брянск
Bryansk state engineering-technological University, Russia, Bryansk
(e-mail: mr.luckasch@yandex.ru; natluk58@mail.ru)*

Аннотация: изложены проблемы сушки оцилиндрованных бревен, используемых при строительстве деревянных домов, предложены новые способы конвективной сушки, позволяющий ускорить процесс, разработаны зависимости для управления процессом сушки.

Abstract: the problems of the drying of round logs used in the construction of wooden houses, proposed new methods for convective drying, to expedite the process, developed according to control the drying process.

Ключевые слова: древесина, оцилиндрованное бревно, сушка, процесс, управление
Keywords: wood, round logs, drying, process, management.

Одним из важнейших направлений политики современной России является обеспечение широких слоев населения доступным по стоимости жильем. Основная часть населения страны проживает в многоквартирных домах, но при этом даже в городах с высокой плотностью населения, растет потребность в комфортном, просторном и экологически чистом индивидуальном жилье. Ничто не способно решить эту проблему лучше, чем деревянный дом [1].

Древесина обладает превосходными строительно-техническими характеристиками, обладает отличной теплопроводностью, равные по удержанию тепла, деревянная стена в четыре раза тоньше кирпичной. Стены деревянного дома «дышат», поддерживая, оптимальный для проживания человека, уровень влажности в помещении. Любой, кто входит в деревянный дом, чувствует себя в нем комфортно и уютно.

Строительства деревянных домов из оцилиндрованных бревен перспективно т.к. полезный выход при их производстве составляет 80% и не требуется применение токсичных фенолоформальдегидных клеев. При изготовлении оцилиндрованных бревен применяют свежесрубленную древесину повышенной влажности т.к. способов и режимов сушки бревен

большого диаметра нет. Сушка бревен производится в естественных условиях после установки сруба. Удаление влаги из внутренних слоев бревен происходит значительно медленнее, чем из наружных слоев. Вследствие этого на поверхности бревен появляются трещины, снижающие длительности эксплуатации из-за затекания в них воды.

Процесс сушки бревен в собранном доме длится от одного года до двух лет, за это время сруб дает усадку, составляющую 5-7% от высоты сруба. Усадка создает ряд неудобств при эксплуатации. При усадке сруба уменьшается высота стен, оконных и дверных проемов. Построенные дома из свежесрубленной древесины необходимо ежедневно проветривать дом, т.к. при высыхании древесины получается "парниковый эффект", благоприятный для развития грибков.

Для устранения трещин и усадки разработаны два способа сушки оцилиндрованных бревен. По первому способу предлагается сушить оцилиндрованные бревна изнутри через высверленное сквозное продольное отверстие при помощи устройства [2, 3]. Диаметр отверстий в оцилиндрованных бревнах выбирается в зависимости от несущей способности бревен [4]. Наличие замкнутых воздушных прослоек будет способствовать снижению теплопроводности оцилиндрованных бревен [5].

Однако для реализации этого способа потребуется применения специализированного оборудования, что в производственных условиях сделать весьма затруднительно. Более простым в техническом исполнении является способ конвективной сушки оцилиндрованных бревен, основанный на том, что перед началом сушки по всей длине бревна в поперечном направлении равномерно сверлят сквозные диаметрально отверстия [6]. Наличие сквозных отверстий ускоряет прогрев бревна по сечению и облегчает выход испарившейся влаги. Чем больше количество отверстий, тем быстрее будет происходить процесс сушки, который определяется конечной влажностью древесины.

Для установления влияния количества отверстий и продолжительности сушки на влажность древесины были проведены исследования [7]. При проведении исследований применялась лабораторная сушильная установка. Исследуемая древесина была заготовлена в Жуковском лесничестве Брянской области.

Постоянные факторы: начальная влажность древесины 23%; порода – сосна; диаметр оцилиндрованного бревна – 180 мм; длина образца – 600мм, диаметр отверстий – 28 мм, температура - 50⁰С. Диапазоны варьирования переменных факторов составляли: количество отверстий – от 0 до 10 шт, продолжительность выдержки под давлением – от 60 до 180 час. Уровни и интервалы варьирования переменных факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования переменных факторов

Факторы	Обозначения		Интервал варьирования	Уровни варьирования		
	натур. вид	кодир. вид		нижний -	основной 0	верхний +
Количество отверстий, шт	К	X ₁	5	0	5	10
Продолжительность сушки, ч	t	X ₂	60	60	120	180

Перед исследованием была установлена начальная масса каждого образца и определены методом высушивания при помощи прибора ДИ-8 начальная влажность, которая составила 23%.

Влажности древесины W, %, определяется по формуле:

$$W = (m_1 - m_2) / m_2 * 100\%, \quad (1)$$

где m₁ — масса древесины во влажном состоянии;

m₂ - масса древесины в абсолютно сухом состоянии;

m₁- m₂ — масса воды, содержащейся в древесине.

На основе зависимости (1) была найдена масса каждого образца в абсолютно сухом состоянии m₂. После определенной длительности сушки образцы взвешивали и определяли

текущую влажность. При реализации исследований применялся двухфакторный план Бокса В2, который имеет хорошие статистические характеристики и включает небольшое число экспериментальных точек. В результате эксперимента получено уравнение регрессии, которое адекватно описывает зависимость влажности древесины от количества отверстий и продолжительности сушки при 5% уровне значимости

$$Y = 14,6 - 3,42X_1 - 2,32X_2 + 0,68 X_2^2 \quad (2)$$

$$- 1 \leq X_1 \leq + 1$$

$$- 1 \leq X_2 \leq + 1$$

Из уравнения 2 видно, что линейные коэффициенты при всех параметрах X_1 и X_2 отрицательны, т.е. между выходной величиной и переменными факторами существует обратная зависимость. Коэффициент при квадратичном эффекте параметра давления X_2^2 положительный, что указывает на выпуклость функции (ветви параболы направлены вверх). Коэффициенты при квадратичном эффекте параметра X_1^2 и парном взаимодействии X_1X_2 отсутствуют в формуле, так как они незначимы, т.е. их влияние на функцию отклика незначительное. Вершины парабол находятся вне диапазонов варьирования факторов, т.к. выполняется условие $|b_i| < 2 |b_{ii}|$. Для большей наглядности уравнение регрессии переведено в натуральный вид

$$Y = 25,4 - 0,68 K - 0,084 t + 0,0002 t^2 \quad (3)$$

$$0 \leq K \leq 10$$

$$60 \leq t \leq 180.$$

Для анализа влияния переменных факторов на упрессовку слоев по уравнению (2) и построена графическая зависимости (рис. 1). Анализируя полученные графики, можно сделать вывод о том, что с увеличением количества отверстий в бревне влажность древесины снижается более интенсивно. Использование заявленного изобретения позволит значительно упростить технологический процесс конвективной сушки оцилиндрованных бревен, снизить его трудоемкость и уменьшить энергозатраты.

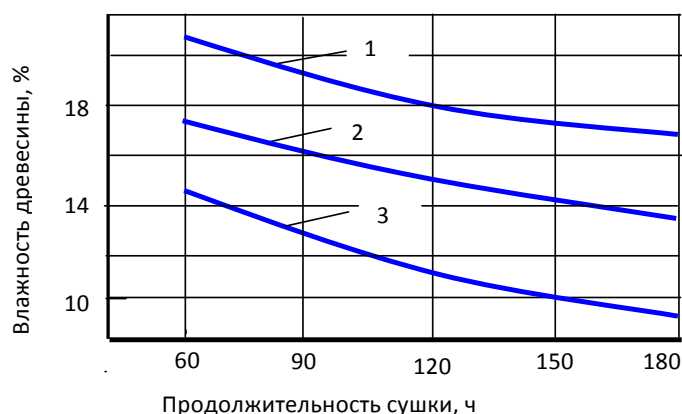


Рис. 1 – Изменение влажности древесины от количества отверстий в бревне и продолжительности сушки: 1 – $K = 0$; 2 – $K = 5$; 3 – $K = 10$

Наличие же сквозных в поперечном направлении отверстий будет способствовать быстрому и равномерному нагреву бревна по сечению, что ускорит процесс сушки. Кроме того, равномерность нагрева древесины отверстиями обеспечивает одновременную усушку волокон центральной и периферийной части бревна, что приводит к снижению внутренних напряжений, возникающих в бревне в процессе сушки, и устраняет образование трещин на его поверхности.

Таким образом, на основе выше изложенного установлено:

1. Строительство домов из свежесрубленных оцилиндрованных бревен недопустимо - получается "парниковый эффект", благоприятный для развития грибков. Сруб при высыхании до эксплуатационной влажности дает усадку: изменяется высота стен, оконных и дверных проемов, что делает невозможным выполнение отделочных работ.

2. Наиболее простым в техническом исполнении является способ конвективной сушки оцилиндрованных бревен, основанный на том, что перед началом сушки по всей длине бревна в поперечном направлении равномерно сверлят сквозные диаметральные отверстия.

3. Наличие сквозных отверстий ускоряет прогрев бревна по сечению и облегчает выход испарившейся влаги. С увеличением количества отверстий, процесс сушки оцилиндрованных бревен происходит более интенсивно.

4. На основе полученных регрессионных зависимостей возможно управление процессом сушки оцилиндрованных бревен для эксплуатационной влажности.

Список литературы

1. Лукаш, А.А. Дома из оцилиндрованных бревен: перспективы производства, недостатки и пути их устранения // Строит. материалы. – 2013– №4 С.109–110.

2. Пат. РФ на полезную модель №132532 МПК F26 МПК F26 В9/10, F26 В 3/04. Устройство для конвективной сушки оцилиндрованных бревен.

3. Пат. РФ на полезную модель №133771. Устройство для сверления глубоких отверстий в древесине..

4. Серпик, И.Н. Определение параметров отверстия для сушки оцилиндрованных бревен // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: www.science-education.ru/120-15693 (дата обращения: 04.12.2014).

5. Лукаш, А.А. Методика расчета теплопроводности ограждающей конструкции переменного сечения из оцилиндрованных бревен // Жилищн. строительство. – 2015. – №2. – С. 34–37.

6. Пат. РФ №2525821, МПК F26 В3/09. Способ конвективной сушки оцилиндрованных бревен.

7. Лукаш, А.А. Интенсификация процесса сушки оцилиндрованных бревен // Изв. вузов. Лесной журнал. – 2014. – №2. – С. 86–93.

УДК 57.083.13:004.451.25

УПРАВЛЕНИЕ АВТОТРОФНЫМ БИОСИНТЕЗОМ СВЕТОЗАВИСИМЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AT AUTOTROPHIC BIOSYNTHESIS OF MICROORGANISMS

**Александр Анатольевич Шевцов, Алексей Викторович Дранников,
Елена Александровна Шабунина
Alexandr A. Shevtsov, Alexey V. Drannikov, Elena A. Shabunina**

*Воронежский государственный университет инженерных технологий
Россия, Воронеж
Voronezh State University of Engineering Technologies,
Russia, Voronezh
(e-mail: shevalol@rambler.ru, drannikov@list.ru, e-shabunina@mail.ru)*

Аннотация: Предложен способ управления автотрофным биосинтезом светозависимых микроорганизмов, обеспечивающий увеличение прироста клеток биомассы за счет сбалансированного изменения освещенности от источника света, концентрации CO₂ в газовой смеси и температуры культивирования в биореакторе пленочного типа, а также высокое качество готовой продукции и энергетическую эффективность процесса за счёт оперативного управления технологическими параметрами.

Abstract: Proposed method of control the biosynthesis of light-dependent autotrophic microorganisms, providing an increase of the biomass cells due to the balanced changes of illumination from the light source, the concentration of CO₂ in the gas mixture and temperature of

culturing in the bioreactor of the film type, as well as the high quality of the finished product and the energy efficiency of the process by operational control of technological parameters.

Ключевые слова: способ управления, культивирование, автотрофные микроорганизмы.

Keywords: control method, cultivation, autotrophic microorganisms.

Недостаточное информационное обеспечение процесса культивирования светозависимых микроорганизмов в пленочных фотобиореакторах, неоправданное опасение за реальное увеличение выхода биомассы, её высокую себестоимость и недостаточно эффективный контроль и управление технологическими параметрами при массообмене в газожидкостном слое затрудняют выбор оптимальных режимов культивирования.

В пленочных аппаратах эффективно протекают процессы тепло- и массообмена при контакте газа с культуральной жидкостью, стекающей в виде пленки по прозрачной пленкообразующей поверхности при её интенсивном освещении, а автотрофный биосинтез развивается только в присутствии смеси воздуха с углекислым газом [1, 2, 3].

Наибольшее распространение из светозависимых микроорганизмов получили микроводоросли хлореллы, спирулины, дуналиеллы и сценедесмуса. Питательные свойства фототрофных микроводорослей обусловлены высоким содержанием в них белков, жиров, витаминов и микроэлементов. Однако при выращивании микроводорослей затраты на искусственное освещение и нагрев биосистем достигают до 80 % от общего объема энергозатрат; довольно высока стоимость питательных сред, используемых при выращивании биомассы. Поэтому разработка алгоритма управления, обеспечивающего рациональное использование материальных и энергетических затрат при культивировании биомассы микроскопических водорослей является актуальной.

При автотрофном культивировании микроводорослей снабжение суспензии диоксидом углерода является одним из основных условий, обеспечивающих интенсивный рост. Углекислотная зависимость фотосинтеза микроскопических водорослей, как и других автотрофов, зависит от используемого штамма, конструкции фотобиореактора и режима культивирования [4, 5].

Обеспечение интенсивно растущей культуры водорослей углекислым газом требует значительных затрат CO_2 и сопутствующих затрат на процесс межфазного массообмена [6, 7]. Управление процессом биосинтеза должно обеспечить условия, при которых затраты на межфазный перенос CO_2 из газовой фазы в жидкость были бы минимальными. Влияние концентрации CO_2 на эффективность фотобиосинтеза находится в тесной связи с действием других технологических факторов – интенсивности освещения и температуры, поэтому необходимо добиваться их определенного соотношения с помощью средств автоматизации.

Для определения изменения концентрации CO_2 , растворенного в жидкой фазе по высоте рабочей зоны реактора с учетом кинетических закономерностей использована однопараметрическая диффузионная модель:

$$v \frac{dC_L}{dz} = D_L \frac{d^2 C_L}{dz^2} + k_L a \Delta C - \alpha_{\text{CO}_2} \mu_m \frac{C_L}{K_{\text{CO}_2} + C_L} x \quad (1)$$

где v – скорость потока, м/с; z – продольная координата, м; C_L – рабочая концентрация CO_2 в жидкой фазе; D_L – коэффициент осевой диффузии; $k_L a$ – объемный коэффициент массопередачи, м/с; α_{CO_2} – расходный коэффициент по потреблению CO_2 , клетками кг/кг; ΔC – разность концентраций CO_2 в газовой и жидкой фазах (движущая сила массопереноса); μ_m – максимальная скорость роста биомассы; индексы: G – газовая фаза; L – жидкая фаза; $x = 1,13\tau + 1,59$ концентрация АСБ в суспензии, г/дм³, здесь τ – продолжительность культивирования.

Модель (1) была решена при следующих допущениях: концентрация CO_2 меняется только вдоль оси z , в радиальном направлении она выровнена; движение газовой фазы описывается

моделью идеального вытеснения; рассмотрен установившийся режим культивирования; в аппарате отсутствуют застойные зоны и байпасные потоки; концентрация растворенного CO_2 превышает критическую; - скорость потребления CO_2 клетками составляет $q(1,13\tau + 1,59)$.

Модель (1) приведена к безразмерному виду:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\bar{C}_G}{dZ} - a_G(\bar{C}_G - \bar{C}_L) &= 0 \\ \frac{1}{Pe} \frac{d^2\bar{C}_L}{dZ^2} + \frac{d\bar{C}_L}{dZ} + a_L(\bar{C}_G - \bar{C}_L) - b &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $Pe = \frac{v_L L}{D_L}$ – диффузионный критерий Пекле; $a_G = \frac{k_L a H}{\varphi_G v_G \psi}$ и $a_L = \frac{k_L a H}{v_L \varphi_L}$ – безразмерные параметры, определяющие массопередачу CO_2 из газовой фазы в жидкую; $b = q(1,13\tau + 1,59)\psi L / (v_L C_G^0)$ – безразмерный параметр, определяющий скорость потребления CO_2 клетками микроводоросли (Сток CO_2); $Z = z/H$; $\bar{C}_L = C_L \psi / C_G^0$; $\bar{C}_G = C_G / C_G^0$ – относительные длина и концентрации соответственно; H – высота рабочей зоны реактора, м; φ – содержание фазы в рабочей зоне аппарата; C_G^0 – концентрация CO_2 в газовой фазе на входе в рабочую зону реактора; ψ – константа фазового равновесия.

Граничные условия при работе биореактора в режиме противотока:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } Z = 0: \quad \frac{d\bar{C}_L}{dZ} &= 0; \quad 1 = \bar{C}_G \\ \text{при } Z = 1: \quad \frac{d\bar{C}_G}{dZ} &= 0; \quad \bar{C}_L^0 = \bar{C}_L - \frac{1}{Pe} \cdot \frac{d\bar{C}_L}{dZ} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Расчет диффузионной модели (1-3) на ЭВМ с использованием метода Рунге-Кутты проводили при рациональных значениях параметров культивирования, полученных в ходе исследования кинетических закономерностей процесса квазинепрерывного культивирования хлореллы. Погрешность моделирования по концентрации CO_2 в жидкой фазе составила 13 % (рис. 1).

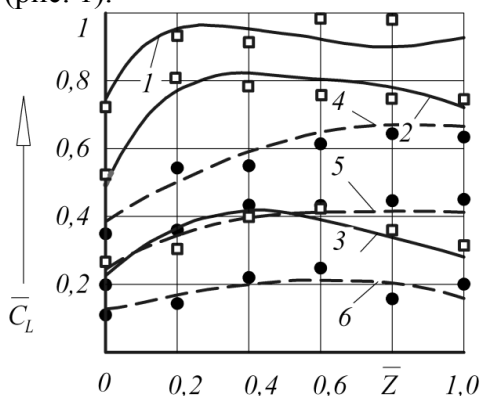


Рис. 1. Влияние параметров диффузионной модели на изменение концентрации CO_2 в жидкой фазе по высоте рабочей зоны фотобиореактора:

- — влияние параметра a_G :
1 – 65; 2 – 30; 3 – 10;
- — влияние параметра b :
4 – 1,5; 5 – 2,0; 6 – 3,0.

Используя разработанную математическую модель и программное обеспечение, предложен способ управления технологическими параметрами процесса в фотобиореакторе пленочного типа [8].

Схема управления фотоавтотрофным биосинтезом (рис. 2) включает фотобиореактор 1 [3], состоящий из секции ввода 2, освещения 3, охлаждения 4 и вывода 5, содержащий люминесцентные лампы 6 и 7, прозрачные цилиндрические трубки 8, патрубки для ввода смеси воздуха с углекислым газом 9 и барботер 10; сборник урожая 11 и технологическую емкость 12; ультратермостаты для регенерации охлаждающего воздуха 13 и охлаждающей воды 14; смеситель воздуха с углекислым газом 15; газовую ёмкость 16; десорбер кислорода 17; сепаратор-пеногаситель 18; циркуляционную помпу 19; насос 20, компрессор 21, вентиляторы 22 и 23;

распределители потоков 24 и 25, коллектор 26; микропроцессор 27; контуры рециркуляции: суспензии фотоавтотрофного микроорганизма 0.1.1, смеси воздуха с углекислым газом 5.7, охлаждающего воздуха 3.2, охлаждающей воды 1.1; линии подачи: готовой биомассы в сборник урожая 0.1.2, основного 0.2.1 и корректирующего 0.2.2 потоков питательной среды, углекислого газа 5.4, смеси воздуха с углекислым газом в прозрачные цилиндрические трубки 5.7.1 и в барботер 5.7.2; линии отвода: готовой биомассы из сборника урожая 0.1.3, пены из секции вывода фотобиореактора 0.3, суспензии из сепаратора-пеногасителя 0.1.4, смеси воздуха с углекислым газом из сепаратора-пеногасителя 5.7.3, кислорода 3.7, сброс давления смеси воздуха с углекислым газом из смесителя 5.7.4 и из газовой емкости 5.7.5, датчики: *TE* – температуры, *FE* – расхода, *LE* – уровня, *QE* – состава.

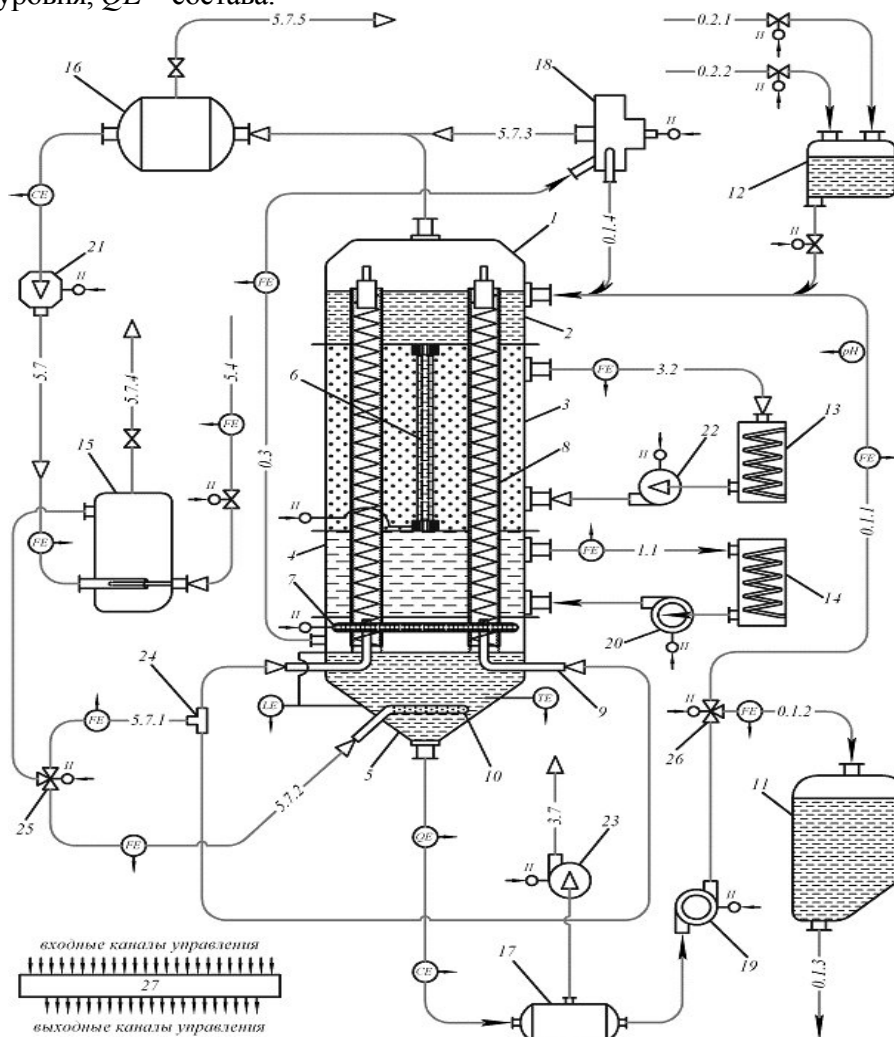


Рис. 2. Способ управления процессом культивирования автотрофных микроорганизмов

Исходная питательная среда вместе с инокулятом фотоавтотрофного микроорганизма подается в фотобиореактор. С помощью распределительных устройств в прозрачных цилиндрических трубках 8 в секции ввода 2 фотобиореактора 1 формируется пленка суспензии фотоавтотрофного микроорганизма, стекающая по внутренней поверхности прозрачных цилиндрических трубок. Одновременно по линии 5.7.1 подается смесь воздуха с углекислым газом, разделяемая коллектором 28 на несколько потоков и поступающая в трубки в противоточном режиме с истечением пленки суспензии. Наличие барботера в нижней части фотобиореактора позволяет дополнительно насытить клетки углекислым газом.

При течении по внутренней поверхности цилиндрических трубок в секции освещения 3 фотобиореактора суспензия фотоавтотрофного микроорганизма непрерывно освещается люминесцентными лампами 6 и 7, нагрев от которых необходимо компенсировать воздушным и водяным охлаждением. Охлаждающие воздух и вода циркулируют по замкнутым контурам 3.2 и 1.1 с помощью вентилятора 22 и насоса 20 с охлаждением в ультратермостатах 13 и 14.

Из прозрачных цилиндрических трубок суспензия фотоавтотрофного микроорганизма стекает в секцию вывода 5 фотобиореактора, где подвергается барботажу посредством барботера 10 с непрерывным освещением люминесцентной лампой 7. Далее суспензия выводится из фотобиореактора в контур её рециркуляции 0.1.1 с помощью циркуляционной помпы 19 с промежуточным отделением образовавшегося в процессе культивирования кислорода в десорбере 17 и его отводом по линии 3.7 вентилятором 23.

Расход охлаждающего воздуха устанавливают по температуре культивирования, при отклонении которой от заданного значения корректируют коэффициент теплопередачи от хладагента к охлаждающему воздуху изменением расхода охлаждающего воздуха. По оптической плотности готовой биомассы определяют концентрацию клеток микроводоросли, в зависимости от которой устанавливают время культивирования с помощью синхронизированного изменения расходов исходной суспензии и готовой биомассы.

Экспериментальная проверка системы управления автотрофным биосинтезом в опытном образце пленочного фотобиореактора [3] показала высокую эффективность поглощения энергии освещения и увеличение скорости прироста клеток за счет сбалансированного изменения освещенности от источника света, концентрации CO₂ в газовой смеси и температуры культивирования. За счет повышения точности и надежности управления технологическими параметрами удельные энергозатраты в процессе культивирования снижаются на 10...12 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках реализации гранта Президента Российской Федерации МД-8104.2016.11.

Список литературы

1. Бирюков, В. В. Основы промышленной биотехнологии [Текст] / В. В. Бирюков. – М.: КолосС, 2004. – 296 с.
2. Мокроносков, А. Т. Фотосинтез. Физиолого-экологические и биохимические аспекты [Текст] / А. Т. Мокроносков, В. Ф. Гавриленко, Т. В. Жигалова. – М.: Академия, 2006. – 448 с.
3. Пат. 2363728 РФ, МПК⁷ C12M 1/04 C12M 1/06 B01D 3/28. Пленочный аппарат [Текст] / А. А. Шевцов, Е. С. Шенцова, А. В. Дранников, А. В. Пономарев (РФ), заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2008118450/13; заявл. 13.05.2008; опубл. 10.08.2009; бюл № 22.
4. Шевцов А. А. Моделирование управляемого процесса массообмена при культивировании микроводорослей в фотобиореакторе пленочного типа [Текст] / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, Е. А. Шабунина // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2015. № 1. С. 89 - 93.
5. Пат. № 2458980 РФ, МПК⁷ C 12 M 1/00, C 12 M 1/06, B 01 D 3/32. Аппарат для культивирования автотрофных микроорганизмов [Текст] / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, Н. Ю. Ситников, А. В. Пономарев, И. В. Мажулина (Россия); заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. инж. технол. – № 2011126828; заявл. 29.06.2011; опубл. 20.08.2012; Бюл. № 23.
6. Шевцов, А. А. Исследование кинетических закономерностей процесса культивирования микроводорослей в пленочном аппарате с рециркуляцией жидкой фазы [Текст] / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, А. В. Пономарев, Н. Ю. Ситников // Вестник ВГТА. – 2011. – № 1, С. 7-12.
7. Шабунина, Е. А. Получение препаратов из биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов/ Е.А. Шабунина// Сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. «Достижения и проблемы современных тенденций переработки сельскохозяйственного сырья: технологии, оборудование, экономика», Краснодар: Экоинвест, 2016. – С. 195 - 198.
8. Патент № 2458147 РФ, C 12 Q 3/00, C 12 M 1/00, C 12 N 1/12 Способ управления процессом культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов [Текст] / А. А. Шевцов, А. В. Пономарев, Е. С. Шенцова, А. В. Дранников, Н. Ю. Ситников (Россия) – № 2010147435; заявлено 19.11.2010; опубликовано 10.08.2012; Бюл. № 22.

УДК 544.642

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОЛИЗА НА МЕХАНИЗМ РЕАКЦИЙ ОКИСЛЕНИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРООБРАБОТКЕ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ
INFLUENCE OF ELECTROLUSIS CONDITIONS ON THE MECHANISM OF
OXIDATION REACTIONS DURING WHEY ELECTROTREATMENT**

**Ирина Ивановна Вуткарева
Irina I. Vutcariova**

*Институт прикладной физики АН Молдовы, Республика Молдова, Кишинев
Institute of Applied Physics Academy of Sciences of Moldova, Republic of Moldova, Chisinau
(e-mail: irinavutkareva@yahoo.com)*

Аннотация: Работа посвящена изучению влияния состава электролита, условий электролиза на эффективность выделения карбоновых кислот при электрообработке молочной сыворотки.

Abstract: Work is devoted to studying the effect of electrolyte composition, electrolysis conditions on the efficiency of allocation of carboxylic acids in whey electrotreatment.

Ключевые слова: молочная сыворотка, электролиз, окислительно-восстановительный процесс

Keywords: whey, electrolyzer, redox reaction

Более полная переработка в электролизном устройстве вторичного молочного сырья – сыворотки позволяет получить новые продукты при существенном сокращении и даже исключении химических реагентов.

При выборе одной или нескольких гомогенных реакций для сравнения с данным электродным процессом необходимо следить, чтобы первичные продукты в любой исследуемой реакции не остались неопределенными из-за их дальнейшего превращения во вторичные продукты или в силу того, что вторичные продукты ошибочно принимались за первичные [1].

Эта проблема особенно серьезна при электрохимических реакциях, так как первичные продукты образуются довольно близко от электрода и, следовательно, могут немедленно реагировать далее. Этого осложнения можно избежать, по крайней мере частично, если анализировать продукты при очень низкой конверсии (при малой силе тока).

Большое внимание привлекает механизм окисления карбоксилатов. Для протекания этой реакции необходимо высокое содержание воды в электролите - до 20%.

Электролиз проводили в ячейке с разделительной диафрагмой. Использовали электролизер с плоскими вертикальными электродами, анодная камера заполнялась слабым раствором электролита. В качестве диафрагмы применяли ионитовую мембрану МА-40. Анод графитовый, катод – из нержавеющей стали. Объем катодной камеры заполняли ферментированной сывороткой. Напряжение поддерживали постоянным – 29В.

Многое зависит и от состава раствора, особенно от активной кислотности - рН. Поэтому решающее значение имеет степень ферментации (сбраживания) сыворотки. Представлял интерес сравнения результатов электрообработки ферментированной и неферментированной сыворотки Таблица 1 и Таблица 2, 3.

Чтобы электролит оставался кислым, реакцию проводят в водном растворе кислоты, нейтрализованной на 2-5 % гидроокисью щелочного металла.

У нас водный кислый раствор - сброженная сыворотка, электролит в анодной камере - слабый раствор соды NaHCO_3 . Малое межэлектродное расстояние позволяет работать в средах с низкой электропроводностью.

В нашем случае степень диссоциации слабых кислот и оснований зависит от реакции среды.

Повышение концентрации кислоты приводит к увеличению вероятности обмена ее анионов с другими структурными группами, что приводит к уменьшению числа гидроксильных групп [2].

Результаты исследований указывают на то, что в водной среде нет значительного различия в скоростях электролиза кислот с первичными, вторичными и третичными группами R, если молекулярный вес приблизительно один и тот же во всех случаях; карбоксилаты с более высоким молекулярным весом имеют большие константы скоростей, чем карбоксилаты с меньшим молекулярным весом.

Молочная кислота мигрирует в анодную камеру сразу за 10 –15 минут электрообработки.

Таблица 1. Электрообработка пастеризованной сыворотки без ферментации

τ , ми н	I, А	U, V	Анодная камера			
			РН	МК	АС	Эт
5	0,3	29	3,6	100		
15	0,4	29	2,65	100		
30	0,3	29	2,35	76,5	23,5	
40	0,2	29	2,45	73,2	26,8	
55	0,2	29	2,25	76,5	23,5	
Исходная молочная сыворотка						
			4,75	32,8	6,6	3,7

МК – процентное содержание молочной кислоты в растворе; АС – процентное содержание уксусной кислоты в растворе; ЭТ – процентное содержание этанола в растворе.

Электрообработка при малой силе тока (менее 1А).

В анодной камере происходит анодное окисление молочной кислоты в уксусную кислоту после 15 минут электрообработки при малой силе тока (ток меньше 1 А).

Следует указать на максимально допустимую температуру процесса. Сильное нагревание сыворотки в течение длительного времени может привести к термической денатурации белковых фракций, нарушению их структурных свойств и разрушению кислот.

Исключение необратимых изменений составных частей сыворотки при температурном воздействии при электрообработке обеспечивается соответствующим подбором температурного режима и продолжительности концентрирования. В зависимости от условий: силы тока, кислотности среды, температура при электрообработке колеблется от 20 до 45 °С. Такие факторы как вязкость продукта, структура белковых фракций, кристаллизация лактозы определяют целесообразный предел – около 45⁰С.

Этим обеспечивается наиболее полное сохранение исходных свойств сыворотки.

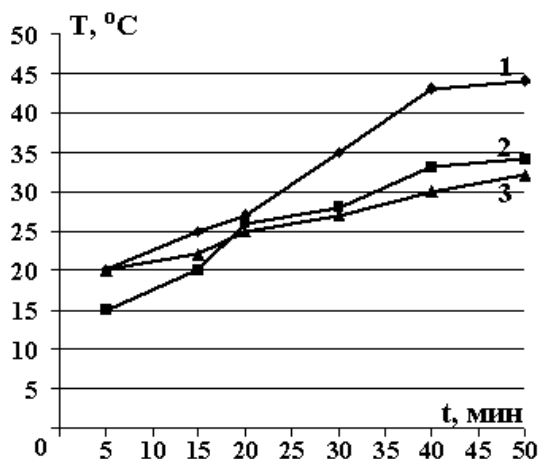


Рис.1. Изменение температуры сыворотки во времени электрообработки: сыворотка ферментирована до pH 3,7 – 1; сыворотка ферментирована до pH 4,3 – 2; неферментированная сыворотка – 3.

При постоянном напряжении 29В, наблюдается рост температуры до 45⁰С в случае с сывороткой, ферментированной до рН 3,7(Рисунок 1).

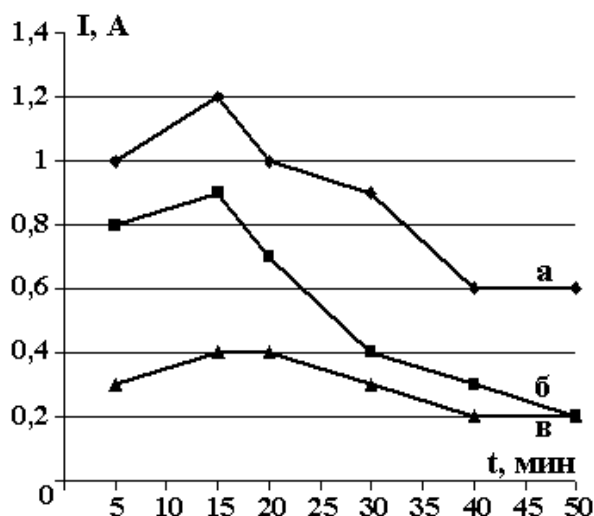


Рис. 2. Изменение силы тока при электрообработке: сыворотка сброжена до рН 3,7 – а; сыворотка сброжена до рН 4,3 – б; сыворотка неферментированная – в.

Поскольку температура предопределяется силой тока в системе, обработка сыворотки в электролизере возможна при силе тока ниже 1А.

Таблица 2. Электрообработка ферментированной до рН 4,3 сыворотки. Сыворотка пастеризованная.

τ , мин	I, А	U, V	Анодная камера			
			рН	МК	АС	Эт
5	0,8	29	6,2	90,9	9,1	
20	0,7	29	3	89	11	
30	0,4	29	2,6	83,8	16,2	
40	0,3	29	2,6	82,9	17,1	
55	0,2	29	2,4	81,1	18,9	
Исходная сброженная сыворотка						
			4,3	56,9		

Таблица 3. Электрообработка ферментированной до рН 3,7 сыворотки. Сыворотка пастеризованная

τ , мин	I, А	U, V	Анодная камера			
			рН	МК	АС	Эт
5	1	29	7,2	100		
10	1,2	29	3,5	77,3	22,7	
30	0,9	29	3,45	77,9	21,1	
55	0,6	29	1,95	94,9	5,1	
Исходная сброженная сыворотка						
			3,7	34,9	4,7	4,5

Промежуточным продуктом окисления – восстановления является уксусный альдегид (ацетальдегид). Скорость окисления –восстановления альдегидов значительно выше, их сложно обнаружить, но в данном случае (Таблица 3) обнаружено их остаточное (промежуточное) количество – 2-3% в растворе.

В кислой среде на поверхности углеродного материала идет процесс восстановления O_2 до H_2O_2 [3]:



Образование $HO_2\cdot$ радикала происходит в процессе рекомбинации $HO\cdot$ радикалов. С возрастанием скорости генерации $HO\cdot$ – радикалов процесс смещается в сторону дальнейшего окисления образовавшейся молочной кислоты до уксусной.

Совокупность ряда таких окислительно-восстановительных процессов, проведенных в данных условиях электролиза при контролируемом потенциале, показала, что их реализация отвечает схеме: выделенная в ходе электролиза молочная кислота подвергается дальнейшему окислению.

В процессе электролиза ток уменьшается и к концу реакции становится очень низким, поскольку он пропорционален концентрации электрохимически активного вещества. Наиболее эффективно выделение молочной кислоты протекает при малом токе, повышение силы тока ведет к усилению окислительных процессов: молочная кислота быстрее окисляется в уксусную кислоту.

Периодически добавляя исходное вещество и удаляя продукт реакции, можно поддерживать необходимый уровень тока, при этом оказывая положительное влияние на процесс выделения целевого продукта.

Список литературы

1. Бейзер М., Лунд Х. Органическая электрохимия. М.: Химия, 1988. 470с.
2. Лукомский Ю.Я., Гамбург Ю.Д. Физико-химические основы электрохимии. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. 424с.
3. Кошелева А.М. Непрямое электрокаталитическое окисление алифатических спиртов до карбоновых кислот IN SITU генерированными активными формами кислорода. Дис. на соискание ученой степени канд. хим. наук. Красноярск: Институт Химии и Химической Технологии Сибирского Отделения Российской Академии Наук, 2014. 89с.

СЕКЦИЯ 7. «ПРОЦЕССЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ТЕХНОСФЕРЫ»

УДК 661.185-3:541.183.022.001

**ИСТОЧНИКИ И ПУТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ ФИТОТОКСИЧНЫМИ
ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ
SOURCES AND WAYS OF PHYTOTOXIC SURFACTANTS WATER POLLUTION****Виктор Анатольевич Волков, Нина Исааковна Миташова,
Ксения Дмитриевна Слабова
Viktor A. Volkov, Nina I. Mitasheva, Kseniya D. Slabova****Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва***Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow
(e-mail: vav36@mail.ru)****Российская академия естественных наук, Россия, Москва****Russian Academy of Natural Sciences, Russia, Moscow
(e-mail: mitanieko@mail.ru)*

Аннотация: В статье приведены результаты исследования токсичности некоторых ПАВ и их смесей по тесту на проращивание зерен пшеницы (биохимический тест на токсичность). Найденные данные по токсичности ПАВ сопоставляются с результатами определения коллоидно-химических свойств их растворов. Установлен эффект синергизма токсичности смесей ПАВ. Предлагается аппаратурное определение ПДК по коллоидно-химическим свойствам растворов ПАВ. Проведено определение токсичности исходных и очищенных сточных вод прачечной и предприятий аквачистки.

Abstract: The article presents the results of public service enterprises wastewater biotesting, which contain surfactants and model solutions in comparison with the colloidal-chemical properties. It is established that the maximum allowable concentration of surface active agents coincides with the concentration of saturation of the adsorption layers, which is determined by the isotherm of surface tension. This allows you to replace the tedious and less accurate biotesting measurement to the surface tension of surface active agents solutions to normalize indicators of wastewater.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества (ПАВ), поверхностное натяжение растворов, токсичность, сточная вода, экологическая безопасность, предельно-допустимая концентрация (ПДК, адсорбция).

Keywords: biotesting, toxicological safety, surface tension, surfactants, waste water, adsorption

Введение. Ранее мы описали возможные пути глобализации загрязнения водного бассейна токсичными поверхностно-активными веществами [1]. В этой статье при определении капиллярности новым гравитометрическим методом [2] на примере изменения капиллярных свойств нетканых материалов из полиэфирных волокон рассматривается возможный механизм формирования вторичных загрязнений водного бассейна фитотоксичными ПАВ.

Результаты и обсуждение***1. О фитотоксичности ПАВ и сточных вод.***

В работах [3,4] было установлено, что ПАВ обладают фитотоксичностью. А как было установлено в работе [5], при попадании в сточную воду они (ПАВ) также придают ей свойство фитотоксичности.

В качестве примера на рис.1 и рис.2 приведена зависимость подавления роста проростков пшеницы от концентрации и состава смесей ПАВ. Глубокая очистка производилась комплексом методов: I- выпениванием, II химической коагуляцией, III-

адсорбцией на двух фильтрах: первичном из пенополиуретана и вторичном двухслойном зернистом фильтре с загрузкой активированным углем «Каусорб». Схема процесса очистки с рециклизацией ПАВ показана на рис.3, а в таблице показаны результаты определения фитотоксичности сточных вод различной степени очистки.

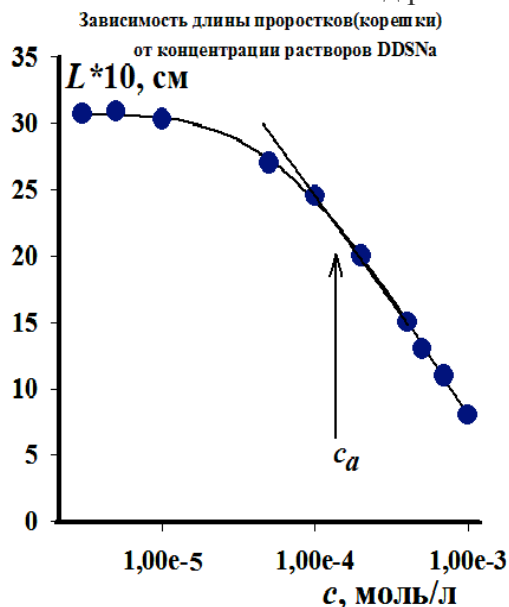


Рис.1. Зависимость фитотоксичности от концентрации раствора додецилсульфата натрия. c_a -концентрация насыщения адсорбционного слоя

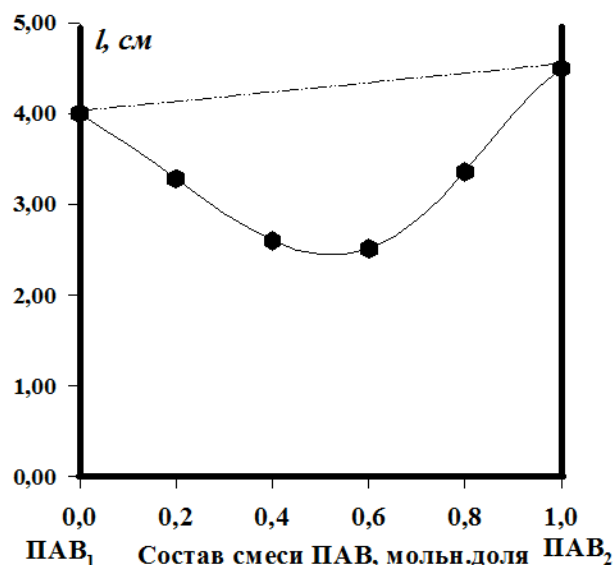


Рис.2. Влияние состава смесей ПАВ на фитотоксичность.
Смесь ПАВ: ПАВ_1 ПАВ_2

Из приведенных на рис.1. данных можно видеть, что до определенной концентрации растворов ПАВ не оказывают существенного влияния на проращивание зерен пшеницы. Было установлено [6], что та концентрация растворов, при которой начинается проявление фитотоксичности, соответствует концентрации насыщения адсорбционных слоев.

Смеси ПАВ обладают синергетическим действием, т.е. усиливают фитотоксичность друг друга. Все это связано с адсорбцией ПАВ на мембранах клеток живых организмов и растений.

Как установил С.А.Остроумов [7], ПАВ подавляют жизнедеятельность гидробионтов. Например, при определенном содержании ПАВ моллюски перестают фильтровать воду, что затрудняет естественную очистку воды от вредных загрязнений.

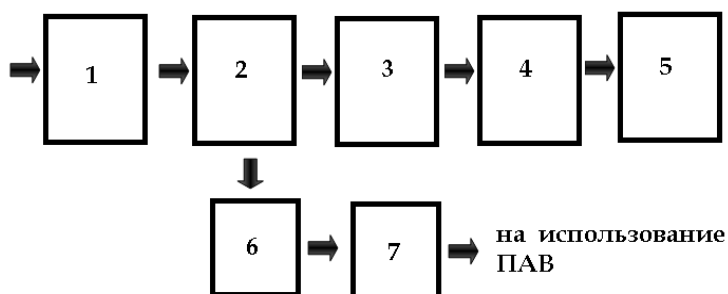


Рис. 3. Схема очистки сточных вод прачечной.

1- сборник сточной воды прачечной и аквачистки, 2- флотация и коагуляция, 3- отстаивание, 4- фильтрация, 5- адсорбция, 6- сбор пеноконденсата, 7- фильтрация и дезинфекция пеноконденсата

В таблице 1 приведены результаты определения фитотоксичности сточных вод различной степени очистки в сопоставлении с концентрацией ПАВ в них.

Таблица 1. Ингибирование роста корневой системы и проростков в сроки наблюдения

Время измерения после	Показатели биотестирования	Стадии очистки воды				
		1	2	3	4	5
АПАВ/НПАВ(мг/дм ³)		15/3	0,2/2	0,5/7	0,1/0,2	0,2/0,25
4 суток	I	92	80	81	23	21
	II	86	75	76	21	18
6 суток	I	91	79	83	22	25
	II	90	72	80	17	19
8 суток	I	93	81	82	22	24
	II	88	73	78	19	15
Класс опасности воды		1-2	3	3	4	4

Примечание: Показатель: I- Подавление роста проростка, %; II- Подавление роста корня, %. Вода: 1- Исходная сточная вода; 2- После коагуляции К₁; 3- После коагуляции К₂; 4- После коагуляции К₁ и глубокой очистки; 5- После коагуляции К₂ и глубокой очистки. Коагулянты (350 мг/л): К₁ – сульфат алюминия технический (Пермь), К₂ – гидроксихлорсульфат алюминия (Пермь).

Из приведенных в таблице данных видно, что даже после глубокой очистки сточных вод до концентрации ПАВ меньшей ПДК, они (сточные воды) остаются фитотоксичными.

2. Источники загрязнения воды поверхностно-активными веществами и пути распространения загрязнения воды ПАВ.

Традиционными (первичными) источниками загрязнения водного бассейна поверхностно-активными веществами являются предприятия по их производству и применению. Такие как заводы по синтезу ПАВ и производству синтетических моющих средств (СМС) и текстильно-вспомогательных веществ (ТВВ), текстильные предприятия, фабрики первичной переработки шерсти, заводы по синтезу синтетических и искусственных волокон, прачечные и аквастирка, бытовые сточные воды после домашней стирки.

В таблице 2 приведено перечисление основных первичных источников загрязнения воды ПАВ.

Таблица 2. Источники распространения загрязнений водного бассейна поверхностно-активными веществами

Первичные источники загрязнения воды фитотоксичными ПАВ	Производство ПАВ	Сброс сточных вод в открытые водоемы
	Производство СМС и ТВВ	
	Производство химволокон	
	Текстильное производство	

Вторичные источники загрязнения – это синтетические и искусственные волокна, которые подвергались авиважной и антиэлектростатической обработке поверхностно-активными веществами без химического их закрепления на волокнах, а также текстильные материалы из этих волокон и швейные изделия, которые могут быть изготовлены с применением синтетических и искусственных волокон, например, спортивная одежда. Отдельно надо сказать о геотекстильных и фильтровальных нетканых материалах из гидрофобных синтетических волокон, полученных клеевым методом с использованием синтетических латексов.

При изучении капиллярности нетканого иглопробивного материала Стелан, который используется в качестве стелечного материала в производстве обуви нами с применением нового гравитационного метода высокой степени точности был обнаружен эффект, который мы назвали «Эффект увлажнения». Этот эффект проявляется в повышении капиллярного

поглощения воды нетканым материалом после предварительного его смачивания и высушивания.

На рис. 4 приведена зависимость кинетики массового поглощения воды образцами полиэфирного нетканого материала «Стелан» от количества смачиваний.

Первая кинетическая кривая показывает кинетику поглощения воды исходным образцом «Стелана». Ничего необычного в ходе этой кривой не наблюдается. По данным работы [8] максимальная высота подъема воды по этому образцу составляет всего 2,1 мм, что соответствует низкоэнергетической поверхности, характерной для полиэфирных волокон. Но повторное исследование кинетики поглощения воды после высушивания исходного образца (после первого определения) показало, что капиллярность «Стелана» увеличилась (кривая 2), причем существенно. А при определении капиллярности в третий раз показало еще более существенный рост гидрофильности (кривая 3). Такое изменение возможно только в результате изменения поверхностных свойств волокон внутри капилляров. Поскольку полиэфирные волокна не набухают в воде, то изменения размера капилляров происходить не может, следовательно, изменению подлежит только поверхностное натяжение как раствора, так и самих волокон на границе с водной средой. Это возможно в результате десорбции из волокон поверхностно-активных веществ, которые при авиважной обработке поглощают неионогенные ПАВ внутрь полимерного материала. В работе [9] было установлено, что потребуется до 8 водных обработок для очистки волокон от этих сорбированных веществ. Поэтому при первых нескольких обработках неионогенные ПАВ выделяются в водную фазу и смачивание капилляров происходит не водой, а водными растворами ПАВ со значительно меньшим поверхностным натяжением, чем у воды, что способствует смачиванию. Кроме того, в результате выхода НПАВ из объема волокон на поверхность будет формироваться такой адсорбционный слой, который гидрофилизует поверхность полимера [10,11].

Исследование капиллярности нетканых материалов из полиэфира, проклеенных различными синтетическими латексами показало, что проклеивание латексами, содержащими ПАВ в качестве стабилизатора полимерных дисперсий, приводит к достаточно интенсивному поглощению воды. Практически на уровне отваренной хлопчатобумажной ткани. Следовательно, применение латексов для проклеивания может также вызывать вторичные загрязнения окружающей среды эмульгаторами. Этого можно избежать, если использовать латексы с «пришитым» эмульгатором.

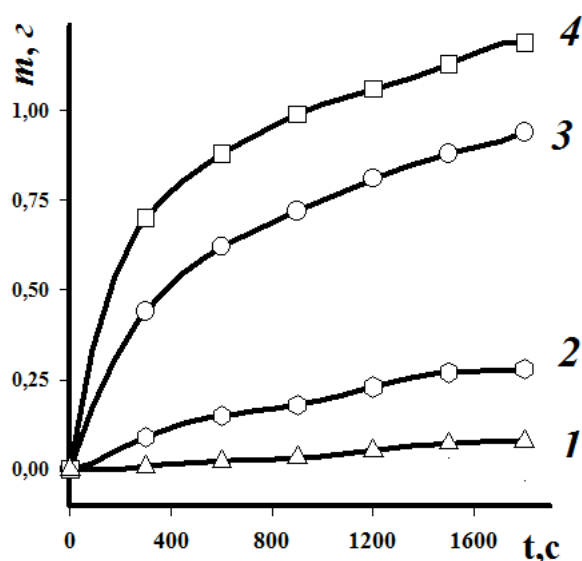


Рис.4. Влияние количества измерений на капиллярность Стелана (ПЭ). Количество измерений: 1-1,2-2,3-3,4-4

Хотя процесс выделения ПАВ из объема волокон на поверхность диффузионный и потребует значительно времени для установления равновесия, уже на начальном этапе увлажнения некоторое количество ПАВ будет выделяться. Следовательно последующее смачивание осуществляется уже раствором и даже незначительного количества растворенных веществ достаточно для резкого снижения поверхностного натяжения и проникающей способности раствора по сравнению с «чистой» водой.

Это явление было также отмечено и ранее, но не в столь явной форме в работе [12], в которой проводили очистку поверхности синтетических материалов перед осуществлением их модификации, также как и некоторые

другие исследователи. Оценить количественно вклад выделившегося ПАВ в изменение капиллярности не представляется возможным, поскольку мы не можем предсказать или оценить экспериментально концентрацию растворов внутри капилляров, соответственно не знаем и величину поверхностного натяжения, знание которой необходимо для расчетов косинуса краевого угла смачивания. Но мы можем рассчитать работу смачивания и уже по её изменению судить о вкладе растворения ПАВ в «эффект увлажнения».

Установлено, что после выдерживания образца нетканого материала для отмывки загрязнений в течении 30 минут при перемешивании водной фазы капиллярность ещё более возрастает. Три последующих отмывки также приводят к повышению капиллярности.

Очевидно, что при использовании таких нетканых материалов в качестве фильтров, геотекстиля, фильтров или гидроизоляционного материала, поверхностно-активные вещества будут выделяться и загрязнять почву и подземные источники воды, попадать в пищевые цепочки и оказывать вредное влияние на организм человека.

Очевидно, также, что изготовление одежды из синтетических волокон может способствовать глобализации распространения загрязнений водного бассейна поверхностно-активными веществами.

Выводы.

1. Установлено, что при смачивании полиэфирных нетканых материалов происходит выделение ПАВ из волокон, что может послужить причиной вторичного загрязнения водного бассейна и способствовать глобализации распространения вредных загрязнений водного бассейна.

2. Сточная вода от прачечных и акваистики даже после многоступенчатой очистки обладает фитотоксичным действием.

3. Для снижения вредного воздействия загрязняющих воду веществ предложен метод очистки с рециклизацией ПАВ

Список литературы

1. Волков В.А., Фитотоксичность сточных вод и растворов, содержащих поверхностно-активные вещества/ Волков В.А., Миташова Н.И., Агеев А.А. Материалы научно-практической конференции «Глобализация и эколого-экономическое развитие регионов. – М.: МГУЛ 2015, С.48-56.

2. Волков В.А. Гравитометрический метод определения капиллярности тканей и нетканых материалов. / Волков В.А. Агеев А.А., Слабова К.Д., Титов Ю.И.В сб.«Новое в технике и технологии текстильной и легкой промышленности» Материалы докладов Международной научно-технической конференции. ВГТУ 2015, С.33-34.

3. Экологические проблемы производства и потребления поверхностно-активных веществ/материалы Научной сессии. науч. ред. В. А. Волков. Москва, 2007.

4. Полиэфтова А.П., Волков В.А., Миташова Н.И. Адсорбция и фитотоксичность поверхностно-активных веществ в растворах и сточных водах В сборнике «Современные концепции научных исследований». №4, 2015. Евразийский союз ученых, -М.: С.123-127

5. Волков В.А., Токсичность растворов и сточных вод, содержащих поверхностно-активные вещества /Волков В.А., Смирнова В.А., Миташова Н.И., Агеев А.А.В сб.: «Наука и образование в XXI веке» сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 17 частях. Тамбов. 2014. С. 34-37.

6. Волков В.А. Теоретические основы охраны окружающей среды. СПб. Лань 2015. 256с.

7. Остроумов С.А. Биологические эффекты при воздействии поверхностно-активных веществ на организмы. –М.: Макс пресс, 2001, 333 с.

8. Островский Ю.К., Полухина Л.М., Евсюкова Н.В. Капиллярность нетканых стелечных материалов Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). 2015. Т. 1. № 1-1 (1). С. 207-210.

9. Миташова Н.И., Экологическая и токсикологическая безопасность сточных вод предприятий бытового обслуживания населения./ Миташова Н.И., Волков В.А., Агеев .А.А., Смирнова В.А. Вестник Российского нового университета. 2012. № 4. С. 6-11

10. Волков В.А. Коллоидная химия. М.: Изд-во МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2001. 640 с.

11. Агеев А.А., Волков В.А. Адсорбция поверхностно-активных веществ. М.: МГУДТ. 2015. 222 с.

12. Zhironkin A.N .Adsorption of fluoride-containing surfactants from aqueous solutions on the surface of polyamide fibres. Zhironkin A.N., Volkov V.A., Gordeev A.S. Colloid Journal. 1997. T. 59. № 4. С. 442-445.

13. Волков В.А., Миташова Н.И. Чистый клининг для природы. Экологическая и токсикологическая безопасность сточных вод предприятий бытового обслуживания населения. Вода Magazine. 2011. № 7. С. 44.

УДК 66.074.3

**РЕГЕНЕРАЦИЯ ВОЗДУХА МЕТОДОМ ХЕМОСОРБЦИИ В ГЕРМЕТИЧНОМ
ОБИТАЕМОМ ОБЪЕКТЕ
THE CHEMISORPTION AIR REGENERATION METHOD
IN A SEALED VOLUME**

Николай Федорович Гладышев, Станислав Иванович Дворецкий*,
Евгений Игоревич Акулинин*, Михаил Юрьевич Плотников**
Nikolay F. Gladyshev*, Stanislav Ivanovich Dvoretzky*
Evgeny I. Akulinin*, Michail Y. Plotnikov**,**

*Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов

* Tambov state technical university, Russia, Tambov
(e-mail: akulinin-2006@yandex.ru)

**ОАО "Корпорация "Росхимзащита", Россия, Тамбов

**Roshimzachita corporation, Russia, Tambov
(e-mail: mikeusa@inbox.ru)

Аннотация: Экспериментальным методом изучена кинетика хемосорбции диоксида углерода надпероксидом калия в присутствии паров воды при различных значениях температуры и влажности газодыхательной смеси, площади поверхности регенеративного продукта и производительности хемосорбционного реактора в герметичном обитаемом объекте. Определены максимальная сорбционная емкость регенеративного продукта по диоксиду углерода и время защитного действия регенеративного продукта в реакторе.

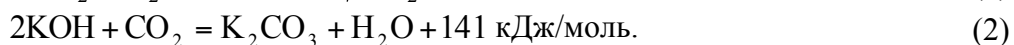
Abstract: The kinetics of carbon dioxide chemisorption with water vapor by potassium superoxide was research by experimental method. Relationships of the temperature, humidity of gaseous mixture, the surface of regenerative product and chemisorption reactor output in a sealed volume were installed. The maximum carbon dioxide sorption capacity of the regenerative product and the protection time identified.

Ключевые слова: регенерация воздуха; хемосорбция; кинетика; регенеративный продукт; надпероксид калия; сорбционная емкость; диоксид углерода; кислород; реактор; время защитного действия.

Keywords: air regeneration, chemisorption, kinetics, regenerative product, potassium superoxide, sorption capacity, carbon dioxide, oxygen, reactor, protection time

При регенерации воздуха протекает несколько параллельных процессов: в герметичном обитаемом объекте - выделение углекислого газа, тепла и потребление кислорода воздуха людьми в результате их жизнедеятельности; в хемосорбционном реакторе – 1) процесс

диффузии молекул CO_2 и H_2O из ядра потока газодыхательной смеси (ГДС) к поверхности регенеративного продукта (кристаллам KO_2 , осажденным на волокнах высокопористой матрицы); 2) химическое взаимодействие углекислого газа и воды с надпероксидом калия и выделение кислорода в слое хемосорбента в соответствии с химическими реакциями:



3) Диффузия молекул кислорода из рабочего слоя хемосорбента в ядро потока ГДС.

При регенерации в герметичных обитаемых объектах необходимо обеспечить поддержание концентрации кислорода на комфортном для дыхания человека уровне (объемная доля кислорода в ГДС находится в пределах 19...23 % и объемная доля диоксида углерода - не более 1 % в при температуре $(20 \pm 5)^\circ C$ и относительной влажности воздуха $(85 \pm 10) \%$). Регенерация воздуха осуществляется в хемосорбционном реакторе [1].

Цель экспериментального исследования процесса химической регенерации воздуха заключалась в исследовании кинетики хемосорбции диоксида углерода и выделения кислорода в присутствии паров воды, а также разработки конструкции хемосорбционного реактора, предназначенного для создания благоприятной атмосферы в герметичном обитаемом объекте в течение пяти часов из расчета присутствия в объекте четырех человек и свободного объема 6 м^3 , приходящегося на одного человека. При этом производительность хемосорбционного реактора соответствует поглощению $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ диоксида углерода и одновременно выделению $0,112 \text{ м}^3/\text{ч}$ кислорода.

Экспериментальное исследование кинетики хемосорбции надпероксидом калия диоксида углерода и выделения кислорода проводили для двух конструкций реакторов, отличающихся числом регенеративных пластин в каждой навеске хемосорбционного реактора. В первом варианте в каждой ячейке навески размещалось по три пластины (опыты № 1 – 4), во втором варианте (опыты № 5 – 8) – по две. Общее число навесок для первого варианта составило 12, для второго – 16 шт. В таблице приведены условия, при которых проводили экспериментальные исследования кинетики хемосорбции.

Таблица. Условия проведения экспериментов

№ опыта	Средняя температура ГДС, °С	Среднее значение влажности ГДС, %	Расход CO_2 , $\text{м}^3/\text{ч}$	Расход отбора O_2 , $\text{м}^3/\text{ч}$	Площадь поверхности регенеративного продукта, м^2	Масса регенеративного продукта, кг
1	5,4	81,9	0,1	0,112	3	3,62
2	20,0	85,0				3,59
3	21,2	80,0				3,65
4	39,7	64,0				3,63
5	14,3	82,7	0,2	0,224	4	2,99
6	20,6	85,8				3,18
7	23,2	81,0				3,22
8	19,9	88,0				

Кинетические кривые поглощения диоксида углерода и выделения кислорода регенеративным продуктом от времени представлены на рис. 1 и 2.

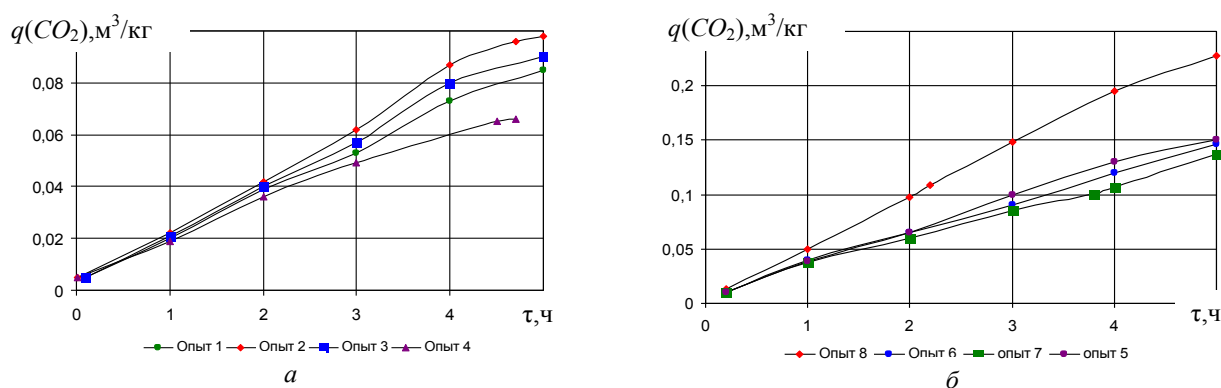


Рис. 1. Изменение удельного количества поглощенного CO_2 от времени для конструкций реакторов, состоящих из трех (а) и двух (б) пластин.

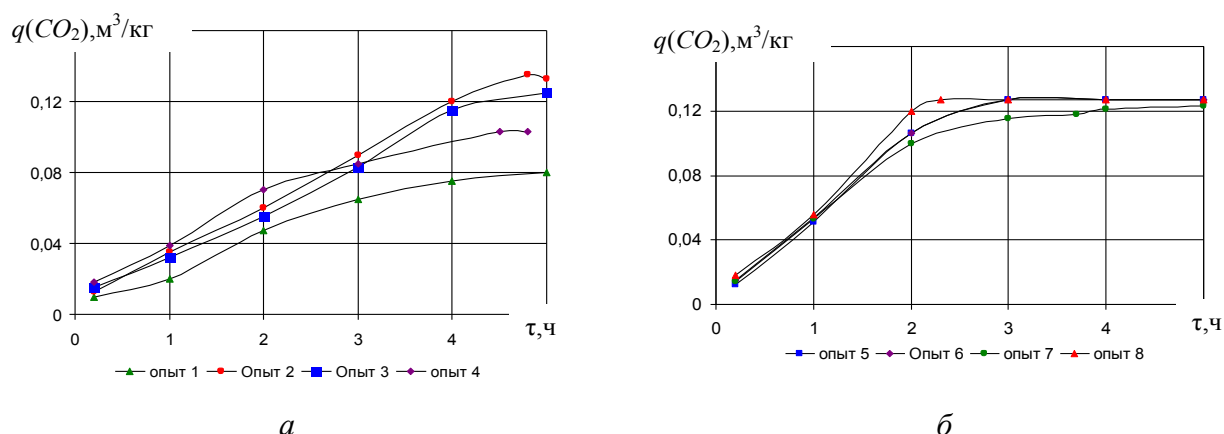


Рис. 2. Зависимость удельного количества выделившегося кислорода от времени для конструкций реакторов, состоящих из трех (а) и двух (б) пластин.

Опыты № 1 – 4 проводились в широком диапазоне изменения температуры и влажности ГДС в герметичной камере. Избыточное содержание влаги в ГДС в опыте № 4 отрицательно влияет на скорость процесса регенерации, чем при более низком ее значении в опыте № 1 (что отражает наклон кинетических кривых). Кинетическая зависимость удельного количества поглощенного диоксида углерода в опыте № 1 близка к зависимостям, полученным в опытах № 2 и 3 с более высокой температурой и влажностью. Средняя величина сорбционной емкости для опытов № 1, 3 равна $0,090 m^3/kg$ (см. рис. 2, а), для опытов № 5 – 7 – $0,137 m^3/kg$ (см. рис. 2, б). В опыте № 8 при увеличении производительности реактора в два раза значение сорбционной емкости регенеративного продукта составило $0,228 m^3/kg$.

На рисунке 2, а представлены зависимости удельного количества выделившегося кислорода для первого варианта конструкции хемосорбционного реактора (опыты № 1 – 4) от времени в течение пяти часов проведения эксперимента. При этом среднее значение объема выделившегося кислорода для опытов № 1, 2 составило $0,122 m^3/kg$, что несколько ниже теоретического содержания кислорода в регенеративном продукте ($0,127 m^3/kg$). В опыте № 1 с минимальным влагосодержанием ГДС общий объем выделенного кислорода несколько ниже, чем в опытах № 2 – 4. Во втором варианте конструкции реактора выделение кислорода прекращается после трех часов работы. Можно выделить стадию с постоянной скоростью выделения кислорода (первые два часа). При этом объем выделенного кислорода равен содержанию кислорода в исходном регенеративном продукте, что говорит о 100 % выделении кислорода при полной отработке регенеративного продукта. Эксперимент № 8 проводился при увеличении производительности реактора в два раза.

Таким образом, оба варианта конструкций хемосорбционного реактора могут обеспечить практически полное использование ресурса регенеративного продукта

(кинетические кривые на рис. 2 для опытов № 2, 3, 5 – 8). Учитывая равномерность выделения кислорода в течение пяти часов, наиболее предпочтителен первый вариант конструкции реактора (кинетические кривые на рис. 1 для опытов № 2, 3).

Во втором варианте конструкции реактора для всех опытов наблюдается практически 100 % выделение кислорода в первые два часа работы хемосорбционного реактора (кинетические кривые на рис. 2, б). Избыточно выделенный кислород покрывает потребности укрываемых людей в обеспечении кислородом в последующие три часа, что также свидетельствует о возможности использования второго варианта конструкции реактора для практической реализации. Второй вариант конструкции реактора характеризуется более интенсивным процессом поглощения диоксида углерода, что выражается в более высоких значениях сорбционной емкости регенеративного продукта в соответствующие периоды времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части (ГЗ № 2014/219, проект № 995)

Список литературы

1. Дворецкий С.И., Плотников М.Ю., Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В. Экспериментальное исследование процесса регенерации воздуха в герметичных обитаемых объектах// Вестник ТГТУ. 2014. Т.20. №2. С. 292-298.

УДК 674.047:551.588.74

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ НА ВЫДЕЛЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ THE DURATION EFFECT OF CONVECTIVE DRYING ON THE RELEASE OF HARMFUL SUBSTANCES FROM WOOD

**Алексей Дмитриевич Платонов*, Татьяна Казимировна Курьянова*,
Юлия Сергеевна Михайлова**
Aleksey D. Platonov*, Tatyana K. Kuryanova*, Yuliya S. Mikhaylova****

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

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

(e-mail: vglawood@yandex.ru)

***Газпром добыча Краснодар, Россия, Краснодар*

***Gazprom добыча Краснодар, Russia, Краснодар*

(e-mail: baysy81@mail.ru)

Аннотация: В статье приводятся результаты исследования выделения фурфурола и формальдегида из древесины бука при длительном воздействии повышенной температуры и влажности в процессе камерной сушки.

Abstract: The article presents the results of the study highlight the furfural and formaldehyde from beech wood with prolonged exposure to elevated temperature and humidity in the process chamber drying.

Ключевые слова: древесина бука, влажность, температура, продолжительность сушки, режим, фурфурол, формальдегид

Keywords: beech wood, humidity, temperature, drying duration, mode, furfural, formaldehyde

При проектировании сушильных участков или цехов и последующей эксплуатации сушильных камер необходимо стремиться к минимизации воздействия вредных веществ на окружающую среду, для этого необходимо установить количество вредных веществ выделяемых из древесины.

В результате воздействия повышенной температуры влажная древесина подвергается гидролизу. Вода является хорошим растворителем и для экстрактивных веществ. Количественный и качественный состав веществ экстрагируемых из древесины во многом определяется продолжительностью комплексного воздействия на древесину температуры среды, влажности древесины и формы удаляемой влаги.

В процессе сушки из древесины удаляется влага, а вместе с ней и вещества растворенные в ней. На начальном этапе сушки из древесины удаляется свободная влага. В этот период в древесине преобладает движение влаги в виде жидкости. Процесс протекает достаточно интенсивно. По мере уменьшения текущей влажности древесины интенсивность движения влаги в виде жидкости постепенно снижается, а в виде пара наоборот увеличивается [1].

Отсюда следует, что максимальное удаление водорастворимых веществ будет происходить на первом этапе сушки древесины, когда в древесине присутствует свободная влага, а температура находится на минимальных значениях. Наиболее благоприятными, в этом плане будут мягкие режимы, отличающиеся повышенной длительностью процесса сушки и воздействием невысоких температур, способствующих увеличению степени гидролиза древесины и экстрагирования водорастворимых веществ и доли движения влаги в виде жидкости до более низких значений влажности древесины.

Оценка состава отработанного агента сушки показала, что наибольшую опасность для окружающей среды и человека представляют вещества, экстрагируемые водой из древесины лиственных пород. В количественном и качественном отношении можно выделить фурфурол, а также в меньших количествах формальдегид. Данные вещества обладают суммационным эффектом [2].

Количественная оценка содержания фурфурола и формальдегида в отработанном агенте при сушке древесины бука, была определена в производственных условиях на ряде деревообрабатывающих предприятий Краснодарского края. На данных предприятиях эксплуатируются однотипные по конструкции сушильные камеры емкостью 50 м³. Сушка древесины проводилась форсированными, нормальными, мягкими режимами. Начальная влажность древесины бука составила 55 %.

На рис. 1 и 2 представлены количество фурфурола и формальдегида, выделяемых из одного кубометра древесины бука в процессе конвективной сушки различными режимами и соответственно продолжительности.

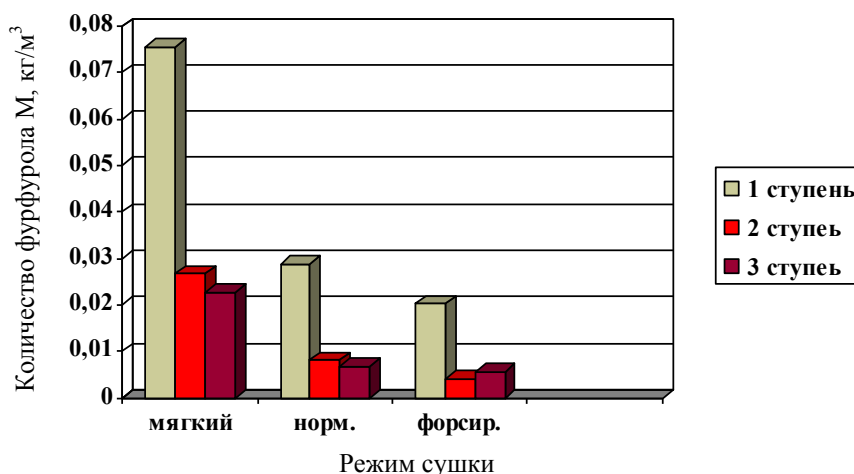


Рис. 1. Количество фурфурола, выделяемого из 1 м³ древесины бука за один оборот

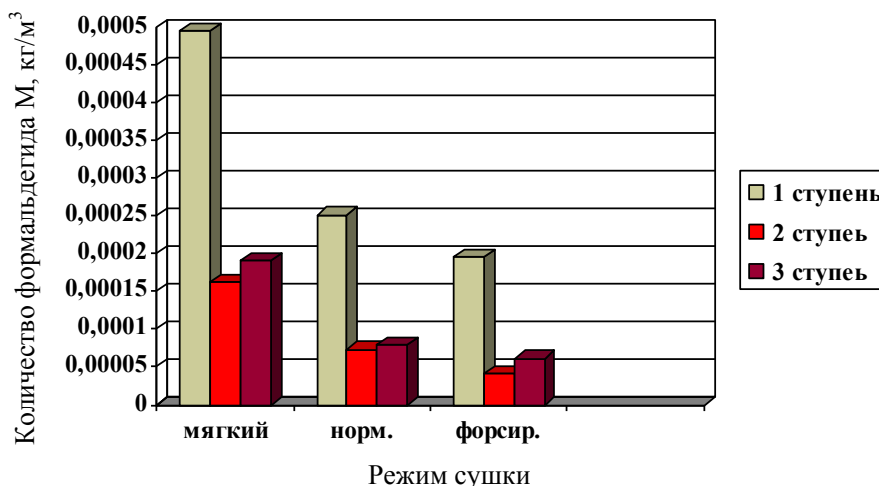


Рис. 2. Количество формальдегида, выделяемого из 1 м³ древесины бука за один оборот

При сушке древесины бука нормальными и форсированными режимами отмечено снижение количества выделяемого фурфурола и формальдегида, примерно 2,0-2,5 раза, по сравнению с мягкими. Снижение количества фурфурола на второй и третьей ступени составляет в среднем 6,0-7,0 раз, а формальдегида в 2,0-4,0 раза в зависимости от режима сушки. Общее снижение выделения вредных веществ на второй и третьей ступенях обусловлено удалением из древесины связанной влаги. Отсутствие свободной влаги в древесине существенно замедляет процессы гидролиза в древесине и выделения вредных веществ. Скорость выведения веществ опережает по величине скорость их образования. В связи с чем, отмечается резкое снижение количества фурфурола и формальдегида выделяемого из древесины.

При оценке техногенного воздействия на окружающую среду в абсолютных величинах с учетом продолжительности сушки древесины в сушильных камерах, можно отметить, что максимальное выделение фурфурола происходит при сушке древесины бука мягкими режимами. При повышении жесткости режима количество фурфурола уменьшается в два раза.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в процессе сушки из древесины бука выделяющееся количество фурфурола и формальдегида, зависящее от жесткости применяемого режима и продолжительности процесса. Наибольшее выделение указанных вредных веществ происходит на начальном этапе, при удалении свободной влаги. Поэтому при планировании работы сушильных камер необходимо исключать вероятность одновременного проведения в нескольких сушильных камерах процесса сушки на первой ступени.

Список литературы

1. Кришер О. Научные основы техники сушки. М.: ИЛ, 1961. 536 с.
2. Платонов А.Д., Курьянова Т.К., Михайлова Ю.С. Влияние влажности и условий тепловой обработки на экстрагирование веществ из древесины // Труды 4 международ. науч. практич. конф. "Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и тепловые процессы СЭТТ-2011)". Т.2. М.: ФГОУ ВПО «МГАУ им. В.П. Горячкина», 2011. С. 132-135.

УДК 66.061

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АКТИВАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ
ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОД
ULTRASONIC ACTIVATION OF CHEMICAL REAGENTS IN THE PROCESS
FLOTATION TREATMENT OF OILY WATER**

**Владимир Олегович Абрамов, Марат Салаватович Муллакаев
Vladimir O. Abramov, Marat S. Mullakaev**

*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН - ИОНХ РАН,
Россия, Москва*

*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences- IGIC RAS,
Russia, Moscow
(e-mail: mullakaev@mail.ru)*

Аннотация: Рассмотрена возможность применения ультразвука в комплексе с другими физико-химическими методами для интенсификации процесса очистки нефтезагрязненных стоков. В результате исследований установлено существенное повышение степени очистки при предварительной ультразвуковой активации реагента. Разработанная технология ультразвуковой реагентной флотации может быть рекомендована при строительстве новых и модернизации существующих очистных сооружений очистки поверхностных стоков.

Abstract: The possibility of using ultrasound in conjunction with other physical and chemical methods for intensification of oil-contaminated wastewater treatment process. The studies found a significant increase in the degree of preliminary purification ultrasonic activation reagent. The developed technology of ultrasonic flotation reagent can be recommended for the construction of new and modernization of existing mo-treatment of surface waste water treatment plants.

Ключевые слова: нефтезагрязненные воды, флотация, химический реагент, ультразвук, ультразвуковая активация, степень очистки.

Keywords: oil-contaminated water, flotation, chemical reagent, ultrasonic activation, purity.

Увеличивающиеся масштабы использования нефти в промышленности делают все более актуальной проблему очистки нефтезагрязненных стоков. Учитывая, что количество таких стоков увеличивается, а требования к степени очистки ужесточаются, традиционно используемые методы очистки не в состоянии удовлетворить современным требованиям по охране окружающей среды [1, 2]. Несмотря на значительные затраты энергии ультразвук (УЗ), вследствие способности стимулировать разнообразные физико-химические процессы, получил широкое распространение в промышленности [3-7].

В экспериментах осуществлялась очистка модельных эмульсий нефтепродуктов, в том числе при пониженных температурах, а также дополнительно загрязненных нефтепродуктами в диапазоне изменения концентраций от 1,4 до 500 мг/л. Были использованы алюмосодержащие коагулянты типа *Аква-Аурат* марки А30, гидроксохлорид алюминия марки Б, флокулянты типа *Праестол*: катионные марок 852, 853 и 857 и анионные марки 2540, а также алюмо-кремниевый коагулянт-флокулянт (АКФК) [8, 9].

Ультразвуковую активацию (УЗА) проводили на установке, состоящей из генератора MUG 3/18–27 мощностью 2 кВт и преобразователя МСП 1/22, снабжённого волноводно-излучающей системой стержневого типа. Интенсивность УЗ обработки изменяли в диапазоне 0,4...4 Вт/см², при резонансной частоте колебаний излучателя 22,1 кГц.

Концентрация нефтепродуктов определялась на спектрофотометре СФ–2000, изменение свойств эмульсии контролировались с помощью фотоэлектрического колориметра КФК–2МП. Флотационное разделение проводили на флотационной установке

фирмы «НПП Медиана–Эко» в течение 15 мин при плавной подаче (в течение примерно 30 с) насыщенной воздухом в сатураторе водопроводной воды в объёме 150...200 мл.

Результаты экспериментов свидетельствуют о заметном повышении эффективности применения коагулянтов при их относительно непродолжительной УЗА [10]. Степень очистки η модельных эмульсий при использовании коагулянтов, предварительно подвергнутых УЗА в течение 2 мин, возросла не менее чем на 20 % по сравнению со степенью очистки без УЗА. Гистограмма на рис. 1 наглядно иллюстрирует тенденции и качественную картину эффективности УЗА при совместном использовании коагулянта *Аква-Аурат А30* (10 мг/л) и флокулянта *Праестол 857* (2 мг/л) и различном времени их активации.

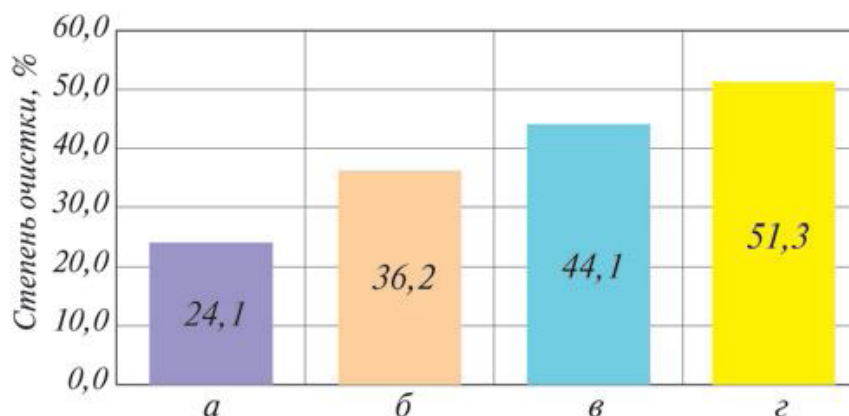


Рис. 1. Применение Аква-Аурата 30 и Праестола 857 после предварительной УЗА:

а — Аква-Аурат А30; б — Аква-Аурат А30 и Праестол 857;

в — то же, Праестол подвергся УЗА в течении 10 с;

г — то же, Аква-Аурата А30 подвергся УЗА в течении 30 с; а Праестол - 10 с.

АКФК получаемый на основе алюмосиликатного сырья, с рН дисперсионной среды 1,5 – 2, является одним из наиболее эффективных реагентов при флотационной очистки сточных вод [8, 9]. При концентрациях АКФК по Al_2O_3 10 и 20 мг/л оценивали эффективность УЗА реагента как до его смешения с загрязнёнными водами, так и на загрязнённые воды после ввода реагента. Результаты экспериментов сведены в табл. 1. Степень очистки при температуре воды 20 °С и концентрации по Al_2O_3 20 мг/л без предварительного разбавления АКФК и его активирования воздухом составила после 3-х минутного флотационного разделения 94,9 %. а после 4-кратного разбавления и обработки ультразвуком составила 95,7 %.

Степень очистки загрязнённых вод при пониженной температуре (+6°С) с применением АКФК (20 мг/л по Al_2O_3) без УЗА не превышала 80 %. Двухминутная УЗА в данном случае позволило достичь степени очистки 98,9 %, что соответствует остаточной концентрации нефтепродуктов в очищенной воде 0,09 мг/л.

При совместном применении АКФК (10 мг/л по Al_2O_3) и флокулянта *Праестол* марки 853 (2 мг/л), подвергнутых предварительной УЗА в течение минуты, показало, что степень очистки нефтезагрязнённых стоков при температуре +6°С, можно повысить до 99,2 %, что соответствует остаточной концентрации нефтепродуктов 0,07 мг/л.

Таким образом, при пониженных температурах для глубокой очистки нефтезагрязнённых вод, целесообразно комбинированное применение реагентов с их предварительным УЗА, играющим при этом важную роль. Контрольные эксперименты с комбинированным применением указанных реагентов без УЗ обработки обеспечивают степень очистки только 82,6 %.

Эксперименты по определению продолжительности сохранения АКФК (20 мг/л по Al_2O_3) состояния активности при очистке модельной эмульсии с концентрацией нефтепродуктов 20 мг/л проводили в течение пяти дней после однократного УЗА реагента при акустической мощности 4 Вт/см² в течение минуты. Эксперименты показали, что

повышенная активность АКФК после УЗА сохраняется в течение не менее 4 суток, и при этом возрастание степени очистки до 10 % достигается в промежутке 1-2 суток.

Таблица 1 - Очистка модельных эмульсий от нефтепродуктов с применением АКФК

Условия реagenтного воздействия на загрязнённые воды	C, мг/л		η , %	
	при 6°C	при 20°C	при 6°C	при 20°C
АКФК (20 мг/л по Al ₂ O ₃)	1,72	0,628	79,5	93,7
АКФК (20 мг/л по Al ₂ O ₃) после УЗА	0,09	0,512	98,9**	94,9*
АКФК (20 мг/л по Al ₂ O ₃) после 4-кратного разбавления	-	0,592		94,1
АКФК (20 мг/л по Al ₂ O ₃) после 4-кратного разбавления и обработки ультразвуком	-	0,432		95,7*
АКФК (10 мг/л по Al ₂ O ₃) и Праестол 853 (2 мг/л)	1,45	-	82,6	-
АКФК (10 мг/л по Al ₂ O ₃) после обработки ультразвуком и Праестол 853 (2 мг/л) после такой же обработки	0,07	-	99,2*	-

C₀ - начальная концентрация нефтепродуктов: при 6 °С: 8,41 мг/л; при 20 °С: 10,0 мг/л;

C – конечная концентрация нефтепродуктов, мг/л; * Продолжительность УЗА АКФК - 1 мин;

** Продолжительность УЗА АКФК:- 2 мин.

Был разработан многофункциональный стенд с целью отработки технологии реagenтной флотации поверхностных вод Москвы-реки у Студенец-Ваганьковского ручья, загрязнённых нефтепродуктами [11]. Результаты анализа предварительно отфильтрованных проб, отработанных в непрерывном режиме на 5 и 10-й минутах работы стенда при производительности 0,3 мг/л (1-мин. пребывание потока с введёнными реагентами в трубчатом реакторе и 5-6-мин. — во флотационной камере) при одновременном применении УЗ трубчатого реактора и гидродинамического излучателя (ГДИ) представлены в табл. 2.

Эффект повышенной активности АКФК после УЗА (не менее 4 суток) позволил существенно упростить принципиальную аппаратурно-технологическую схему реagenтной флотации с использованием УЗА, представленную на рис. 3. Эффективность предложенной схемы наглядно иллюстрируется результатами очистки сильно загрязнённых вод на оснащённом трубчатым УЗ реактором промышленного типоразмера пилотном стенде производительностью до 1 м³/ч (табл. 3).

Таблица 2 - Качество очистки стоков из коллектора Студенец-Ваганьковского ручья при реagenтной флотации с УЗА на стенде

Пробы	Нефтезагрязненные воды	C ₀ , мг/л	C, мг/л	η , %
1	Поверхностный сток из коллектора*	1,4	0,028	98,0
2	Поверхностный сток из коллектора*	1,4	0,030	97,8
3	Поверхностный сток из коллектора* с дополнительными загрязнениями	9,8	0,09	99,1
4	Поверхностный сток из коллектора* с дополнительными загрязнениями	9,8	0,11	98,1

Таблица 3 - Качество реagenтной очистки сточных вод с УЗА на АКФК (20 мг/л по Al₂O₃) и Праестол (4 мг/л)

Нефтезагрязненные воды	C ₀ , мг/л	Марка реагента	C, мг/л	η , %
Модельная смесь	500	Праестол	12,9	97,4*
Модельная смесь	500	АКФК	11,6	97,7*
Модельная смесь	500	АКФК, Праестол	11,4	97,7**
Поверхностный сток	51,4	Праестол	9,4	81,7*
Поверхностный сток	51,4	АКФК	9,1	82,3*
Поверхностный сток	51,4	АКФК, Праестол	1,9	96,3**
УЗА: Праестол- 6 мин, АКФК - 1 мин; *5-мин. флотация; **3-мин флотация				

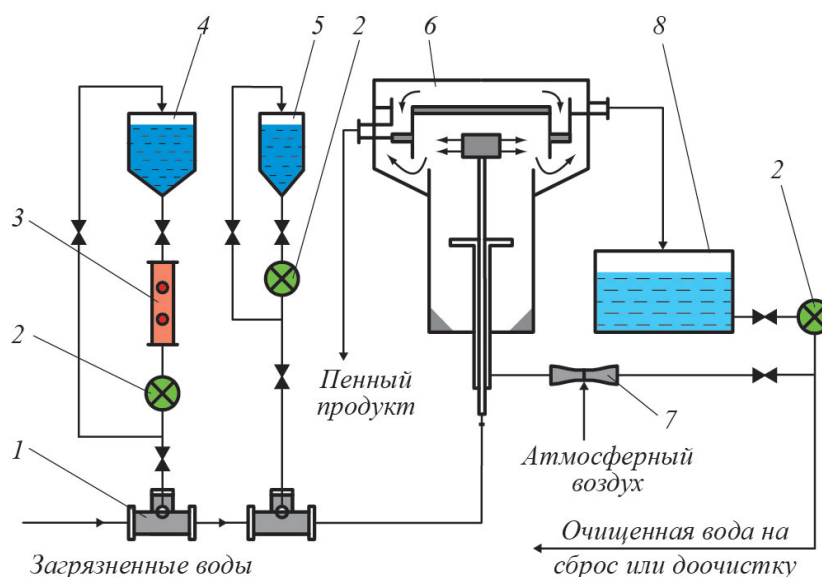


Рис. 2. Принципиальная аппаратурно-технологическая схема процесса ультразвуковой реагентной флотации:

- 1 — гидродинамический излучатель; 2 — насос; 3 — ультразвуковой реактор;
 4 — ёмкость коагулянта; 5 — ёмкость флокулянта; 6 — флотационный аппарат;
 7 — гидродинамический кавитатор; 8 — ёмкость для сбора очищенной воды.

Полученные результаты позволили разработать блок предварительной активации реагентов «Пульсар-2», приведённый на рис. 3 [12].

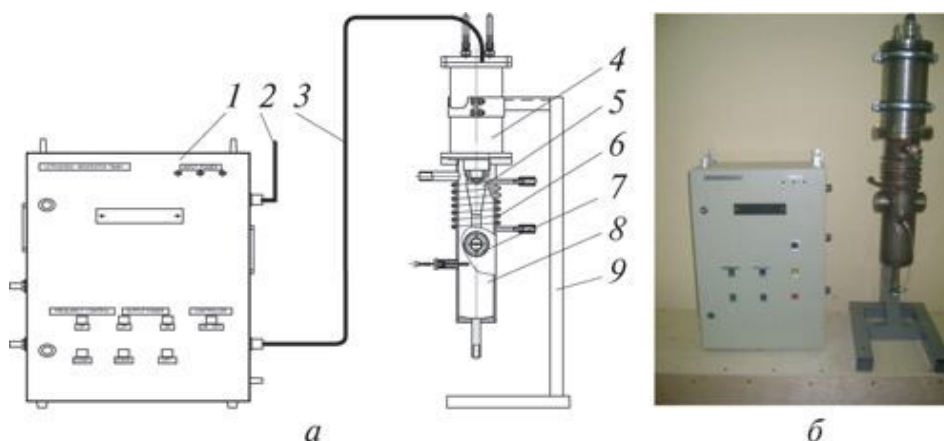


Рис. 3. Схема (а) и общий вид блока предварительной УЗА реагентов (б) «Пульсар 2»:
 1 - генератор, 2 - кабель питания, 3 - выходной кабель, 4 - преобразователь, 5 - волновод, 6 - термостатирующий радиатор, 7 - окно визуализации, 8 - реактор, 9 - стойка.

В результате проведённых исследований установлено:

1. УЗА коагулянтов и флокулянтов оказывают интенсифицирующее влияние на процесс очистки нефтезагрязненных стоков:

- степень очистки модельных эмульсий при использовании коагулянтов при предварительной УЗА в течение 2 мин возросла на 20 %;

- эффективно совместное действие коагулянта и флокулянта при предварительной УЗА. Наилучший результат наблюдается при УЗА Аква-Аурата (30 с) и Праестола (10 с), что обеспечивает повышение степени очистки более чем в два раза;

- использование концентрированного реагента АКФК для очистки нефтезагрязнённых стоков, снижает его активность, примерно на 6% по сравнению с разбавленным реагентом. УЗА концентрированного реагента повышает активность АКФК

более чем на 20%, а разбавление и последующая УЗА этого реагента повышает его активность приблизительно на 45%;

- очистка нефтезагрязнённых стоков, имеющих температуру 5...6 °С, с использованием реагентов АКФК и Праестол, подвергнутых предварительной УЗА, обеспечивает качество очищенной воды в соответствии с нормами ПДК для рыбохозяйственных водоёмов.

2. На экспериментальном стенде отработана технология очистки поверхностных стоков, поступающих в р. Москву по коллектору Студенец–Ваганьковского ручья. Анализ результатов на стенде показал:

- качество глубокой очистки поверхностных вод при минимальном расходе реагентов может быть достигнуто при последовательном вводе в загрязнённый поток после УЗА растворов АКФК (10 мг/л по Al_2O_3) и флокулянта марки «Праестол» (2 мг/л);

- ультразвук в данном случае играет определяющую роль и является необходимым фактором, гарантирующим надлежащий режим работы очистных сооружений в холодное время года, когда температура вод в течение 5-6 месяцев не превышает 6-8 °С;

- технология УЗ реагентной флотации рекомендуется для использования при строительстве новых и модернизации старых очистных сооружений.

Список литературы

1. Запольский А. К., Баран Л. А. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды: Свойства, получение, применение. Л.: Химия, 1987. 208 с.

2. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Гетманец С.В. Коагуляция в технологии очистки природных вод. М.: Наука, 2005. 576 с.

3. Chemistry with Ultrasound / Ed. by T.J. Maison. The Society of Chemical Industry. London. Elsevier, 1990. 195 с.

4. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязнённых вод и грунтов. Дис. докт. техн. наук. М.: Московский государственный университет инженерной экологии, 2011. 391 с.

5. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация добычи и переработки нефти. - М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2014. 168 с.

6. Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Векслер Г.Б. Ультразвуковая техника в процессах добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязнённых вод и грунтов // Химическая техника. 2012. Ч. 2. № 11. С. 34 - 38.

7. Абрамов В.О., Булычев Н.А., Градов О.М., Кистерев Э.В., Муллакаев М.С. Исследование особенностей ультразвукового воздействия на гетерогенные системы жидкость - дисперсионные включения газовой, жидкой и твёрдой фазы // Сб. трудов II междунар. конф.: «Современные проблемы общей и неорганической химии». Москва. 2009. С. 479 - 490.

8. Коагулянт-флокулянт алюмокремниевый. ТУ 2163-001-41542Э62—96.

9. Кручинина Н.Е. Алюмокремниевые флокулянты-коагулянты в процессах водоподготовки и водоочистки. Дис. докт. техн. наук. Иваново. Ивановский государственный химико-технологический университет, 2007. 278 с.

10. Abramov O.V., Abramov V.O., Veksler G.B., Kulov N.N., Zobotina E.V., Kashirskaya O.A., Shkolnikov A.V., Mullakaev M.S. Ultrasonic activation of reagent purification of surface wastewaters from oil products // Theoretical foundations of chemical engineering. 2009. Vol. 43. P. 568-574.

11. Абрамов В.О., Векслер Г.Б., Муллакаев М.С., Аитова И.З. Ультразвуковая интенсификация процессов очистки поверхностных вод Студенец–Ваганьковского ручья на Краснопресненской набережной г. Москвы. // Экология и промышленность России. 2011. № 1. С. 10-12.

12. Аитова И.З., Векслер Г.Б., Гольберг Г.Ю., Муллакаев М.С. Интенсификация флотационной очистки нефтезагрязнённых вод с предварительной ультразвуковой активацией реагента// Известия МГТУ (МАМИ). 2012. Т. 4. № 2. С. 129-135.

УДК 66.011

**ЭФФЕКТИВНЫЕ ТИПОВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ
НАГРЕТЫХ ВЛАЖНЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**
**EFFECTIVE STANDARD DEVICES FOR HEAT RECOVERY FROM HEATED HUMID
EMISSIONS FROM HEAT PROCESS EQUIPMENT**

**Михаил Павлович Тюрин, Елена Сергеевна Бородина,
Маргарита Алексеевна Апарушкина**
Mikhail P. Tyurin, Elena S. Borodina, Margarita A. Aparushkina

Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow State University of Design and Technology, Russia, Moscow
(e-mail: pacht.ppps@gmail.com, paxt@yandex.ru)

Аннотация: В работе приводятся конструкция вихревого скруббера для улавливания фосфатной пыли и утилизации теплоты отработанного нагретого высоковлажного воздуха после распылительной сушилки, а также аналитически полученные соотношения для оценки его эффективности.

Abstract: The paper presents the design of the vortex scrubber for arrest phosphate dust and for the heat recovery from waste heated high-moisture air after spray dryer. Analytically derived relations for the evaluation of its effectiveness are also given.

Ключевые слова: утилизация теплоты, скруббер, пылеулавливание

Keywords: heat recovery, scrubber, dust-arrest

Одними из важнейших проблем химической и легкой промышленности, особенно в производстве сыпучих материалов, сопровождающемся 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 – 210⁰С, запыленность газового потока – 5 мг/м³, при медианном диаметре частиц пыли – 5 мкм при расходе пылевоздушной смеси $V = 9080 \text{ м}^3/\text{ч} = 11700 \text{ кг/ч}$ и влагосодержании $d = 0,139 \text{ кг/кг с.в.}$, 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 «РЕАТЭКС» 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.

Основными недостатками такого скруббера является:

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

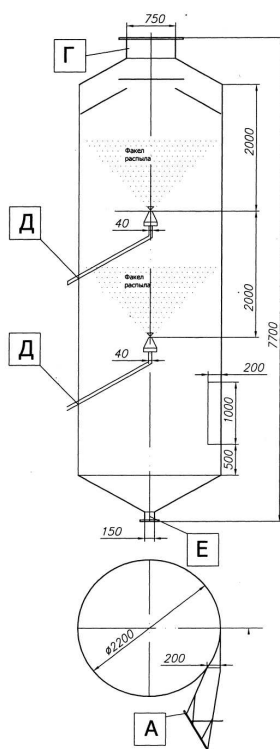


Рис. 1. Схема центробежного скруббера.

А - вход газа из распылительной сушилки, из прокалочного аппарата и из системы пневмотранспорта;

Г - выход газа; *Д* - вход воды;

Е - выход воды.

рассчитывается по формуле:

$$\eta_{oc} = 1 - (1 - \eta_{ис})(1 - \eta_n)(1 - \eta_d), \quad (1)$$

где $\eta_{ис}$, η_n , η_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.

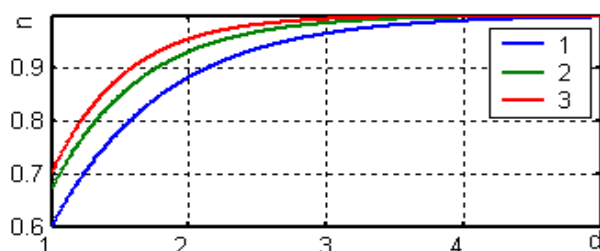


Рис. 2. Фракционная эффективность пылеулавливания η при $v_{x ep} = 15$ м/с.

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

$$Km_V = \frac{t_{ж.н} - t_{2,м}}{t_{ж.н} - t_{1,м}} = \left(1 + \frac{k_V \cdot m_M \cdot V_A}{Bm + 1}\right) \cdot e^{-k_V \cdot m_M \cdot V_A}, \quad (2)$$

где $Bm = (G_{ж} \cdot c_{p,ж}) / (G_{г} \cdot c_{p,г})$

После анализа составляющих уравнения (2) и соответствующих преобразований было получено критериальное уравнение для коэффициента интенсивности тепломассообмена, которое с учетом экспериментально полученных значений постоянных коэффициентов выглядит следующим образом:

$$Km = 5,91 \cdot Re^{-0,325} \cdot Bm_1^{-0,35}, \quad (3)$$

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. / Б. С. Сажин, М. П. Тюрин, Сажина М. Б., 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 / 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. XXV. – №11 (127). – С. 119-121.

УДК 66.011

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ В ВИХРЕВЫХ И ЦИКЛОННЫХ АППАРАТАХ A SYSTEMATIC APPROACH TO THE MODELING OF THE DUST COLLECTION IN CYCLONE AND VORTEX DEVICES

Александр Сергеевич Белоусов, Владислав Германович Казачек
Alexander S. Belousov, Vladislav G. Kazachek

Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow State University of Design and Technology, Russia Moscow
(e-mail: as.belousov-2@yandex.ru)

Аннотация: Предложены уравнения для расчета эффективности улавливания в вихревых аппаратах. Полученная модель учитывает распределение тангенциальной скорости газа в объеме, конструкцию аппарата и структуру потоков. Проведено экспериментальное исследование эффективности улавливания. Показано, что модель обеспечивает хорошее совпадение расчета и эксперимента для вихревых аппаратов разной геометрии.

Abstract: The equations for calculation of collection efficiency in vortex devices were proposed. The resulting model takes into account the distribution of the tangential velocity of the gas in the volume, the construction of the apparatus and flow patterns. The experimental research of collection efficiency was conducted. It was shown that the model provides good agreement between calculation and experiment for vortex devices of different geometry.

Ключевые слова: моделирование, системный подход, эффективность улавливания, вихревые аппараты, циклоны.

Keywords: Modelling, systematic approach, collection efficiency, vortex devices, cyclones.

Особенностями процесса пылеулавливания в вихревых и циклонных аппаратах являются: сложность гидродинамики несущей фазы и стохастический характер движения дисперсных частиц под влиянием турбулентности и неоднородности полей. Эти факторы вызывают сильную чувствительность выходных характеристик к значениям режимных и конструктивных параметров. Существующие методы расчета рабочих параметров вихревых аппаратов обычно основаны на экспериментальных константах, подобранных, в основном, для конкретных конструкций и режимов работы. Результаты этих исследований обобщаются с помощью теории подобия или другими полуэмпирическими методами так, чтобы их можно было пересчитать на заданные проектные условия: физико-химические свойства пыли, требуемую степень очистки, температуру газа, размеры аппарата, энергозатраты [1-3]. То есть, указанные методы в определенной степени учитывают стохастический характер процесса разделения, однако не описывают структурные особенности гидродинамики.

С другой стороны, классический подход системного анализа в химической технологии, основанный на кривых отклика на динамическое возмущение, в данном случае может дать лишь некоторые частные результаты для отдельных фракций дисперсного материала. Как показано в работе [4], даже при относительно небольшом изменении диаметра частиц (в диапазоне 140-210 мкм), среднее время пребывания меняется на 30-40 %. Для полидисперсной системы, где размеры частиц отличаются на порядок, наложение спектров разных фракций существенно искажает информацию о структуре потоков.

Обзор экспериментальных исследований, а также расчетов пылеулавливания с помощью программ вычислительной гидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics), основанных на так называемых канонических моделях турбулентности [1-3], показал, что, несмотря на большую сложность и стоимость CFD – пакетов, их прогнозирующие возможности для центробежных пылеуловителей пока недостаточны. В таблице 1 обобщены данные этих расчетов по результатам работ [5-7] в сравнении с экспериментами. Последняя графа таблицы содержит отношение расчетной медианы фракционной эффективности улавливания (ФЭУ) к значению экспериментальной медианы ФЭУ.

Таблица 1. Расчет эффективности улавливания циклонных и вихревых аппаратов на основе решения краевых задач с базовыми моделями турбулентности

Тип аппарата	Модель расчета	D , м	Скорость на входе, м/с; (или число Re)	Параметр крутки S	$\frac{d_{50,r}}{d_{50,e}}$
Циклон Z10	$k-\varepsilon$	0,04	10	12,9	1,96
Циклон Z20	$k-\varepsilon$	0,08	10	12,9	1,78
Циклон Z20	$k-\varepsilon$	0,08	4,3	12,9	1,03
Циклон Z80	$k-\varepsilon$	0,32	10	12,9	0,85
Двойной циклон	$k-\varepsilon$	0,23	25	6,3	3,01
Циклон Стейрманда	RSM	0,25	15,2	4,7	0,62
Прямоточный пылеуловитель	RSM	0,19	(Re=86000)	2,6	0,55
Прямоточный пылеуловитель	RSM	0,19	(Re=86000)	8,2	0,48

В таблице 1 обозначено: $k-\varepsilon$ – стандартная диссипативная $k-\varepsilon$ – модель турбулентности; RSM – модель турбулентности в напряжениях Рейнольдса; S - интегральный параметр крутки завихрителя; $d_{50,r}$ - расчетное значение медианы ФЭУ; $d_{50,e}$ - экспериментальное значение медианы ФЭУ.

Уравнения для интегральных параметров крутки завихрителей S получены в работе [8]. Большинство исследований пылеуловителей с одним или двумя входами [1-3,8], показывает, что наиболее эффективный учет стохастического характера процесса разделения может быть выполнен с помощью описания ФЭУ в виде интегральной функции логарифмически нормального распределения. Принимая $t = (\lg d - \lg d_{\eta=50}) / \lg \sigma_{\eta}$, уравнение для функции ФЭУ получаем в виде:

$$F(d) = 100 \cdot F_0(t) = 100 \cdot F_0 \left(\frac{\lg d - \lg d_{\eta=50}}{\lg \sigma_{\eta}} \right), \quad F_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-Z^2/2} dZ, \quad (1)$$

где $d_{\eta=50}$ – диаметр частиц (мкм), улавливаемых с вероятностью 50%; $\lg \sigma_{\eta}$ – стандартное отклонение функции распределения.

В соответствии с данными, полученными в работах [8-9] для моделирования разных аппаратов, рассмотрим движение газа в виде двух потоков: нисходящего периферийного потока в кольцевом канале с радиусами R_{02} и R , а также восходящего приосевого потока в цилиндре радиуса R_0 . На входах частицы равномерно распределены по кольцевой поверхности. Движение частиц в каждом из потоков может иметь два исхода: сепарация частиц на внешнюю цилиндрическую поверхность (улов), либо унос частиц через противоположную входу торцевую стенку.

Примем, что доля второго потока, равная $k_{\delta} Q_2$, идет без всасывания до отбойной шайбы, а затем сразу переходит в восходящий поток. Остальная часть второго потока $(1 - k_{\delta}) Q_2$ равномерно всасывается в восходящий поток через цилиндрическую поверхность радиуса $R_0(K)$. Таким образом, расходы газа на входах восходящего и нисходящего потоков будут соответственно равны

$$Q_1' = (Q_1 + k_{\delta} Q_2), \quad Q_2' = (1 + k_{\delta}) Q_2 \quad (2)$$

В соответствии с данными, полученными в [9], граница раздела потоков является функцией соотношения расходов K . Определим радиус границы раздела потоков $\bar{R}_0(K)$ из равенства объемов цилиндрического канала модельного восходящего потока и аппроксимации для функции $V_1(K)$, полученной в [8]. Каждый канал охарактеризуем своей фракционной эффективностью улавливания (ФЭУ): $\eta_k(d)$, $k = 1, 2$, которая описывается уравнением (1). Движение газа в восходящем потоке рассмотрим в виде модели вращающегося твердого тела. Баланс массы газа в элементарном слое от Z до $Z + \Delta Z$ для восходящего потока сечением S_1 имеет вид

$$S_1 V_Z(Z + \Delta Z) - S_1 V_Z(Z) = -2\pi R_0 V_r(R_0) \Delta Z$$

откуда при $\Delta Z \rightarrow 0$, используя условие сохранения расхода второго потока и (2) получаем

$$V_Z = \frac{Q_1 + k_{\delta} Q_2}{\pi R_0^2} + \frac{(1 - k_{\delta}) Q_2 Z}{\pi R_0^2 H}, \quad (3)$$

При равномерном переходе нисходящего газового потока из радиальной скорости на границе раздела потоков, используя (3) и уравнения неразрывности получаем

$$V_r = - \frac{(1 - k_{\delta}) Q_2 \cdot r}{2\pi R_0^2 H} \quad (4)$$

Рассмотрим движение условного элемента восходящего потока в виде диска с высотой ΔZ и пористой цилиндрической стенкой. Из уравнений баланса потока момента количества движения для течения без искривления линий тока имеем:

$$2\pi \rho \frac{R_0^4}{4} [(V_Z \omega)_Z - (V_Z \omega)_{Z+\Delta Z}] = 2\pi R_0^3 V_r \rho \int_Z^{Z+\Delta Z} \omega_A dZ \quad (5)$$

Из (4-5), при $\omega_r = f_s \omega_1$ и при $\Delta Z \rightarrow 0$ после интегрирования и преобразований:

$$\omega_1 = \omega_0 \left[1 + \frac{(1 - k_\delta) Q_2 Z}{(Q_1 + k_\delta Q_2) H} \right]^{2f_s - 1}, \quad (6)$$

где ω_0 - угловая скорость восходящего потока при $Z = 0$.

Интегрируя уравнение равновесия частицы, с учетом (6), после преобразований для параметра d_1 получаем решение в виде

$$d_1 = \frac{0,789}{R_0 \omega_0} \sqrt{\frac{\mu(1 - k_\delta) Q_2 (2f_s - 1) \ln(\bar{L}_k)}{\rho_M H (\bar{Q}_1^{4f_s - 2} - 1)}}, \quad (7)$$

где

$$\bar{Q}_1 = 1 + \frac{Q_2'}{Q_1}, \quad \bar{L}_k = \frac{2R_0^2 \bar{Q}_1^{1/(1 - k_K)}}{R_1^2 + R_2^2}, \quad (8)$$

Поле скоростей газа в нисходящем потоке, т.е. в периферийной зоне аппарата существенно отличается от поля скоростей восходящего потока. Из расчетных и экспериментальных данных, полученных в [8-9] следует, что в нисходящем потоке можно рассматривать движение газа, как зависящее лишь от r и φ (в цилиндрической системе координат), и использовать для анализа движения газа в периферийной зоне уравнения Навье-Стокса для плоской схемы течения.

Используя решение уравнений Навье-Стокса, полученное в [10] для тангенциальной скорости V_φ

$$V_\varphi = \frac{c_\varphi}{r} \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{2R_t r^2}\right) \right]$$

из уравнения динамического равновесия частицы для нисходящего потока, после интегрирования и преобразований получаем

$$d_2 = \frac{0,558 R_{02}}{c_\varphi} \sqrt{\frac{\mu Q_2}{\rho_M H_2} \left(1 + \frac{R^4}{4R_{02}^2 (R^2 - R_{02}^2)} f_2 \right)} \quad (9)$$

$$f_2 = 0,75 - 0,5(R_{02}/R)^2 - 0,25(R_{02}/R)^4 \quad (10)$$

Параметры ω_0 и c_φ рассчитываем по конструктивным характеристикам завихрителей.

Определим эффективный (с учетом потерь) интегральный параметр закрутки S^e в сечении, отстоящем на расстоянии h от завихрителя, аналогично уравнению для интенсивности закрутки Φ , полученному в модели потерь давления [11]:

$$S^e = \frac{S}{(1 + \lambda Sh / R_S)} \quad (11)$$

Здесь S - конструктивный параметр крутки, R_S - характерный радиус, а λ - безразмерный коэффициент трения закрученного потока. Коэффициенты ω_0 и c_φ , описывающие модельные профили вращательной скорости, рассчитывались из равенства модельного параметра крутки S_M и действительного эффективного параметра крутки S_Σ , действующего в данном сечении.

Общий коэффициент очистки рассчитывался по фракционному составу пыли на входе в аппарат $D(d)$ и функциям фракционной эффективности улавливания $F(d)$ (7-8,9-10):

$$S^e = \frac{S}{(1 + \lambda Sh / R_S)} \quad (12)$$

$$\eta_0 = \int_0^\infty F(d) d(D(d)) \quad (13)$$

В табл.2 приведены расчетные и экспериментальные η^e значения степени очистки для различных значений режимно-конструктивных параметров аппаратов и параметров пылей d_{50} и σ .

Таблица 2. Эффективность улавливания пыли в вихревых аппаратах

D, m	Канал	$Q, m^3/h$	$T, ^\circ C$	K	d_{50}, mkm	σ	ρ_m	$\eta^e, \%$	$\eta^r, \%$
0,1	1+2	67	20	0,39	4,9	1,8	2770	54,2	57,3
0,1	1+2	67	20	0,62	4,9	1,8	2770	83,9	82,6
0,1	1+2	67	20	0,8	4,9	1,8	2770	83,0	85,1
0,1	1	102	160	0,59	22,5	1,45	1170	89,5	92,4
0,1	2	106	160	0,36	22,5	1,45	1170	84,1	82,3
0,1	1	106	160	0,36	22,5	1,45	1170	68,8	68,5
0,1	1	106	160	0,36	22,5	1,45	1170	75,6	73,6
0,6	1+2	6500	25	0,65	15,0	1,55	1250	84,6	85,2
2,0	1+2	100000	25	0,5	70,0	1,74	1868	90,0	87,2
2,0	1+2	100000	25	0,66	70,0	1,74	1868	95,0	96,6
2,0	1+2	100000	25	0,8	70,0	1,74	1868	97,0	98,4

Как видно из таблицы, результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Среднеквадратичная погрешность метода расчета составляет $\Delta_\eta = 2,06\%$.

Список литературы

1. Экотехника. Чекалов Л.В., Карпухович Д.Т., Смирнов М.Е. и др.; Под ред. Чекалова Л.В. Ярославль: Русь, 2004. 424 с.
2. Hoffmann A.C., Stein L.E. Gas Cyclones and Swirl Tubes. - Berlin Heidelberg New York: Springer, 2008. 422 P.
3. Вальдберг А.Ю. Современные тенденции в развитии теории и практики пылеулавливания // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2007. №7. С.48- 50.
4. Белоусов А.С., Сажин Б.С., Лопиков А.В. и др. Влияние параметров процесса на время пребывания дисперсной фазы в вихревом аппарате // Успехи в химии и химической технологии. Т. XX. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2006. №10 (68). С. 92–94.
5. Frank T., Wassen E., Yu Q. Lagrangian Prediction of Disperse Gas-Particle Flow in Cyclone Separators //ICMF '98 - 3rd International Conference on Multiphase Flow 1998. Lyon, France, June 8.-12., 1998. CD-ROM, Paper No. 217. p. 1-8.
6. Frank Th., Schneider J., Yu Q., Wassen E. Experimental and Numerical Investigation of Particle Separation in a Symmetrical Double Cyclone Separator // 8th Int. Symposium on Gas-Particle Flows. San Francisco, CA, U.S.A., July 18-22, 1999. CD-ROM Paper No. FEDSM99-7865. P. 1-10.
7. Modigell M. Weng M. Pressure loss and separation characteristics calculation of a uniflow cyclone with a CFD method //Chemical engineering & technology. 2000. V. 23. P. 753-758.
8. Belousov A.S., Sazhin B.S. Application of guided vortex breakdown for drying and separation of the powder in vortex cyclone // Proc. 2nd Nordic Drying Conf., Copenhagen, Denmark 2003. P. 475 -479.
9. Белоусов А.С., Сажин Б.С. Структура потоков в вихревых устройствах //Иzv. вузов. Технология текстильной промышленности. 2006. № 5. С. 98–103.
10. Белоусов А.С, Сажин Б.С., Кочетов Л.М, и др. Аэродинамика турбулентного потока в дисковой вихревой сушилке // Успехи в химии и химической технологии. Т. 18. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2004. №6 (46). С.126-128.
11. Белоусов А.С, Сажин Б.С., Лопиков А.В., и др. К расчету потерь давления в вихревом аппарате // Успехи в химии и химической технологии. Т. 19. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2005. №10 (58). С.62-64.

УДК 66.063.61

**ЭКОЛОГИЧЕСКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЙ,
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЙ ПРОЦЕСС ПРИЛЛИРОВАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ
ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ**
**COLOGICALLY AND TECHNOLOGICALLY SAFE, RESOURCE-SAVING PROCESS
OF PILLING AND THE POSSIBILITIES OF ITS IMPLEMENTATION**

Юлия Александровна Таран, Юлия Ивановна Смирнова
Yuliya A. Taran, Yuliya I. Smirnova

Московский технологический университет (МИТХТ), Россия, Москва
Moscow technological University (MITHT), Russia, Moscow
(e-mail: capsula2@mail.ru)

Аннотация: Предложено проводить процесс приллирования крупнотоннажных продуктов по экологически безопасной ресурсо-энергосберегающей схеме. Для этого замыкают по газообразному хладагенту (воздуху) схему гранулирования (приллирования). Замкнутый поток воздуха компримируют, охлаждают, очищают гидродутьём (водным раствором продукта), с которого «снимают» теплоту гранулообразования и поднимают на требуемый температурный уровень тепловым насосом.

Abstract: Proposed to carry out the process of prilling of large-capacity products using environmentally friendly, resource-saving scheme. For coin order to do it we close this scheme for gaseous refrigerant (air) circulation. A closed air flow is being compressed, cooled, cleaned by hydrousflow (aqueous solution) from which the heat of granulation is being "removed" and raised to the required temperature level by the heat pump.

Ключевые слова: гранулирование, энергосбережение, минеральные азотсодержащие удобрения, аммиачная селитра, крупнотоннажные производства.

Keywords: granulation, energy-saving, nitrogen-containing mineral fertilizers, ammonium nitrate, large-tonnage production.

Процессы гранулирования кристаллизацией капель расплавов в потоке хладагента (приллирование) применяются в производстве крупнотоннажных продуктов – азотсодержащих удобрений, компонентов промышленных ВВ, щелочей, серы, шлаков и др.[1,2]. В производстве крупнотоннажных продуктов используют разомкнутый по охлаждающему воздуху цикл [1,2]. Выбросы пылевидных частиц достигают 1,2 – 1,8 тыс. т./год [1,2]. Затруднено использование теплоты гранулирования мощностью до 10^4 кВт [1,2]. Предлагается осуществить процесс в замкнутом по охлаждающему воздуху цикле [1,3,6] рис. 1.

Для этого в (1), отделённых стенкой от рабочего объёма (2) башни полостях, имеющих окна (3) для засасывания охлаждающего воздуха из башни и нагнетания (4) его в объём башни, форсунками (5) диспергируют водный раствор гранулируемого вещества прямоотокм потоку гранулируемых в башне капель расплава. Поток раствора охлаждает засасываемый воздух, очищает его от пылевидных частиц и компримирует за счёт спутного течения, нагнетая в нижнюю часть башни (2) [1,2]. Горячие $\sim 0,8 T_{кр}$ гранулы доохлаждаются в псевдооживленном слое (9) до температуры затаривания (10) $\sim 40-50$ °С [1,2].

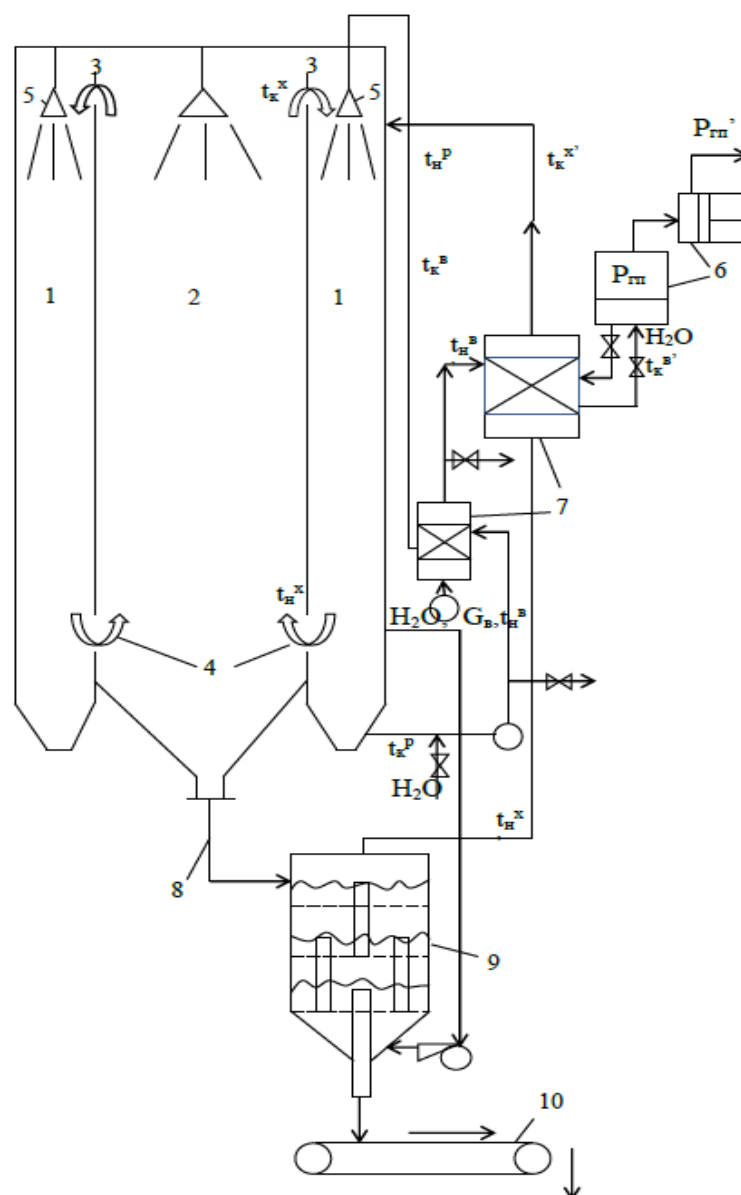


Рис.1. Схема грануляционной башни с замкнутым по хладагенту циклом с узлом полезного использования теплоты гранулирования.

Появляется возможность «съёма» (7) теплоты гранулирования [1,2,5,6] с охлаждающего воздуха и её подъёма тепловым насосом на требуемый потребителями, экономически оправданный температурный уровень. Замкнутый по хладагенту цикл даёт и др. преимущества. При гранулировании щелочей NaOH, KOH охлаждающий воздух декарбонизируют, пропуская через раствор щёлочи, который по мере срабатывания, сбрасывают в производство соды. Разработка апробирована [1,2,4,5] и не имеет аналогов.

В процессе гранулирования с замкнутым циклом существуют ограничения значений технологических параметров (рис.2). Показана возможность реализации технологии приллирования KNO_3 , KOH, NaOH, NH_4NO_3 , карбамида, NPK 16:16:16 - удобрений, серы, шлаков и др. в гранбашнях с замкнутым циклом и использованием для охлаждения и гидродутья воздуха водных растворов этих веществ с концентрацией 40-50% масс. при температурах до $70^\circ C$.

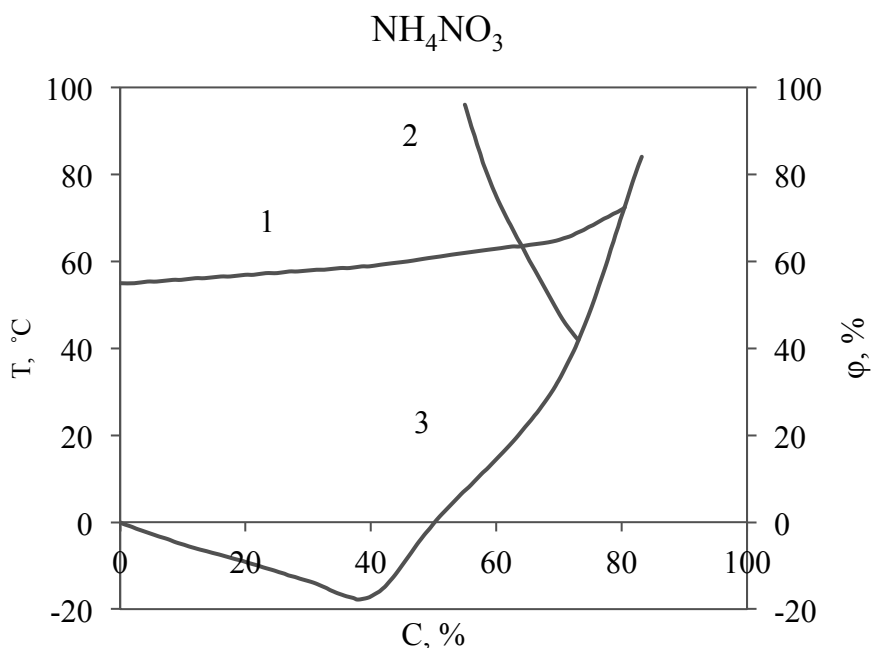


Рис. 2. Зависимости температуры от концентрации водного раствора, при которых упругость паров воды над раствором равна упругости паров воды над гранулируемым расплавом (кривая 1), рассчитанная по этим данным относительная влажность воздуха грануляционной башне (2), температура ликвидуса системы вещество - H_2O (3).

Процесс проводят в восходящем потоке воздуха, движущегося со скоростью до 0,5-2 м/с в грануляционных башнях производительностью 30-60 т/ч с рабочей высотой 20–82,5 м круглого диаметра 8–27 м или прямоугольного сечения 8x11 м. Гранулы доохлаждаются в псевдооживленном слое за пределами башни. Расплав диспергируют вибрационными, статическими, центробежными грануляторами, а компримирующий, охлаждающий, очищающий раствор – форсунками. Возможна реконструкция действующих агрегатов прилирования организацией гидродутья [1,2,5,6].

Плотностью орошения промывочной жидкостью полостей, примыкающих в грануляционной башне, обеспечивают и регулируют напор воздуха:

$$q = \frac{8}{3} \Delta P \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{в}}} \left[\int_0^{\infty} \int_0^H \frac{w_{\text{в}}^{p^2} f(r_p)}{r_p \omega^p} dr_p dh \right]^{-1}, \quad (1)$$

где: q – среднее значение плотности орошения промывочной жидкостью в зоне очистки и охлаждения воздуха, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$; ΔP – напор воздуха, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$; $\rho_{\text{ж}}, \rho_{\text{в}}$ – плотности воздуха и промывочной жидкости, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; H, h – протяженность зоны очистки, охлаждения, компримирования воздуха, м; r_p – радиус капель промывочного раствора, м; $f(r_p)$ – плотность распределения капель по радиусу, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $w_{\text{в}}^p, \omega^p$ – скорости обтекания витания капель и встречного потока воздуха в компримирующей башне, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Его не сложно рассчитать по зависимостям, которые необходимо проанализировать, оценивая условия возможного гидродутья. Изменением плотности орошения промывочной жидкости в упомянутых выше пределах достигается требуемый напор воздуха от 50 до $300 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ при его подаче в гранбашню по замкнутому контуру. Концентрацию раствора промывочной жидкости поддерживают в пределах 20 – 70%. Наиболее предпочтительные размеры капель промывочной жидкости 0,5 – 3мм, и время контакта промывочной жидкости с газом 1 – 10с. Зависимость удельного расхода промывочной жидкости на $1 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ расплава от соотношения диаметров капель промывочной жидкости к диаметру гранул показана на рис.3.

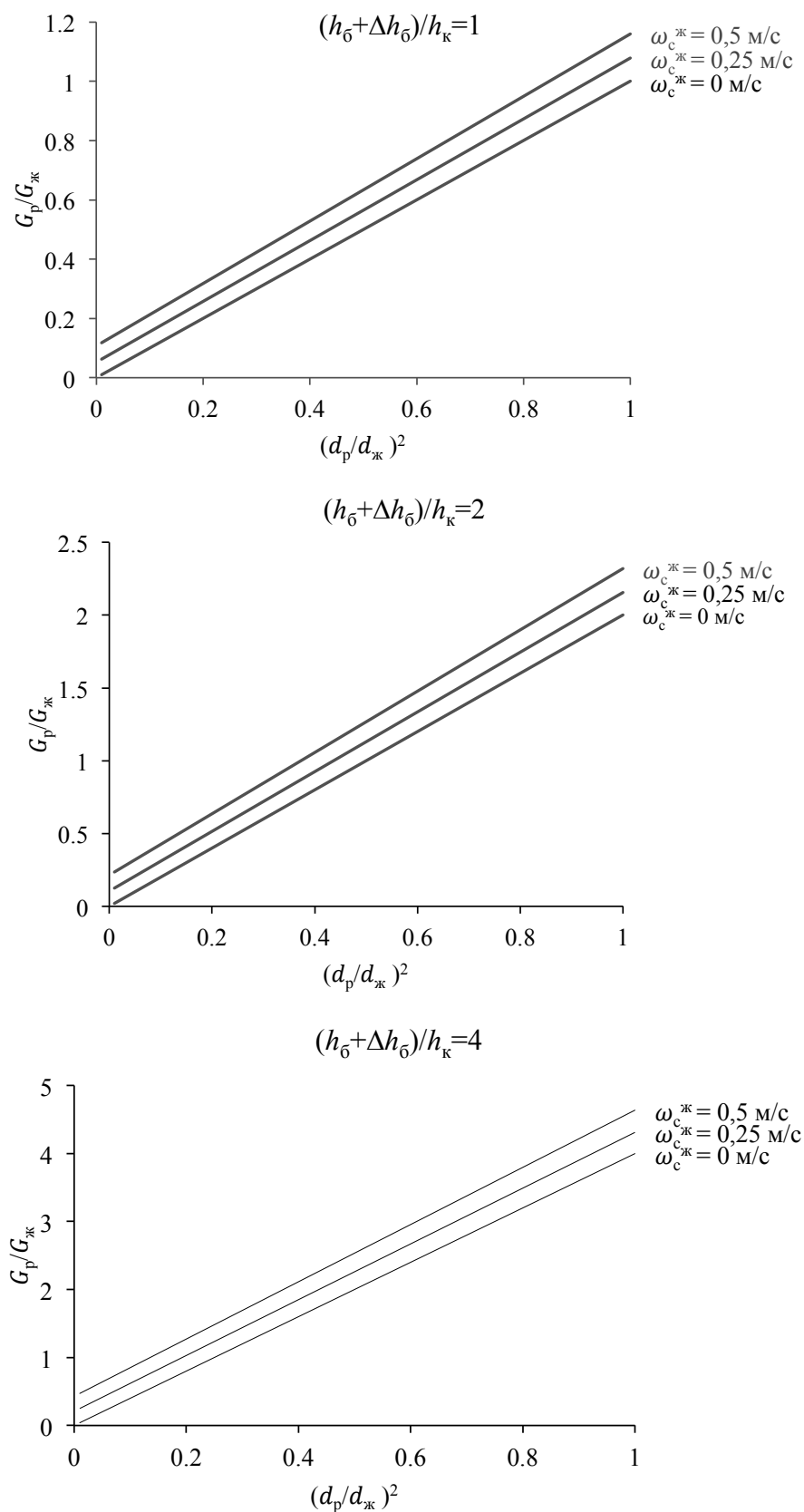


Рис.3. Зависимость удельного расхода промывной жидкости на $1 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ расплава $\left(\frac{G_p}{G_ж}\right)$ от соотношения диаметров капель промывной жидкости к диаметру гранул $\left(\left(\frac{d_p}{d_ж}\right)^2\right)$, скорости встречного потока воздуха в грануляционной башне $(\omega_с^ж)$ и соотношения высот башни и колонны $\left(\frac{h_б + \Delta h_б}{h_к}\right)$.

Из условий равновесия столбов 2-х фазных систем в грануляционной башни и в полости для компримирующего гидродутья получены соотношения между расходами расплава $G_{\text{ж}}$ и расходом компримирующего раствора $G_{\text{рв}}$ зависимости $(G_{\text{рв}}/G_{\text{ж}})$ от размеров гранул $(d_{\text{р}}/d_{\text{ж}})^2 + \omega_{\text{с}}S_{\text{б}}/w_{\text{в}}S_{\text{к}}$ и площадей сечений башни и полости и соотношения скоростей воздуха и скорости витания $(\omega_{\text{с}}/w_{\text{в}})$ [1]:

$$\frac{G_{\text{рв}}}{G_{\text{ж}}} = \frac{\left(\frac{d_{\text{р}}}{d_{\text{ж}}}\right)^2 + \frac{\omega_{\text{с}} S_{\text{б}}}{w_{\text{в}} S_{\text{к}}} h_{\text{б}}}{1 - \frac{\omega_{\text{с}}}{w_{\text{в}}} h_{\text{к}}}, \quad (2)$$

где $h_{\text{б}}$, $h_{\text{к}}$ – высота рабочих зон грануляционной башни и полостей для гидродутья.

При практических расчётах принимали вышеизложенные, упрощающие допущения. Однако расчёт процесса кристаллизации капель расплава, падающих в гранбашне, проводили по предложенному нами математическому описанию процесса [1]. Процесс кристаллизации капель расплава энантиотропных превращений в кристаллической фазе, связанные с этими превращениями усадочные явления и возникающие термические напряжения обеспечивают образование будущей структуры гранулы, которая определяет её физико-механические потребительские свойства, которые должны соответствовать требованиям нормативной документации.

Список литературы

1. Таран Ю.А. Разработка и анализ процессов гранулирования расплавов с использованием экологически безопасных энергосберегающих схем. Дис.... канд. техн. наук М.: МИТХТ, 2011.
2. Таран А.Л., Долгалёв Е.В., Таран Ю.А. Математическое описание процесса гранулирование известково-аммиачной селитры в башнях // Химическая технология. 2007. Т. 8. №8. С. 376.
3. Иванов М.Е., Малкин Б.И. Численное решение задачи определения механики и теплообмена при башенном гранулировании // Сб. Производство азотных удобрений, Труды ГИАП, М.: ГИАП, 1985. С. 99.
4. Иванов М.Е., Беркович А.Ш., Иванов А.Б. и др. А. с. 1137631 РФ // Б. И. 1990. №43.
5. Иванов М.Е. Теоретические основы аммиачной селитры и разработки крупнотоннажных агрегатов её производства. Автореферат дис. ... докт. техн. наук. – М., ГИАП. 1988. 38 с.
6. Таран Ю.А., Захаров М.К. Энергосберегающие схемы в технологиях производства продуктов, гранулированных кристаллизацией капель расплавов // Вестник МИТХТ. 2011. Т. 6. № 1. С.1.

УДК 66.081.63

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОБАРОМЕМБРАННОЙ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ
РАСТВОРОВ КРАХМАЛЬНО-ПАТОЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВ
EFFICIENCY BIOBAROMEMBRANNOY CLEANING INDUSTRIAL SOLUTIONS
STARCH AND TREACLE PRODUCTION**

**Сергей Иванович Лазарев, Ольга Александровна Ковалева,
Дмитрий Сергеевич Лазарев
Sergey I. Lazarev, Olga A. Kovaleva, Dmitry S. Lazarev**

*Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(e-mail: solomina-oa@yandex.ru)*

Аннотация: Рассмотрены некоторые преимущества применения биобаромембранной технологии для очистки сточных вод крахмально-паточного производства. Представлена технологическая схема, на основе которой были проведены экспериментальные исследования по биобаромембранной очистке сточных вод.

Abstract: Some advantages of using biobaromembrane technology for cleaning waste water starch and treacle production were researched. Technological scheme, on the basis of which were carry out the experimental research of biobaromembrane technology for cleaning wastewater, was represented.

Ключевые слова: . биофильтрация, баромембранный процесс, динамические мембраны
Keywords: biofiltration, baromembrane process, dynamic membrane

К крахмально-паточной отрасли промышленности относятся такие предприятия и заводы, которые занимаются переработкой картофеля на спирт, сухой крахмал, кукурузно-крахмальные и кукурузно-паточные заводы, перерабатывающие кукурузу на сухой крахмал и патоку.

На предприятиях крахмально-паточной промышленности существуют практически большинство вредных выделений, связанных с использованием различных видов сырья, а также разнообразных видов его переработки.

Сточные воды образуются на заводах крахмально-паточной промышленности в результате многих технологических процессов обработки сырья (например, от гидротранспортера), мытья оборудования, охлаждения вакуум-насосов, аппаратов, холодильников, воздуходувок, барометрических конденсаторов и др.

Сложные водные системы являются многокомпонентными, состоят из веществ, значительно отличающихся между собой по физико-химическим свойствам. Поэтому для разделения таких водных систем использование напрямую микрофильтрации, обратного осмоса, ультрафильтрации нецелесообразно.

В связи с этим возникает необходимость в предварительной, специальной обработке (доводке) сточной воды. Также, с помощью предварительной обработки возможно существенно увеличить поток воды, очищаемой через баромембрану. Биологические фильтры применяют для искусственной (биологической) очистки сточных вод, окисляя кислородом загрязненные сточные воды при помощи микроорганизмов, которые образуют биологическую пленку вдоль поверхности фильтра.

Принцип работы биофильтра следующий. Вначале сточная вода в первичных отстойниках осветляется, затем поступает под давлением (самотеком) в распределительные устройства, откуда попадает на фильтрующую поверхность биофильтра. Далее, проходя сквозь фильтрующую часть биофильтра, из-за адсорбции загрязненная вода освобождается от коллоидных органических и взвешенных веществ, которые в первичных отстойниках не

задержались. Вследствие адсорбции на поверхности фильтрующей части биофильтра образуется пленка, которая активно заселена микроорганизмами. Микроорганизмы биопленки получают энергию, необходимую для жизнедеятельности, окисляя органические вещества. Для увеличения массы микроорганизмы также используют растворенные в загрязненной воде органические вещества. Из этого следует, что в теле биофильтра формируется растущая масса биологической пленки, а органические вещества из сточной воды. Биологическая пленка, которая уже отработала (отмерла), смывается и выносится сточной водой за границы биофильтра.

Сточная вода, проходя через фильтрующую поверхность биофильтра, попадает в дренажи в дне с отверстиями, собирается на цельном водонепроницаемом днище, затем попадает в отводные лотки, которые находятся за пределами биофильтра, и в конце собирается во вторичные отстойники. Здесь биологическая пленка задерживается и вытекает из биофильтра вместе с очищенной (биологически) сточной водой.

Состав технологических растворов и стоков, а также последовательность операций по очистке этих растворов является очень важным моментом, так как по нему производится подбор определенного эффективного метода очистки, одним из которых является мембранный, обеспечивающий удерживание примесей и растворенных веществ даже на молекулярном уровне.

Из литературных данных известно, что применение баромембранного процесса очистки стоков различных производств (пищевых, химических, машиностроительных) заключается в продавливании загрязненного раствора через мембрану при избыточном давлении больше осмотического, которое направлено со стороны пористой подложки из потока пермеата. Немаловажным аспектом применения баромембранных процессов разделения растворов является задача конструктивного оформления аппаратов обеспечивающих минимальное гидравлическое сопротивление в каналах баромембранного аппарата [1]. Для приведенных разъяснений основным моментом является прокачивание обрабатываемого раствора в циркуляционном проточном режиме вдоль поверхности межмембранного канала всего аппарата, причем часть раствора проходящего через мембрану будет называться пермеатом, а концентрированного раствора – ретентатом.

Условием нормального функционирования баромембранного разделительного элемента в циркуляционном проточном режиме работы являются оптимальные гидродинамические условия, оптимальные временные режимы работы и т.д.

Возможность применения биобаромембранной технологии (биофильтрация + баромембранный процесс) для очистки сточных вод крахмально-паточного производства исследовалась на заводе по производству крахмала в селе Хоботово Тамбовской области. Биофильтрация проводилась на пятисекционном каскадно-дисковом биофильтре, в котором вращалась биопленка. Исследования баромембранного процесса разделения осуществлялись на установке с мембранами УАМ-150, УПМ-К [2]. На рисунке 1 представлена технологическая схема, на основе которой были проведены экспериментальные исследования по биобаромембранной очистке сточных вод крахмально - паточного производства. Составными элементами схемы являются: емкость с исходным раствором, фильтр для предварительной очистки сточных вод, центробежные насосы, каскадно-дисковый биофильтр, промежуточная емкость, насос дозатора, мембранный элемент, адсорбционная колонна, а также линия рециркуляции ретентата.

Рассмотрим более подробно представленную схему. Из емкости с исходным раствором 1 сточная вода попадает в фильтр 2, осуществляющий предварительную очистку. С помощью центробежного насоса 3 раствор подается в биофильтр 4, в котором вода очищается частично, а затем поступает в промежуточную емкость 5. Далее насосом дозатором 6 раствор подается в мембранный элемент 7, где делится на ретентат (сконцентрированный раствор) и пермеат (очищенный раствор). Пермеат попадает в адсорбционную колонну 9 и после хлорирования может использоваться для хозяйственных нужд. Адсорбционная колонна используется для доочистки сточных вод, в случае если в

пермеате содержатся органические вещества, которые не были задержаны биобаромембранной системой. Ретентат с помощью центробежного насоса 8 поступает в емкость с исходным раствором 1 по линии рециркуляции и вновь проходит процесс разделения.

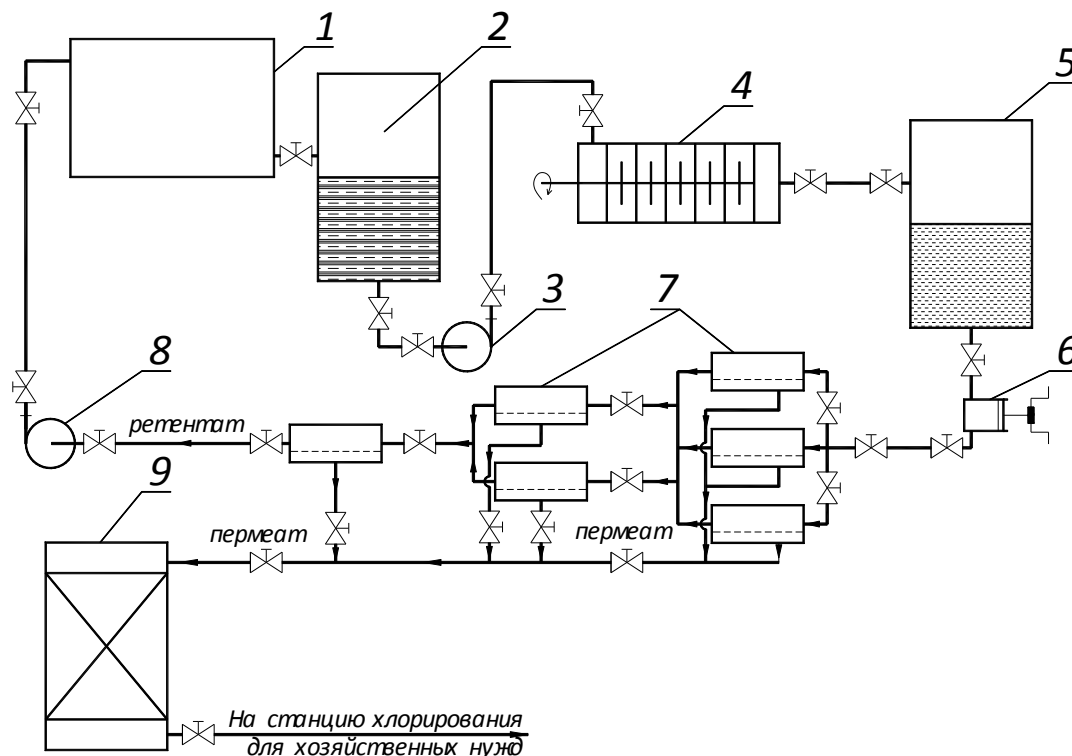


Рис. 1. Технологическая схема очистки биобаромембранными методами сточных вод крахмально-паточных производств

В ходе экспериментов было установлено, что в процессе очистки сточных вод на ультрафильтрационных мембранах образуются динамические мембраны из веществ, входящих в состав сточных вод крахмально-паточных производств [2, 3].

Наличие динамических мембран позволяет реализовать самозадержание веществ из сточных вод, а также, добиться высокой производительности и качества разделения раствора. Необходимо отметить, что процесс разделения раствора можно регулировать за счет сжимаемости селективного слоя динамической мембраны

Преимуществами биобаромембранной технологии являются: высокий удельный поток и коэффициент задерживания мембраны; микроорганизмы в биофильтре хорошо усваивают органические вещества, которые не задерживаются мембранами; решается вопрос утилизации ретентата в процессе баромембранного разделения; зарождается потенциал формирования замкнутых технологических схем процесса очистки сточных вод крахмально-паточных производств от органических веществ. Стоит также отметить, что применение мембран, которые характеризуются большим потоком пермеата, позволит сократить размер всей очистительной системы, а это является неоспоримым преимуществом биобаромембранной технологии.

Список литературы

1. Дытнерский Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация. М.: Химия. 1978. 352 с.
2. Лазарев С.И. Ультрафильтрационное разделение водных растворов крахмально-паточных производств // Известия вузов. Пищевая технология. 2000. №1. С. 91-93.
3. Брык М.Т., Цапюк Е.А. Ультрафильтрация. Киев: Наукова думка. 1989. 288 с.

УДК 628.4

**СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ
METHODS OF SOLID WASTE CONSUMPTION**

**Антонина Александровна Захарова, Валентина Сергеевна Салтыкова,
Людмила Викторовна Моисеева, Ирина Николаевна Бычкова
Antonina A. Zakharova, Valentina S. Saltykova, Lyudmila V. Moiseeva, Irina N. Bychkova**

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow
(e-mail:dekanat-ximiki@rambler.ru)*

Аннотация: Рассмотрены способы утилизации твердых отходов потребления, в том числе дубленных кожевенных отходов, отходов высокомолекулярных соединений. Проведена оценка влияния технологии переработки на окружающую среду.

Abstract: Methods of disposal of solid waste consumption, including tanned leather wastes, wastes of high molecular compounds. The influence of processing technology on the environment.

Ключевые слова: пиролиз, газификация, искусственное жидкое топливо, отходы потребления.

Keywords: pyrolysis, gasification, synthetic liquid fuel, and waste consumption.

Увеличение масштабов производства, использование упаковочных материалов, появление новых разнообразных предметов быта приводит к росту объема различных отходов, которые требуют переработки с целью сокращения их объемов.

Утилизация твердых отходов промышленности и потребления в настоящее время является наиболее сложной экологической проблемой, так как при любом способе переработки происходит загрязнение природной среды.

Существуют три способа утилизации твердых отходов:

- захоронение на полигонах;
- сжигание на мусоросжигательных заводах;
- высокотемпературный пиролиз и газификация.

Любой из этих способов требует сортировки отходов с целью извлечения вторичного сырья.

В Российской Федерации ежегодно образуется около 7 млрд. твердых отходов производства и потребления. Около 28% этих отходов используется как вторичное сырье на предприятиях (твердые промышленные отходы), 18% используется в качестве вторичного сырья (металл, стекло, бумага, некоторые пластики), а остальная часть вывозится на полигоны.

На территории России в отвалах и хранилищах, на полигонах накопилось больше 80 млрд. т. твердых отходов, среди них 1,6 млрд. т. – токсичных и экологически опасных. Полигоны являются источником выделения свалочных газов, включающих CH_4 , CO_2 , H_2S (парниковые газы). Цикл образования свалочных газов составляет 15-40 лет. Ежегодно под полигоны выделяется 1-3 тыс. га земли.

Мусоросжигательный завод имеет комплекс оборудования для сжигания и очистки отходов. Температура сжигания поддерживается на уровне 1000 °С. Состав отходящих газов: CO_2 , CO , HCl , Hg , NO_x , SO_2 , HF , Cd , диоксины, фураны, летучая зола, аэрозоли и др.

В [1,2] приведены расчеты количества вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу на 1 млн.т. отходов при сжигании и захоронении на полигоне.

На полигоне: общие газовые выбросы (свалочные газы) – 94334 т., в том числе $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$ – 90317 т., NH_3 – 910 т., H_2S – 44,58 т., толуол – 1233,98 т., этил бензол – 162 т.

При сжигании: кроме CO_2 , в атмосферу выбрасывается CH_4 хлорированные диоксины и фураны в количестве: $0,81 \cdot 10^{-6}$; HF-1,82 т; HCl – 10,5 т.

В выбросах современного мусоросжигательного завода концентрация вредных веществ составляет в мг/м^3 : пыль – 30; CO – 100; NO_x – 100; SO_2 – 400; HCl – 200; HF – 4; Hg – 0,05; Cd – 0,05, дибензо-п – диоксины – 0,2, зола и другие. Зола при сжигании отходов содержит до 7% летучей пыли и значительного количества оксидов тяжелых металлов. Летучая пыль является весьма токсическим отходом, поэтому ее использование в качестве добавки к строительным материалам нежелательно.

Таким образом, выбросы мусоросжигательного завода весьма опасны для здоровья человека и окружающей среды.

Альтернативой вышеперечисленным способам утилизации являются пиролизные технологии, позволяющие получать пиролизный газ. Пиролизные процессы включает и газификационные установки, когда теплота к отходам подводится нагретым воздухом или топочными газами, содержащими кислорода низкотемпературный и высокотемпературный пиролиз.

Высокотемпературный пиролиз ($t=1800-2500$ °C) [3] базируется, в основном, на плазменных технологиях, позволяющих перерабатывать отходы без особых ограничений, в том числе медицинские, резинотехнические, отработанные масла, осадки сточных вод и другие.

Низкотемпературный пиролиз ($t=500-700$ °C) используется при переработке торфа, сланцев [4] бурых углей и некоторых видов отходов с целью получения газообразного топлива и смолы.

На кафедре промышленной экологии и безопасности МГУДТ в течение нескольких лет занимаются вопросами переработки твердых отходов промышленности и потребления, в том числе коллагенсодержащих отходов [6], из которых получают волокнистопористый материал, обладающий хорошими сорбционными и теплозащитными свойствами (сорбционная емкость по нефти и нефтепродуктам составляет до 3 г/г). Эти работы были направлены на использование коллагенсодержащих отходов в качестве вторичного сырья. Другая часть работ была направлена на разработки способов расчета установок пиролиза и газификации. Разработаны методики расчета расходов теплоты, необходимой для процесса, принципиальные технологические схемы установок с учетом очистки пирогаза от вредных примесей; варианты дальнейшей переработки пиролизного газа и другие вопросы [7].

При пиролизе твердых отходов промышленности и потребления можно выделить 2 стадии процесса:

1. Термическое разрушение органической части отходов за счет разрыва химических связей в молекулах компонентов отходов.
2. Конденсация и полимеризация молекул, образующихся после деструкции сырья.

Состав пиролизного газа зависит от элементарного и морфологического состава отходов. Элементарный состав отходов – это углерод, кислород, водород, азот, сера и другие элементы. Если принять, что элементарный состав отходов потребления соответствует целлюлозе $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$, то реакция разложения может быть $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n t \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{нефтепродукт} + \text{твердый остаток}$. Например при переработке отходов состава: дерево-4,9%; текстиль – 8,1%; бумага – 18,6%; пищевые отходы – 15,1%; резина и натуральная кожа – 1,1%; пластмассы – 6,3%; стекло – 6,3%. Примерный состав пиролизного газа: H_2 -17,7%; CO -33,7%; CO_2 – 17,6%; CH_4 – 14,3%; C_2H_4 -5,6%; H_2S – 0,9%; HCl – 0,3%; HCN – 0,02%, остальное теплотворная способность $Q^H=0,3-3,7\text{МДж}$.

Более современные плазменные технологии допускают переработку твердых отходов с высокой влажностью при высокой температуре (до 1800 °C) без доступа воздуха приводит к разрушению веществ. Высокие температуры почти исключают образование дибензооксинов и дибензофуранов (концентрация этих веществ в выбросах $0,04$ нг/м^3) [5]. Твердый продукт,

образующийся в нижней части аппарата плазменной переработки отходов, представляет собой базальтоподобный шлак.

Плазмообразующим газом может быть метан, диоксид углерода, водяной пар.

Таким образом, пиролиз твердых отходов промышленности и потребления наиболее целесообразно проводить по 2-х ступенчатой схеме процесса: на первой ступени образуется пиролизный газ, который можно сжечь на 2-ой ступени использовать теплоту сжигания для различных целей.

Пиролизный газ (синтез-газ), образующийся при использовании плазменных технологий может быть сырьем для получения синтетического жидкого топлива, метанола, компонентов моторного топлива, и других продуктов (синтез Фишера-Тропша).

Список литературы

1. Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов. АКХ им. Памфилова, Н.И.И. им. Сысина, Н.И.И. Атмосфера. Н.П.П. Логус. 2007.
2. Н.В. Островский Мусоросжигательный завод как объект оценки воздействия на окружающую среду и экологическая экспертиза ЭК и П, 2015 - № 8. – с. 15-19.
3. Вошинин С.А., Бульба В.А., Острый И.И., Переславцев А.В., Трехсвятский С.С., Российский химический журнал, т. LIV, 2010 -№ 6. – с. 3-9.
4. Зеленина Н.И. Астраханцева, Химия и технология горючих сланцев и продуктов их переработки – Л.: Химия, 1968, - с.97.
5. Артемов А.В., Бульба В.А., Вошинин С.А., Кругляков Ю.А., и др. Каталитические процессы превращения газообразных продуктов плазменной переработки твердых отходов и углеводородного сырья. Российский химический журнал, том LIV, 2010, №6. С. 9-17.
6. Папин А.В., Кондауров Б.П. Эффективная технология получения волокнистопористого материала, Экология и промышленность России, 2011. №7, с.17-19
7. Захарова А.А. и др. Методическое пособие к расчету дипломных и курсовых проектов по теме: «Пиролизная установка для переработки твердых бытовых отходов».-М.: РИО МГУДТ, 2012, с.26

УДК 628.31

УДАЛЕНИЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД АВТОПАРКОВОК СОРБЦИЕЙ НА НЕТКАНОМ МАТЕРИАЛЕ THE REMOVAL OF OIL FROM WASTEWATER BY SORPTION PARKING LOTS ON NON-WOVEN

Нина Исааковна Миташова*, Елена Сергеевна Кольцова,
Виктор Анатольевич Волков*****

Nina I. Mitaschova*, Elena S. Koltsova **, Viktor A. Volkov***

**Российская академия естественных наук, Россия, Москва*

**Russian Academy of Natural Sciences, Russia, Moscow*

(e-mail: mitanieko@mail.ru)

***Московский Государственный Машиностроительный Университет (МАМИ),
Россия, Москва*

***Moscow State Engineering University (MAMI), Russia, Moscow*

(e-mail: koltsova.e@inbox.ru)

****Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва*

****Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow*

Аннотация: В ходе проведенного эксперимента были получены данные по очистке ливнесточных и талых вод от автопарковки с использованием нетканых фильтрующих материалов.

Abstract: In the course of the conducted experiment, data were obtained on cleaning livestock and meltwater from the Parking lot with the use of nonwoven filter materials.

Ключевые слова: нефтепродукты, автопарковки, талая вода, ливнесток, сорбция, нетканые материалы, биотестирование.

Keywords: oil, car Parking, melt water, rain-water system, sorption, non-woven materials, bioassay.

Сточные воды автопарковок содержат множество химических загрязнений. Как правило, в этих сточных водах содержатся нефтепродукты, фенолы, сумма тяжелых металлов и другие загрязняющие вещества. Для предотвращения концентрирования загрязняющих веществ необходимо их полное удаление до норм ПДК в ливнесточную канализацию или в водоемы культурно-бытового назначения.

Наиболее широко распространенными загрязнителями сточных вод являются нефтепродукты – неидентифицированная группа углеводородов нефти, мазута, керосина, масел и их примесей, которые вследствие их высокой токсичности принадлежат, по данным ЮНЕСКО, к числу десяти наиболее опасных загрязнителей окружающей среды. Нефтепродукты могут находиться в растворах в эмульгированном, растворенном виде и образовывать на поверхности плавающий слой.

Нами были проведены исследования проб талых вод от автопарковок г. Москвы (таблица №1), а также их очистка от нефтепродуктов сорбционным методом на нетканых материалах. Помимо контрольного химического анализа сточной воды, было проведено биотестирование на семенах пшеницы, с целью определения токсичности очищенной воды (фитотест) и установление класса опасности.

Таблица №1. Результаты химического анализа талой и ливнесточной воды от парковки (г. Москва Измайловский бульвар)

№ п/п	Показатели качества воды	Талая вода от автопарковки	Превышение ПДК (раз)	Ливнесточная вода от автопарковки	Превышение ПДК (раз)	ПДК в ливнесточную канализацию
1	Запах, баллы	2	2	2	2	0-1
2	Цвет	Грязно-серый	-	Грязно-серый		Б/ц
3	Цветность по разбавлению	1:7	Отс.	1:8	Отс.	1:16
4	Прозрачность по шрифту, см	2	Отс.	2	Отс.	>20
5	Мутность, мг/дм ³	270	135	270	135	2,0
6	Ph	7,5	Отс.	7	Отс.	7,5-8,5
7	Взвешенные вещества, мг/ дм ³	810	1080	810	1080	0,75
8	Сульфаты, мг/дм ³	200	2	350	3,5	100
9	Хлориды, мг/дм ³	10	Отс.	10	Отс.	200
10	Фосфаты, мг/дм ³	0,5	2,5	0,3	1,5	0,2
11	Комплекс тяжелых металлов	1×10 ⁻⁵	Отс.	1×10 ⁻⁵	Отс.	1×10 ⁻⁵
12	Фенолы, мг/дм ³	0,1	1000	0,1	1000	0,001
13	Железо, мг/дм ³	5	Отс.	0,5	1,7	0,3
14	нефтепродукты, мг/дм ³	40	800	20	400	0,05

Использование метода фильтрации в технологической линии очистки сточных вод, в качестве одного из перспективных и эффективных методов глубокой очистки, может в определенной мере решить эту проблему. В эксперименте проводили очистку и доочистку динамической сорбцией сточных вод на фильтре с неткаными материалами и АУ Каусорб.

В результате химического анализа стока было выявлено, что талая вода от парковки (г. Москва) превышает установленные нормативы по следующим показателям для сброса в ЛК: по нефтепродуктам в 800 раз; по фосфатам в 2,5 раза; по сульфатам в 2 раза; по фенолам в 100 раз; по запаху в 2 раза; по цвету; по мутности в 7, 7 раз; взвешенным веществам в 1.6 раза.

По результатам физико-химического анализа ливнестока было выявлено, что ливнесточная вода от парковки (г. Москва) превышает установленные нормативы по следующим показателям для сброса в ЛК: по нефтепродуктам в 400 раз; по запаху в 2 раза; по цвету; по мутности в 135 раз; взвешенным веществам в 1080, по сульфатам в 3,5, по фенолам в 1000 раз. Поэтому для сброса в ЛК необходимо было провести предварительную очистку ливнесточной воды.

Результаты химического анализа очищенной талой воды с парковки (г. Москва Измайловский бульвар) с помощью нетканого материала Грин Плэнет представлена в таблицах №2 и №3.

Как видно из данных таблицы №2, глубокая очистка талых вод после фильтрации на нетканом материале оказалась эффективной по основному показателю – нефтепродукты.

Таблица №2. Результаты химического анализа после очистки талой воды на нетканом материале Грин Плэнет

№ п/п	Показатели качества воды	Талая вода после очистки	Превышение ПДК (раз)	ПДК в ЛК	Эффективность, %
1	Запах, баллы	1		0-1	100
2	Цвет	Прозрачный с серым оттенком		б/цв.	100
3	Цветность по разбавлению	1:4		1:16	43
4	Прозрачность по шрифту, см	4,5		>20	56
5	Мутность, мг/дм ³	205	102,5	2	24
6	Взвешенные вещества, мг/л	615	820	0,75	24
7	Фенолы, мг/дм ³	0,1	100	0,001	Отс.
8	нефтепродукты, мг/дм ³	0,8	2	0,05	98

По результатам физико-химического анализа сточной воды от автопарковки очистка сточной воды на нетканом материале Грин Плэнет по показателю нефтепродукты эффективна на 80%, по взвешенным веществам на 95%, по мутности на 96%. Доочистка сточной воды на угле Каусорб-221 эффективна по нефтепродуктам на 80%, по взвешенным веществам на 75%. Очистка от фенолов была неэффективной.

Нами было проведено биотестирование на семенах пшеницы исходной и очищенной воды, с целью определения токсичности очищенной воды (фитотест). Под биотестированием обычно понимают процедуру установления токсичности и класса опасности среды с помощью тест-объектов, сигнализирующих об опасности независимо от того, какие вещества и в каком сочетании вызывают изменения жизненно важных функций у тест-объектов (методика МР 2.1.7.2297-07).

Биотестирование «Фитотест» основан на способности семян адекватно реагировать на экзогенное химическое воздействие путем изменения интенсивности прорастания корней, что позволяет принять их длину за показатель тест-функции. Критерием вредного воздействия считается ингибирование роста корней семян.

Таблица №3. Результаты химического анализа очищенной ливнесточной воды от парковки на нетканом материале и доочистке на фильтре с загрузкой Каусорб-221 (г. Москва)

№ п/п	Показатели качества воды	Показатели очистки сточной воды на нетканом материале Грин Плэнет	Эффективность очистки, %	Показатели доочистки сточной воды на фильтре с загрузкой Каусорб-221	Эффективность очистки, %	ПДК в ЛК
1	Запах, баллы	2	Отс.	1	50	0-1
2	Цвет	Прозрачный с желтоватым оттенком		б/ц		Б/ц
3	Цветность по разбавлению	1:2	75	1:1	50	1:16
4	Прозрачность по шрифту, см	13		прозрачный		>20
5	Мутность, мг/дм ³	12,5	96	2	84	2,0
6	Ph	7	Отс.	7	Отс.	7,5-8,5
7	Взвешенные вещества, мг/л	44	95	10	75	0,75
8	Сульфаты, мг/дм ³	350	Отс.	350	Отс.	100
9	Комплекс тяжелых металлов	1×10^{-5}	Отс.	1×10^{-5}	Отс.	1×10^{-5}
10	Фенолы, мг/дм ³	0,1	Отс.	0,1	Отс.	0,001
11	нефтепродукты, мг/дм ³	4	80	0,8	80	0,05

Среди исследуемых показателей, - определение всхожести семян, длины корневой системы на 4-й, 6-й и 8-й день наблюдений. Результаты биотестирования сточной воды от автопарковки представлены в табл. 4.

По результатам проведенного биотестирования установлено, что исходная ливнесточная вода имеет ориентировочно III- IV класс опасности, т.е. это умеренно опасные – малоопасные жидкие отходы. Ливнесточная вода, очищенная с помощью нетканого материала - ориентировочно IV класса опасности, т.е. малоопасный отход. Вода, полученная после глубокой очистки на АУ Каусорб-221 ориентировочно – V класса опасности, т.е. неопасные жидкие отходы.

Талая вода от автопарковки; талая вода от автопарковки 1:1; очищенная талая вода с помощью нетканого материала Грин Плэнет и очищенная талая вода с помощью нетканого материала Грин Плэнет 1:1 имеет ориентировочно IV класс опасности (малоопасные отходы).

Таблица №4. Результаты биотестирования талой и ливнесточной воды от автопарковки. Фитотест

Результаты биотестирования талой воды от автопарковки								
Время измерений	Показатели биотестирования	1	2	3	4			
4-й	Длина корня, см	4,1±0,2	1,5±0,08	0,87±0,04	3,9±0,2			
	% подавления роста		63	79	5			
6-й	Длина корня, см	8,2±0,4	4,8±0,24	3,1±0,16	5,9±0,3			
	% подавления роста		42	62	28			
8-й	Длина корня, см	8,7±0,4	7,6±0,38	6,2±0,31	6,5±0,33			
	% подавления роста		13	29	25			
Всхожесть, %		100	96	92	100			
Результаты биотестирования ливнесточной воды от автопарковки								
Время измерений	Показатели биотестирования	1	2	3	4	5	6	7
4-й	Длина корня, см	0,58±0,03	1,1±0,06	3±0,15	2,6±0,13	2,8±0,14	2,5±0,13	1,7±0,09
	% подавления роста		Отс.	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.
6-й	Длина корня, см	1,42±0,07	2±0,1	3,7±0,2	2,4±0,12	4,5±0,23	3,8±0,2	3,4±0,17
	% подавления роста		Отс.	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.
8-й	Длина корня, см	4,4±0,22	2,76±0,14	3,8±0,2	3,76±0,19	4,9±0,25	4,8±0,24	4,4±0,22
	% подавления роста		37	14	15	Отс.	Отс.	Отс.
Всхожесть, %		100	100	100	96	100	100	96

1-Водопродонная вода(контроль);

2-Исходная сточная вода с парковки;

3- Исходная сточная вода с парковки (1:1);

4-Очищенная сточная вода с парковки с помощью нетканого материала Грин Плэнет;

5-Очищенная сточная вода с парковки с помощью нетканого материала Грин Плэнет (1:1);

6-Глубокая очистка сточной воды с автопарковки с помощью Каусорб – 221;

7- Глубокая очистка сточной воды с автопарковки с помощью Каусорб – 221 (1:1).

Заключение

В ходе проделанного эксперимента были получены данные по очистке ливнесточных и талых вод от автопарковки. Очистка и доочистка этих вод от автопарковки после фильтрации на нетканом материале Грин Плэнет с глубокой очисткой на АУ Каусорб-221 является эффективной на 98% по основному показателю нефтепродукты.

С помощью сертифицированной методики «ФитоТест» был ориентировочно определен класс опасности исследуемых жидких отходов.

Результаты биотестирования указывают на невысокую токсичность очищенной воды (IV класс опасности). Учитывая полученные в ходе эксперимента данные, можно сделать вывод о целесообразности очистки сточных вод от автопарковок с использованием нетканых материалов.

Учитывая полученные данные, нами была разработана технологическая схема по очистке сточных вод от автопарковок с использованием нетканых фильтрующих материалов.

Список литературы

1. Миташова Н.И., Волков В.А., Кольцова Е.С., Грищенко А.А. Экологическая безопасность и биотоксичность ряда технологических процессов при оказании услуг населению // материалы научно-практической конференции «Глобализация и эколого-экономическое развитие регионов». – 2015. – 56 – 66.
2. Волков В.А., Миташова Н.И., Кольцова Е.С. Экологическая безопасность и биотоксичность сточных вод прачечных // В сборнике: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа. – 2015. - С. 55-57.
3. Миташова Н.И., Кольцова Е.С. Экологическая безопасность и биотоксичность стоков от автозаправочных станций, автопарковок и станций по мойке автомобилей // В сборнике: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа. – 2015. - С. 48-51.
4. Систер В.Г., Миташова Н.И., Кольцова Е.С. Очистка сточных вод автомобильных парковок от нефтепродуктов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. - 2014. - Т. 3. - № 2 (20). - С. 76-83.
5. Систер В.Г., Миташова Н.И., Кольцова Е.С. Очистка сточных вод АЗС от нефтепродуктов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. - 2013. - Т. 2. - № 3 (17). - С. 35-40.

УДК 621.565.92.044-712.3

О ВЛИЯНИИ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ КОМПРЕССОРНО-КОНДЕНСАТОРНОГО ОТДЕЛЕНИЯ БЫТОВОГО ХОЛОДИЛЬНИКА НА ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ ЕГО ХОЛОДИЛЬНОГО АГРЕГАТА THE EFFECT OF A HOUSEHOLD REFRIGERATOR CONDENSER VENTILATION ON OPERATING TIME FACTOR

**Руслан Викторович Брюшков, Михаил Владимирович Дёмин,
Константин Адольфович Ржесик
Ruslan V. Briushkov, Mikhail V. Domin, Konstantin A. Rzhesik**

*Донецкий национальный университет экономики и торговли имени
Михаила Туган-Барановского, Украина, Донецк
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhail Tugan-Baranovsky,
Ukraine, Donetsk
(e-mail: pochta_brv@mail.ru, demin.m@mail.ru, rshesik@mail.ru)*

Аннотация: Проведены экспериментальные исследования интенсификации теплообмена на поверхности конденсатора за счет принудительной вентиляции компрессорно-конденсаторного отделения бытового холодильника, что улучшает его теплоэнергетические показатели за счет снижения коэффициента рабочего времени холодильного агрегата.

Abstract: Experimental studies to improve the heat exchange surface of the condenser through ventilation household refrigerator condenser that improves its heat and power performance by reducing the operating time factor of the refrigerator

Ключевые слова: бытовой холодильник, конденсатор, вентилятор, вентилирование, коэффициент рабочего времени, суточный расход электроэнергии.

Keywords: household refrigerator, condenser, fan, ventilation, operating time factor, daily consumption of electricity.

При работе бытового холодильного прибора (БХП) с традиционной компоновкой компрессора в нише холодильного шкафа, конденсатора – выше, параллельно его задней панели, вынос теплоты от нагреваемых поверхностей происходит восходящим воздушным потоком вследствие проявления тепловой депрессии из-за разности значений температуры воздуха в компрессорно-конденсаторном отделении холодильника и в окружающей его среде (из-за наличия температурного градиента) [1]. Бытовые холодильники рассчитаны на работу в окружающей среде при температуре от $+16^{\circ}\text{C}$ до $+42^{\circ}\text{C}$. С увеличением температуры окружающей среды указанный температурный градиент убывает, что приводит к уменьшению тепловой депрессии и, следовательно, к уменьшению количества выносимой из компрессорно-конденсаторного отделения теплоты. В этих условиях целесообразен принудительный обдув конденсатора малогабаритным вентилятором. Для каждой модели бытовых холодильников существует критическая температура наружного воздуха, при превышении которой обдув конденсатора целесообразен по теплоэнергетическим показателям. При меньших значениях температуры наружного воздуха естественная тяга обеспечивает удовлетворительные теплообменные процессы в компрессорно-конденсаторном отделении работающего бытового холодильника, включение в этих условиях малогабаритного вентилятора в работу на обдув конденсатора приводит к существенному перерасходу электроэнергии из-за потребления ее электродвигателем этого вентилятора [2].

Теплообменная поверхность конденсатора каждой модели БХП рассчитана и экспериментально обоснована. Во время работы холодильника хладагент в конденсаторе претерпевает фазовые превращения: по мере движения в нем происходит конденсация пара. По теплоэнергетическим показателям наиболее целесообразно интенсифицировать теплоотдачу с частей конденсатора, где хладагент во время работы БХП находится в жидком состоянии. Это положение сомнений не вызывает. Однако экспериментальные данные по этому вопросу полностью отсутствуют.

Целью данной работы является получение экспериментальных данных для анализа теплоэнергетической эффективности обдува частей конденсатора с разным фазовым состоянием в них хладагента при работе БХП при различных значениях температуры окружающей среды и установках терморегулятора (на охлаждение минимальное, среднее и максимальное).

Для проведения экспериментальных исследований был принят бытовой холодильник «NORD-239-7», морозильная и холодильная камеры которого были заполнены пакетами-имитаторами пищевых продуктов. Стальной конденсатор этого холодильника имеет 12 соединенных калачами вертикальных трубок. Для обдува конденсатора принят центробежный вентилятор, имеющий производительность $100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Он имеет габаритные размеры, позволяющие легко установить его в компрессорной нише. Эта модель вентилятора является оптимальной по сочетанию производительности, энергопотребления и габаритов. Исследования проводились в аттестованной термокамере, в которой устанавливалась и поддерживалась в течение требуемого времени температура ($t_{\text{н.в.}}$) 16, 25, 32, 38, 42°C [3]. При различных установках терморегулятора, при каждом указанном значении температуры окружающей среды регистрировался суточный расход электроэнергии и рассчитывались на основе хронометража работы и стоянки компрессора величины его коэффициента рабочего времени (КРВ).

Исследования по принятой методике проводилось без обдува конденсатора, с обдувом всей его поверхности, с обдувом по отдельности каждой из трех условно выделенных секции (I, II, III – по направлению движения хладагента). Секции (в каждой 4 вертикальные трубки) были разделены вертикальными перегородками для обособления воздушных потоков, создаваемых вентилятором.

По экспериментальным данным и составленным на их основе уравнениям регрессии построены приведенные на рисунках 1, 2 и 3 графические зависимости суточного потребления электроэнергии бытовым холодильником «NORD-239-7» от температуры

окружающей среды при установках терморегулятора на охлаждение, соответственно, минимальное, среднее, максимальное, где линии 1 – без обдува конденсатора, 2 – обдув всей поверхности конденсатора, 3 – обдув I-й секции конденсатора, 4 – обдув II-й секции, 5 – обдув III-й секции.

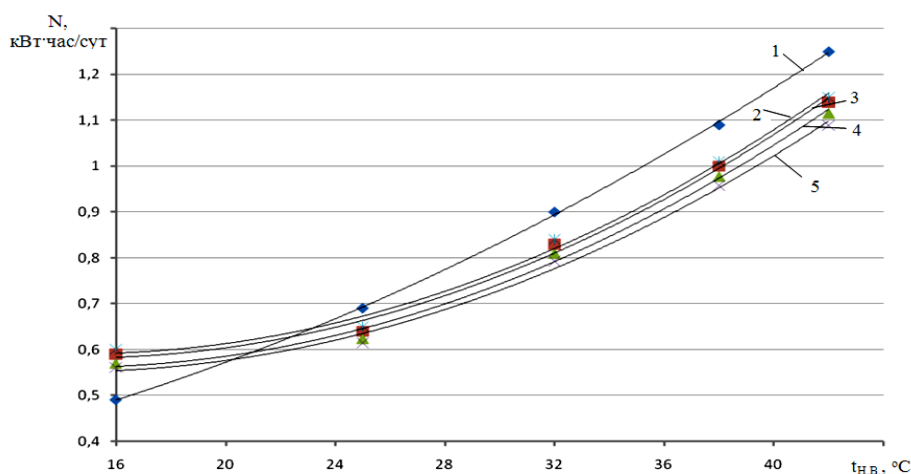


Рис. 1. Графики зависимости потребления электроэнергии холодильником «NORD-239-7» от температуры окружающей среды при минимальной установке терморегулятора

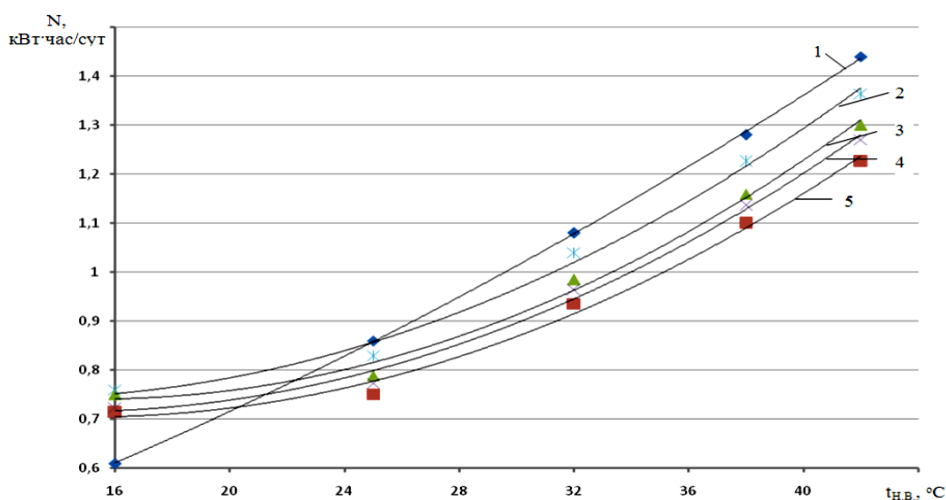


Рис. 2. Графики зависимости потребления электроэнергии холодильником «NORD-239-7» от температуры окружающей среды при средней установке терморегулятора

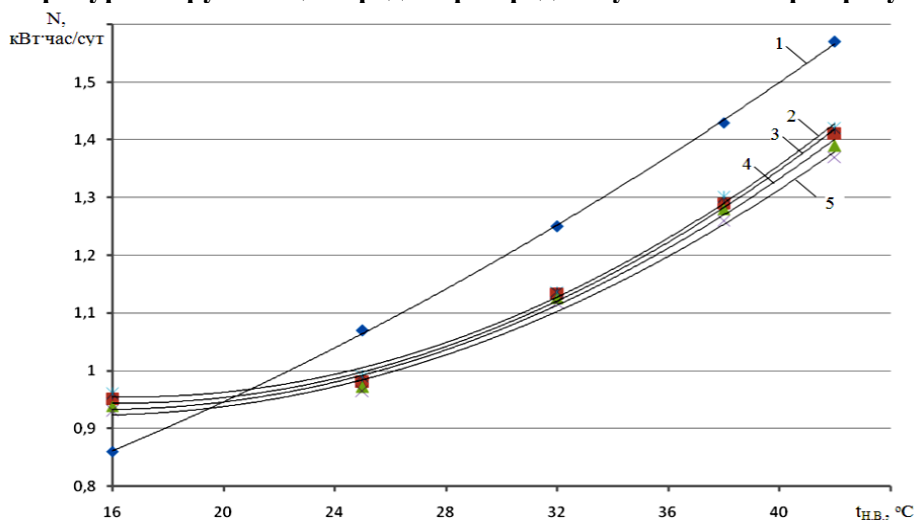


Рис. 3. Графики зависимости потребления электроэнергии холодильником «NORD-239-7» от температуры окружающей среды при максимальной установке терморегулятора.

Как видно на рисунках 1-3, линия 1 пересекает линии 2-5. Точки пересечения – это указанные выше критические значения температуры окружающей среды. Для бытового холодильника «NORD-239-7» критическая температура окружающей среды при всех установках терморегулятора находится в пределах от 20 до 25 °С. При меньших значениях температуры внешней среды обдув конденсатора нецелесообразен по теплоэнергетическим показателям, при больших – получаемый теплоэнергетический эффект (от улучшения работы холодильной машины) перекрывает расход электроэнергии электродвигателем вентилятора.

По данным, приведенным на рисунках, при температуре окружающей среды выше критических величин наибольшее снижение численных значений КПВ и расхода электроэнергии обеспечивается независимо от температуры окружающей среды и установки терморегулятора при обдуве конденсатора, где хладагент находится в жидком состоянии.

Таким образом, по данным экспериментальных исследований, наиболее целесообразен по теплоэнергетическим показателям обдув малогабаритным вентилятором последних витков конденсатора. Направлять на них воздушный поток, создаваемый вентилятором, можно с помощью диффузора.

Список литературы

1. Осокин В.В., Селезнева Ю.А. Совершенствование теплоэнергетических характеристик бытовых холодильников на основе исследования воздухо-теплообменных процессов в их компрессорно-конденсаторном отделении // Донецк: ДонГУЭТ, 2001. - 144с.

2. Патент на винахід 75689 Спосіб зниження енергоспоживання побутовими холодильниками. Від 15.05.06 Бюл. №5. Осокін В.В., Шубін О.О., Селезньова Ю.А., Сиромятов Г.Є., Горін О.М., Красновський І.Н.

3. Брюшков Р.В., Ржесик К.А., Демин М.В. О влиянии интенсификации процесса конденсации на характеристики работы бытового холодильника // Современная техника и технологии. 2015. № 10 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2015/10/7987>

УДК 504.06

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ DEVELOPMENT OF HARDWARE AND SOFTWARE TO ENSURE CHEMICAL SAFETY IN LIGHT INDUSTRY ENTERPRISES

Михаил Викторович Дюбанов*, Олег Иванович Седяров,
Арсений Валерьевич Артёмов***
Mikhail V. Dyubanov*, Oleg I. Sedlyarov**, Arseny V. Artemov*****

**Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук,
Россия, Москва*

**Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow
(e-mail: dyubanov@chph.ras.ru)*

*** Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва*

***Moscow State University of Design and Technology, Russia, Moscow
(e-mail: 7730719@mail.ru)*

**** Московский педагогический государственный университет, Россия, Москва*

****Moscow State Pedagogical University, Russia, Moscow
(e-mail: arsenyart@mail.ru)*

Аннотация: Данная статья посвящена разработке программно-аппаратного комплекса для обеспечения химической безопасности на предприятиях легкой промышленности. Проведен анализ методики ОНД-86 и программы Fire Dynamics Simulator. Сформулированы

рекомендации по разработке программно-аппаратного комплекса для обеспечения химической безопасности на предприятиях легкой промышленности на базе Fire Dynamics Simulator с учетом особенности организации технологического процесса кожевенного производства.

Abstract: This article is devoted to the development of hardware and software to ensure chemical safety in light industry enterprises. The analysis method OND-86 and the program Fire Dynamics Simulator. Recommendations for the development of hardware and software for chemical safety at the enterprises of light industry on the basis of Fire Dynamics Simulator given the characteristics of the organization process of the leather industry.

Ключевые слова: система, химическая безопасность, программа, легкая промышленность, атмосфера.

Keywords: system, chemical safety, program, light industry, atmosphere.

По данным отчета за I полугодие 2015 года Министерства экономического развития Российской Федерации легкая промышленность (производство кожи, изделий из кожи и производство обуви), является аутсайдером сектора экономики.[1] Снижение спроса обусловлена многочисленными факторами, одним из которых является стоимость продукции. В стоимость продукции производителем закладываются разные статьи расходов: затраты на сырье, на технологические стадии обработки, аренду производственных помещений, оплату труда сотрудникам предприятия, налоги и штрафные санкции и т.д. Остановливаясь на штрафных санкциях от государственных органов исполнительной власти и органов контроля и мониторинга, предлагается решения по минимизации затрат на данную статью расходов. Решением данного вопроса может послужить разработка и внедрение на предприятие программно-аппаратного комплекса, позволяющего контролировать экологическую обстановку на предприятии, аккумулируя информацию в базе данных и тем самым позволяя предотвратить превышения предельно допустимых норм выброса химических веществ в окружающую среду и как следствие аварии и катастрофы как в масштабах территории предприятия, так и страны.

Разработка программно-аппаратного комплекса для обеспечения химической безопасности соответствует одному из элементов активно развивающейся национальной системы химической и биологической безопасности Российской Федерации. Утвержденная Председателем Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды 4 августа 1986 г. № 192 «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» (далее - ОНД-86) для расчета локального загрязнения атмосферы выбросами промышленных предприятий, сводящая к последовательности аналитических выражений, полученных в результате аппроксимации разностного решения уравнения турбулентной диффузии морально устаревает. Методика ОНД-86 позволяет рассчитывать максимально возможное распределение концентрации выбросов в условиях умеренно неустойчивого состояния атмосферы и усредненные по 20-30 минутному интервалу, но не учитывает такие факторы, как класс устойчивости атмосферы и шероховатость подстилающей поверхности. Методика применима для расчёта концентраций примеси на удалении от источника не более 100 км. [2] Данная методика хорошо себя зарекомендовала у специалистов ведомств и организаций, осуществляющих разработки по разрешению, проектированию и строительству промышленных предприятий, нормированию вредных выбросов в атмосферу, экспертизе и согласованию атмосфероохранных мероприятий. Не смотря на успешность методики ОНД-86, время не стоит на месте и в 1986 году по данным Комитета по архитектуре и градостроительства Москвы плотность застройки города Москвы и средняя этажность застройки была гораздо ниже по сравнению с 2015 годом. Количество предприятий легкой промышленности резко сократилось, многие предприятие были выведены за черту города, появились частные малые предприятия по обработке кожевенного сырья и производства кожевенных изделий. Существенными недостатками методики ОНД-86 являются не учет

скорости истечения газа и атмосферной диффузии, приводящие к тому, что по результатам расчетов газовое облако имеет концентрацию газа существенно выше предельно допустимой. Последнее обстоятельство не подтверждается результатами инструментального контроля качества атмосферного воздуха. Это приводит к увеличению платы за его выброс в 5-кратном размере (по временно согласованному выбросу – ВСВ).[3]

Учитывая все недостатки методики ОНД-86 указанные выше и специфику предприятий кожевенного производства предлагается разработать Программно-аппаратный комплекс, учитывающий современную плотность застройки города, а также синергетический эффект химических веществ, попадающих в атмосферный воздух и тем самым нанося вред окружающей среде и населению города, находящегося в зоне возможного химического заражения. Программа FDS (Fire Dynamics Simulator) реализует вычислительную гидродинамическую модель (CFD) тепломассопереноса при горении. FDS численно решает уравнения Навье-Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков, особое внимание уделяется распространению дыма и теплопередаче при пожаре. Возможности программы FDS позволяют реализовать поставленную задачу: контролировать экологическую обстановку на предприятии, а именно получать информацию о количественном и качественном составе химических веществ попадающих в атмосферный воздух, в результате производственной деятельности кожевенного предприятия. Предлагается заложить в существующую программу алгоритм оценивающий синергетический эффект химических веществ используя соотношение (1):

$$\frac{dN_i}{dt} = m_{ij} \left(\frac{N_i}{N_j^0} \right) \quad i, j = \overline{1, n}; i \neq j. \quad (1)$$

где N_i – скорректированное значение нормы содержания загрязняющего вещества с учетом взаимного влияния загрязняющих веществ. Коэффициент m_{ij} может принимать значения -1 , 0 , $+1$ и характеризует:

а) усиление отрицательного совместного воздействия опасных веществ, так называемый синергизм действия поллютантов. В этом случае $m_{ij} = +1$ и $N_i < N_i^0$, т.е. снижается нормированный показатель содержания загрязняющего вещества и возрастает уровень экологической опасности;

б) ослабление отрицательного совместного воздействия загрязняющих веществ при их с присутствии, так называемый антагонизм действия поллютантов. В этом случае $m_{ij} = -1$ и $N_i > N_i^0$;

в) при $m_{ij} = 0$ отсутствует взаимное влияние поллютантов и отпадает необходимость анализировать задачу.[4]

Таким образом предложенный алгоритм позволяет определять допустимое содержание загрязняющих веществ в выбросах и сбросах предприятий кожевенного производства с учетом синергизма действия поллютантов, а, следовательно, определять необходимую степень очистки.

Список литературы:

1. Отчет «О текущей ситуации в экономике российской федерации по итогам первого полугодия 2015 года» // 2015
2. «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» (ОНД-86)// 1986.
3. А.В. Завгороднев, Г.С. Аكوпова, А.В. Мельников Теоретические основы рассеивания в атмосфере организованных нестационарных выбросов газа на объектах газотранспортных предприятий //Территория НЕФТЕГАЗ №2 2005г. С.68
4. Гуторова Н.В. Оценка и моделирование экологической обстановки на предприятиях легкой промышленности канд. техн. наук. М.: МГУДТ 2011 г. С.95

УДК 579.695

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ
МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ И ПОЧВЫ
ANALYSIS OF RECENT INVESTIGATIONS IN MICROBIOLOGICAL TREATMENT
OF WATER AND SOIL**

**Алексей Сергеевич Скичко, Александр Алексеевич Досаев
Alexey S. Skichko, Alexandr A. Dosaev**

*Российский химико-технологический университет – РХТУ им. Д.И. Менделеева,
Россия, Москва*

*D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia – MUCTR, Russia, Moscow
(e-mail: olf_1@list.ru, sasha.dosaev1993@mail.ru)*

Аннотация: Проведён анализ российских и зарубежных научных публикаций, посвящённых описанию новых штаммов микроорганизмов, выделенных из загрязнённых токсическими отходами почв и водоёмов и, следовательно, имеющих потенциальное значение для интенсификации процессов биологической очистки.

Abstract: The analysis of recent scientific works dealing with new strains of microorganisms isolated from the soil and water contaminated toxic waste was carried out. Bioremediation potential of these strains was analysed.

Ключевые слова: микробиологическая очистка, микроорганизмы.

Keywords: microbiological treatment, microorganisms.

Проблема загрязнения почвы и водных ресурсов планеты постоянно растёт, причём список загрязнений, потенциально опасных для человека и животного мира, неизменно пополняется. В этой связи удивительным фактом является наличие в природе механизмов самоочищения, заключающихся в тенденции микромира к быстрому заполнению новых экологических ниш [1]. Так, по мере нарастания экологических проблем микробиологи всего мира постоянно обнаруживают неизвестные ранее микроорганизмы, для которых конкретные загрязнения не только не вредны, но даже их наличие является естественной средой их обитания и, как следствие, необходимым условием клеточного метаболизма, в результате функционирования которого опасные для человека вещества выводятся из среды. Естественные процессы очистки являются более экологичными и дешёвыми по сравнению с физико-химическими методами. Однако, как правило, они протекают слишком медленно. Поэтому постановка вопроса об их использовании подразумевает детальное изучение с целью выявления возможностей интенсификации.

Авторами настоящей работы была предпринята попытка собрать информацию о последних исследованиях в области микробиологической очистки воды и почвы от различных загрязнений. Причём акцент изначально ставился не на хорошо изученные темы, как например процессы микробиологического удаления из воды азот-содержащих ионов (NH_4^+ , NO_2^-), для реализации которых в настоящий момент уже предложено несколько технологических решений [2]. Цель нашего исследования касалась именно открытия новых микроорганизмов, потенциально пригодных для микробиологической очистки.

Анализ более 100 источников за последние 8-10 лет показал, что подавляющее большинство исследований в интересующей нас области носит чисто биологический характер: авторы описывают морфологию новых культур, среду и условия их обитания, часто проводится исследование метаболических путей преобразования субстратов-загрязнений и выявление генов, отвечающих за эти преобразования. Достаточно часто представлены исследования кинетики процессов очистки. А вот изучение возможностей технологической реализации изучаемых процессов практически не встречается. В качестве

примера такого исследования можно привести серию работ по микробиологическому дехлорированию хлорсодержащих производных этилена [3, 4]. Однако это исключение из правила.

Следует выделить два основных направления исследований процессов биоочистки с помощью вновь открытых микроорганизмов: это деструкция органических загрязнений и удаление ионов тяжёлых металлов.

Органические загрязнения – это, как правило, сложные молекулы, которые могут использоваться микроорганизмами непосредственно для получения питательных веществ. Таким образом, происходит их разложение за счёт участия в клеточном метаболизме. Конечными продуктами биодеструкции органических загрязнений являются соединения более простой структуры, безвредные для человека и порой даже пригодные для использования. В качестве примера отметим процессы биотрансформации никотина в фумаровую кислоту или производные пиридина [5, 6].

Отдельной областью исследований является биоочистка от ионов тяжёлых металлов, таких как марганец, хром, никель, кадмий, ртуть, уран, свинец и др. Для процессов извлечения ионов тяжёлых металлов предлагаются, главным образом, три способа: 1) осаждение за счёт образования нерастворимых соединений с продуктами клеточного метаболизма [7, 8], 2) биовосстановление до менее токсичных форм [9], 3) сорбция клетками, причём как живыми [10, 11], так и высушенными [12].

С целью разработки в дальнейшем базы данных по изучаемой тематике была создана таблица, содержащая краткую информацию о микроорганизмах, загрязнениях, методах биоочистки и их особенностях (указанная таблица не приводится).

Таким образом, основным выводом проведённого анализа является наличие большого количества экспериментального материала, пригодного для дальнейшего исследования методами математического моделирования с целью поиска технологических способов реализации новых эффективных методов биологической очистки.

Список литературы

1. Субботина Ю.М., Смирнова И.Р., Кутковский К.А. Теоретические и методологические подходы к очистке сточных вод компонентами водной экосистемы // Вестник АГАУ. 2015. № 5 (127). С. 99.
2. Семенова Е.Н., Сироткин А.С. Процессы биотрансформации азота в технологиях очистки сточных вод // Вестник Казанского технологического университета. 2008. № 1. С. 42.
3. Sabalowsky A.R., Semprini L. Trichloroethene and cis-1,2-dichloroethene concentration-dependent toxicity model simulates anaerobic dechlorination at high concentrations: I. Batch-fed reactors // Biotech. Bioeng. 2010. V. 107. № 3. P. 529.
4. Lai A., Verdini R., Aulenta F., Majone M. Influence of nitrate and sulfate reduction in the bioelectrochemically assisted dechlorination of cis-DCE // Chemosphere. 2015. V. 125. P. 147.
5. Qiu J., Wei Y., Ma Y., Wen R., Wen Y., Liu W. A novel (S)-6-hydroxynicotine oxidase gene from *Shinella* sp. strain HZN7 // Appl. Environ. Microbiol. 2014. V. 80. № 18. P. 5552.
6. Yu H., Tang H., Zhu X., Li Y., Xu P. Molecular mechanism of nicotine degradation by a newly isolated strain, *Ochrobactrum* sp. strain SJY1 // Appl. Environ. Microbiol. 2015. V. 81. № 1. P. 272.
7. Хамидуллина И.В., Хлебникова Т.Д., Хамидуллин И.Р. Особенности использования сульфатвосстанавливающих бактерий для очистки сточных вод от ионов тяжёлых металлов // Башкирский химический журнал. 2012. Т. 19. № 3. С. 147.
8. Essa A.M.M., Macaskie L.E., Brown N.L. Mechanisms of mercury bioremediation // Biochem. Society Transactions. 2002. V. 30. № 4. P. 672.
9. Слободкина Г.Б., Бонч-Осмоловская Е.А., Слободкин А.И. Восстановление хромата, селенита, теллурита и железа (III) умеренно термофильной бактерией *Bacillus thermoamylovorans* SKC1 // Микробиология. 2007. Т. 76. № 5. С. 602.

10. Шубаков А.А., Михайлова Е.А., Оводов Ю.С. Использование микроорганизмов для извлечения марганца из водных сред // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2014. № 1. С.16.

11. Guo H., Luo S., Chen L., Xiao X., Xi Q., Wei W., Zeng G., Liu C., Wan Y., Chen J., He Y. Bioremediation of heavy metals by growing hyperaccumulaor endophytic bacterium *Bacillus* sp. L14 // Bioresour. Technol. 2010. V. 101. № 22. P. 8599.

12. Попов Д.А., Бахирева О.И., Басов В.Н. Извлечение ионов тяжёлых металлов сухой биомассой микроорганизмов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 5. С. 1454.

УДК 504.05/.06

**ПРЕИМУЩЕСТВА ПОЛУЧЕНИЯ БЕЛЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ
ПЕРОКСИДНО-АЦЕТАТНЫМ СПОСОБОМ
ADVANTAGES OF OBTAINING BLEACHED PULP PEROXIDE-ACETATE METHOD**

**Антонина Александровна Захарова, Арсений Валерьевич Артемов,
Дарья Юрьевна Арсеньева
Antonina A. Zakharova, Arseniy V. Artemov, Daria Y. Arsenyeva**

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow State University of Design and Technology, Russia, Moscow
(e-mail: Htipe-mgudt@Yandex.ru, arsenyart@mail.ru, darsenieva@mail.ru)*

Аннотация: В данной статье рассмотрены преимущества применения соломы льна как альтернативы древесному сырью с целью получения беленой целлюлозы пероксидно-ацетатным методом. Изучены характеристики целлюлозы, полученной представленным методом.

Abstract: This article discusses the benefits of using flax straw as an alternative to woody raw materials for the purpose of obtaining bleached pulp peroxide-acetate method. Studied the characteristics of the pulp obtained by the presented method.

Ключевые слова: целлюлоза, пероксидно-ацетатный метод, льняная солома.

Keywords: cellulose, peroxide-acetate method, linseed straw.

Целлюлоза – один из важнейших природных полимеров, основной компонент клеточной стенки высших растений. Целлюлоза и ее производные широко используются во многих отраслях промышленности (текстильной, целлюлозно-бумажной, пищевой, фармацевтической и др.).

Промышленным методом целлюлозу получают методом варки древесной щепы на целлюлозных заводах. По типу применяемых реагентов различают следующие способы варки целлюлозы:

1) Кислые способы:

- Сульфитный: суть процесса заключается в обработке древесины варочным раствором, содержащим диоксид серы (SO₂) и соли сернистой кислоты (сульфиты и гидросульфиты натрия, калия, аммония, кальция или магния) при повышенной температуре и давлении. Сульфитный процесс является вторым по распространённости (после сульфатного процесса) методом производства целлюлозы в мире. Целлюлозу, производимую методом сульфитной варки, называют сульфитной целлюлозой. Данный метод применяется для получения целлюлозы из малосмолистых пород древесины: ели, пихты.

- Бисульфитный: для бисульфитного способа варки, получившего промышленное развитие за последние 10-15 лет, реагентом служит водный раствор бисульфита натрия или

магния. Целлюлозу, производимую методом бисульфитной варки, называют бисульфитной целлюлозой.

2) Щелочные способы:

- Сульфатный: наиболее распространенный метод получения целлюлозы на сегодняшний день. Основная стадия этого термохимического процесса, сульфатная варка, заключается в обработке древесной щепы водным раствором, содержащим гидроксид и сульфид натрия. Целлюлозу, производимую сульфатным методом, называют сульфатной целлюлозой. Достоинством метода является возможность использования в нём практически всех пород древесины, а регенерация химикатов делает процесс экономически очень эффективным. Недостатком его является выделения большого количества дурно пахнущих сернистых соединений: метилмеркаптана, диметилсульфида и др. в результате побочных реакций. В отличие от другого щелочного способа производства, натронного, где используется только гидроксид натрия, сульфатный процесс позволяет получить целлюлозу большей механической прочности.

- Натронный: в процессе варки целлюлозы используется раствор гидроксида натрия. Натронным способом можно получать целлюлозу из лиственных пород древесины и однолетних растений. Преимуществом данного метода является отсутствие неприятного запаха соединений серы. Главный недостаток — высокая стоимость получаемой целлюлозы, вследствие чего метод практически не используется.

В большинстве случаев использование указанных методов наносит серьезный удар по состоянию окружающей среды. Не всегда предприятиям удается обеспечить достаточную очистку сточных вод, выбросов, а также найти квалифицированное применение, образовавшимся в процессе производства, отходам.

В качестве альтернативы древесному сырью можно использовать отходы льняного производства, а именно солому льна, которая обладает следующими преимуществами:

- 1) Лен это ежегодно восполняемый сырьевой ресурс, не оказывающий никакого негативного влияния на экосистему.
- 2) С 1 га посевов лубяных культур получается в 8–10 раз больше целлюлозы, чем может дать самое быстрорастущее дерево в нашей климатической зоне — тополь.
- 3) Посадка льна может улучшить экологическую обстановку за счет аккумуляции тяжелых металлов (кадмия, свинца, меди и др.) из почвы.
- 4) Гарантированная урожайность льна, многовариантность его переработки (масло, пищевые добавки, биологически активные вещества, нетканые материалы, волокнистые плиты, композитные материалы и др.) и невысокая стоимость могут существенно поднять доходность и занятость населения аграрно-промышленных регионов России.
- 5) Беленая целлюлоза из льна обладает очень высоким качеством и может использоваться в производстве сигаретной бумаги, гигиенических изделий и денежных банкнот.
- 6) Лен содержит в себе наибольшее количество целлюлозы. Изготовленная из волокна льняная ткань характеризуется большой прочностью, эластичностью и умеренной жесткостью, долговечностью и устойчивостью против гниения [3].

Также особое внимание стоит уделить следующему аспекту. Целлюлоза из льна имеет высокое качество и рекомендуется к использованию в производстве медико-гигиенических изделий (прокладки, памперсы, ватно-марлевые изделия). Выход биомассы льна очень высок. Он превышает данный коэффициент у древесины на 2-2,5 единиц. Содержание α -целлюлозы в волокне льна может достигать 90%, тогда как у твердой и мягкой древесины – 50-54%.

Солома льна обладает наиболее приемлемым составом для химической переработки (табл. 1), характеризуется высоким содержанием целлюлозы, малым количеством лигнина, экстрактивных и минеральных веществ.

Таблица 1. Химический состав соломы льна

Часть стебля	Содержание %				
	Целлюлоза	Лигнин	Гемицеллюлоза	Пектины	Коксовый остаток
Волокно	52-58	2-4	12-16	3-5	3-4
Костра	38-40	23-24	14-15	2-3	2-3

Подробный анализ химического состава льняного волокна и костры позволил установить, что наиболее перспективно перерабатывать в целлюлозу короткое льняное волокно или короткое волокно масляных сортов льна.

Углеводный комплекс соломы характеризуется высоким содержанием гемицеллюлоз (особенно пентозанов), поэтому волокнистые полуфабрикаты из нее легко подвергаются размолу и имеют хорошие бумагообразующие свойства. Гексозанов в соломе содержится значительно меньше. По содержанию целлюлозы солома близка к листовым древесным породам (таб.2).

Таблица 2. Химический состав соломы и древесины

Компоненты	Солома	Древесина	
	Лен	Ель	Осина
Целлюлоза	58,0	46,1	41,8
Лигнин	18,0	28,1	21,8
Пентозаны	29,0	5,1	16,3
Водный экстракт	2,43	2,8	2,8
Смолы, жиры, воски	2	1,0	0,8
Легкогидролизуемые полисахариды	28,7	17,3	20,3
Зола	2,5	0,3	0,3

Основными полисахаридами гемицеллюлоз соломы являются глюкуроноксиланы, молекулы которых построены из остатков Б-ксилозы и содержат небольшие количества L-арабинозы и D-глюкуроновой кислоты или 4-0- метил-Б-глюкуроновой кислоты .

Благодаря химическому составу и строению солома льна является сырьём, которое не нуждается в обработке грубыми технологическими способами (сульфатный и сульфитный). Поэтому можно произвести их замену на новые экобезопасные методы. Одним из таких методов является пероксидно-ацетатный.

Список литературы

1. Обзор состояния конкурентной среды на рынке целлюлозы (товарной). – М.: Федеральная антимонопольная служба, 2011 – 22 с.
2. Арсеньева Д.Ю. Вопросы экологии в рамках лесного хозяйства / Арсеньева Д.Ю. // Современные тенденции в сельском хозяйстве сб. тр. II международ. науч. интернет-конф. – Казань, 2013 – Т.2, С. 10-17.

УДК 66.963

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ
МОДИФИЦИРОВАННОГО ПЭТФ-ВОЛОКНА МЕТОДОМ КРЕЙЗИНГА
AIR QUALITY ASSESSMENT OF WORKSPACE IN PRODUCING MODIFIED
PET-FIBER BY CRAZING**

**Иван Николаевич Курицин, Олег Иванович Седяров, Наталья Васильевна Гуторова
Ivan N. Kuritsin, Oleg I. Sedlyarov, Natalia V. Gutorova**

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow State University of Design and Technology, Russia, Moscow
(e-mail: 7823692@gmail.com, Oleg.Sedlyarov@gmail.com, e-mail: natofromoz@gmail.com)*

Аннотация: Определены ключевые операции технологического процесса получения модифицированного негорючего ПЭТФ-волокна методом крейзинга, оказывающие негативное влияние на воздух рабочей зоны. Проведена оценка воздуха рабочей зоны.

Abstract: Determined key operation process for producing a modified nonflammable PET-fiber by crazing, which have a negative impact on the air of the working area. Assessment of workplace air.

Ключевые слова: крейзинг, ПЭТФ-волокно, оценка качества воздуха, рабочая зона.

Keywords: crazing, PET-fiber, air quality assessment, workspace.

Одним из наиболее простых современных средств обеспечения защитных функций текстильных изделий является использование для их производства химических волокон, обладающих специальными защитными свойствами и способностью повышать безопасность человека в процессе эксплуатации человеком этих текстильных материалов.

Решить эту проблему можно за счет организации производства высокотехнологичных текстильных изделий на основе полиэфирных волокон с использованием крейзинг-технологии. Реализация этой технологии позволит создать текстильные материалы:

- пониженной горючести и электризуемости;
- с высокими санитарно-токсикологическими характеристиками, в том числе антимикробными;
- с магнитными и электроаккумулирующими свойствами;
- со специальными тепло- и влагопроводящими свойствами и др.

Крейзинг (crazing) [1] – особый вид пластической деформации аморфных полимеров, сопровождающийся образованием особых зон (пор) в ориентированном полимере – крейзов.

В зависимости от условий реализации крейзинга различают два основных его типа: «сухой» - реализуемый на воздухе, и «мокрый» или просто крейзинг, который реализуется в жидкой фазе (адсорбционно-активная среда – ААС) и в результате которого жидкая фаза (низкомолекулярное соединение – НМС) эффективно заполняет образующуюся пористую структуру крейзованного полимера. Это приводит к диспергированию низкомолекулярного компонента (ААС) в образующейся пористой структуре полимера (в статье рассмотрен исключительно этот вид крейзинга). Крейзинг является универсальным методом доставки НМС в объем полимера и универсальным методом получения высокодисперсных смесей полимер – НМС, причем, само НМС может иметь и сложный состав, например, жидкость, в которой равномерно распределены наночастицы твердого вещества [2].

Для введения модифицирующих добавок в волокно (которые придают текстильным изделиям заданные специальные свойства) с использованием крейзинг-технологии необходима незначительная модернизация существующих технологических линий.

В настоящее время в промышленности используется большое количество высокоскоростных машин, позволяющих осуществить ориентационное вытягивание пленок

и волокон в непрерывном режиме. Модификация полимеров путем их крейзинга в жидких средах означает совмещение стадии ориентационного вытягивания полимерных пленок и волокон с собственно введением модифицирующей добавки. Для этого необходимо проводить ориентационное вытягивание полимера в растворе модифицирующей добавки в ААС, включив в традиционную технологическую схему достаточно простое устройство, схематически изображенное на рис. 1.

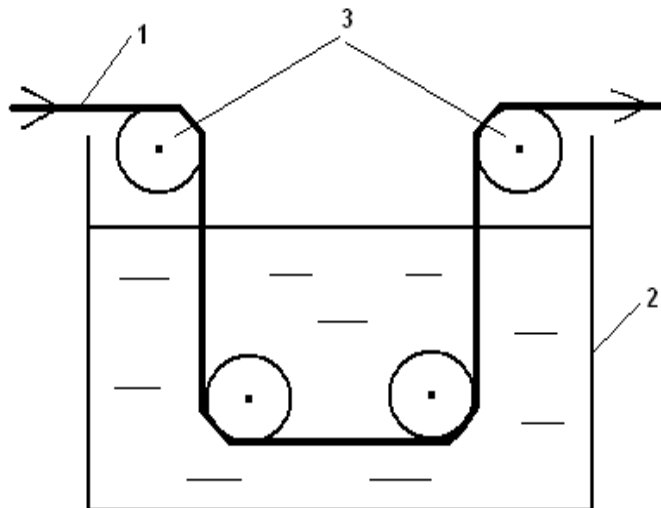


Рис.1. Схематическое изображение устройства узла для модификации полимерных волокон по механизму крейзинга, который может быть введен в установку для их ориентационного вытягивания.

1 - полимерная пленка или волокно; 2 - ванна, наполненная адсорбционно-активной средой (возможно с растворенной добавкой); 3 - подающие и приемные валики

Природа адсорбционно-активной жидкости, вернее ее способность понижать межфазную поверхностную энергию полимера, является важным фактором, влияющим на процесс крейзообразования. Величина межфазной поверхностной энергии (поверхностное натяжение) влияет на число зарождающихся крейзов: чем в большей степени снижена межфазная поверхностная энергия, тем больше количество зарождающихся крейзов.

На рисунке 2 [3] приведены зависимости плотности крейзов, образующихся в ПЭТФ под действием растягивающей нагрузки в 23,3 Мпа, помещенном в водные растворы этанола, пропанола и бутанола, от концентрации соответствующих растворов. С точки зрения получения наибольшего количества крейзов на единицу длины, предпочтительными представляются возможности пропанола (кривая 2). Однако, видно, что для получения примерно такой же их плотности, как для 7-ми процентного (~ 1 моль/л) раствора бутанола (кривая 3), требуется 24-х процентный (~ 4 моль/л) раствор пропанола. Чтобы удвоить плотность крейзов, потребуется утроить концентрацию (72%).

В связи с этим, в качестве адсорбционно-активной среды выбран насыщенный водный раствор н-бутанола. Выбор н-бутанола в качестве основного компонента ААС, помимо приведенных выше соображений, продиктован тем, что он относительно безопасен в обращении в плане токсичности, а его насыщенный водный раствор - в плане пожарной безопасности.

ААС, используемая в крейзинг – технологии, накладывает определенные ограничения на тип используемых фосфорсодержащих антипиренов. Поскольку ААС - это полярная жидкость, то применяемые антипирены должны быть водорастворимыми, а в идеальном случае - неограниченно смешиваться с водой. Кроме того, применяемые антипирены должны быть экологически чистыми и нетоксичными, что исключает наличие в них таких компонентов как галогенсодержащие органических соединения, многих фосфорорганических соединений (трикрезилфосфат, трифенилфосфат и др.). Применение

фосфатов аммония, хорошо подходит для использования их в качестве антипиренов для модификации ПЭТФ-волокна.

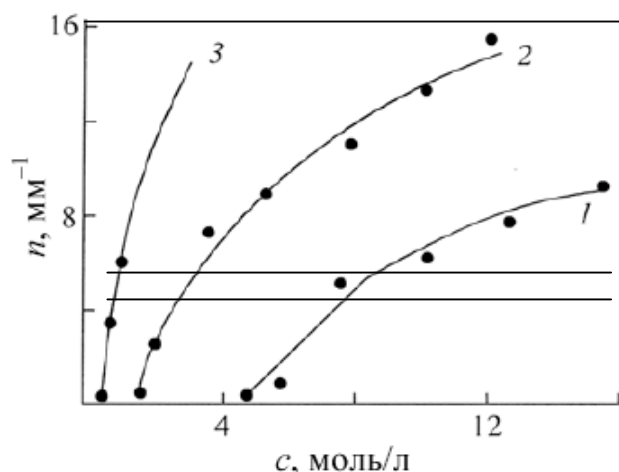


Рис. 2. Зависимость плотности образующихся крейзов в ПЭТФ при действии постоянной растягивающей нагрузки (23,3 Мпа) от концентрации водных растворов этанола (1), н-пропанола (2) и н-бутанола (3).

Вопросы безопасности при проведении процесса ориентационной вытяжки ПЭТФ-волокна в жидкой фазе с целью получения негорючего волокна в основном определяются составом жидкой фазы и ее влиянием на воздух рабочей зоны и здоровье человека. В качестве жидкой фазы в этом процессе использовался раствор фосфатов в водном н-бутиловом спирте.

При содержании в воздухе в среднем 0,78 мг/л наблюдалось жжение в глазах, царапанье в горле, раздражение кожи рук и общее недомогание. При 0,6 мг/л также наблюдалось раздражение глаз с отеком конъюнктивы, реже со слезотечением и светобоязнью. Присутствие непредельных соединений в н-бутиловом спирте резко усиливает его раздражающее действие. Воспаление кожи при аппликации тем сильнее, чем больше в нем непредельных соединений. Повторное воздействие н-бутилового спирта на кожу работающих сопровождается ее сухостью, шелушением, образованием трещин, иногда развитием дерматитов и экземы.

Токсический эффект различных фосфатов неодинаков и зависит от пути введения и степени их вязкости. При понижении вязкости токсичность фосфатов уменьшается. У лиц, контактирующих с фосфатами, в редких случаях могут развиваться дерматиты. Попадая в глаза, пыль фосфатов вызывала сильное раздражение конъюнктивы, отек век, помутнение роговицы, иногда даже прободение ее и выпадение радужной оболочки. У рабочих, занятых в производстве, описаны изменения костей предплечий, ряд неврологических расстройств, изменение порога обоняния, гипергидроз, неустойчивость артериального давления, изредка встречается также лабильность сердечной деятельности. Отмечаются нарушения менструальной функции у работниц. Установлено развитие пневмокониоза у рабочих, вдыхающих пыль, содержащую фосфаты.

В связи с этим следует отметить необходимость постоянного контроля за воздухом рабочей зоны при модификации ПЭТФ-волокна методом крейзинга.

Список литературы

1. Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф. Структурная самоорганизация аморфных полимеров. М.: Физматлит. 2005. 232 с.
2. Волынский А.Л., Аржакова О.В., Ярышева Л.М., Бакеев Н.Ф. // Высокомолек. соед. С., 2002, т.44, №9, с.1701.
3. Волынский А.Л. и др., Российский Химический Журнал (Журнал Рос. Хим. Общества им. Д.И. Менделеева), 2005, том XLIX, №6.

УДК 628.3:67

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНОГО СОРБЕНТА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД
ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ
USING OF NATURAL SORBENT FOR PURIFICATION OF WASTEWATER FROM
HEAVY METAL IONS**

**Валентина Сергеевна Салтыкова, Антонина Александровна Захарова,
Анна Васильевна Юркова
Valentina S. Saltykova, Antonina A. Zakharova, Anna V. Yurkova**

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow State University of Design and Technology, Russia Moscow
(e-mail: Htipe-mgudt@Yandex.ru)*

Аннотация: В работе представлены результаты использования природного сорбента на основе торфа для поглощения ионов Cr^{+3} и Cu^{+2} из водных растворов. Показано, что на степень поглощения ионов оказывает влияние температура процесса модификации сорбента, размер его частиц и природа иона металла.

Abstract: The paper presents the results of the use of a natural sorbent based on peat to absorb ions Cr^{+3} and Cu^{+2} from aqueous solutions. It is shown that the degree of absorption of ions is influenced by the temperature of the modification process of the sorbent, size of particles and the nature of metal ions.

Ключевые слова: сорбент, степень поглощения, ион, торф, модификация, гигроскопическая влажность.

Keywords: sorbent, absorption, ion, peat, modification of hygroscopic moisture.

Промышленные сточные воды отличаются большим разнообразием и концентрацией загрязняющих веществ, определяемых характером производства. Потребность предприятий в воде изменяется в широких пределах и зависит от вида выпускаемой продукции, принятой технологии, системы водоснабжения и других факторов. Так для переработки 1 тонны кожевенного сырья на жидкостные операции расход воды составляет 55 – 75 м³; на получение 1 тонны синтетических волокон – 2500 м³, на 1 тонну целлюлозы – 500 м³.

Сточные воды текстильного производства содержат взвешенные вещества, синтетические поверхностно – активные вещества (ПАВ), ионы железа, меди, цинка, никеля, свинца, красители и т.д.. Сточные воды кожевенного и мехового производства содержат взвешенные (шерсть, мездра, продукты распада белков) дубители, ПАВ, сульфиды, хлориды, сульфаты, соединения азота, соединения хрома, жиры, гидроксид кальция, фенолы, красители и так далее [1], позволяющие создать оборотную систему водоснабжения. Так в производстве синтетических волокон оборотная вода составляет 2300 м³/ 1 тонну продукции. Доля оборотной воды в легкой и текстильной промышленности не велика.

Загрязненные стоки представляют серьезную опасность для природных водоемов.

Для очистки промышленных стоков используются различные способы очистки: механические, химические, физико-химические, биохимические, термические. Одним из физико-химических способов очистки является сорбционный с применением различных пористых сорбентов. В качестве сорбентов применяют активные угли, силикагели, иониты, материалы на основе углеводородных волокон, болотная руда, торф и другие [2].

В данной работе представлены результаты по изучению степени снижения ионов Cr^{+3} и Cu^{+2} из растворов с помощью природного сорбента – торфа канадской фирмы Shrag sorbins, применяемого на очистных сооружениях г.Москва для очистки ливневых стоков. Сорбционная способность торфа обеспечивается наличием в нем гуминовых кислот, участвующих в реакциях ионного обмена и комплексообразования, имеющих

функциональные группы COOH, фенольные гидроксилы, группы –SH, =NH –. При взаимодействии гуминовых кислот с катионами образуются металл-гуминовые комплексы, которые легче рекуперировать.

В качестве сточной воды использовались водные растворы сернокислотного хрома и сернокислой меди с концентрацией по иону металла 1г/л. Концентрации ионов металлов в рабочих растворах определялись фотометрическим методом на фотоколориметре КФК-2 по предварительно построенным тарировочным кривым.

Исходный торф представлял собой полидисперсную систему, из которой были выделены три фракции с размером частиц: 1 фракция – 0,56 ÷ 1,0 мм; 2 фракция – 1,0 ÷ 1,4 мм; 3 фракция 1,4 ÷ 2,0 мм. Каждая фракция торфа подвергалась термической модификации при температурах 100 °С и 170 °С для повышения его сорбционной способности [3]. Опыты проводились в стационарных условиях.

Данные экспериментов с разными фракциями исходного торфа показали, что размер частиц сорбента оказывает влияние на степень очистки рабочего раствора от ионов металлов. Степень очистки рассчитывалась по уравнению:

$$\alpha = \frac{C_n - C_k}{C_n} 100\%,$$

где: C_n , C_k – начальная и конечная концентрации ионов металла в растворе, г/л.

Изменение размера частиц исходного торфа от первой фракции до третьей приводит к уменьшению степени очистки от иона меди с 13% до 6%, а для ионов хрома с 9% до 5 % за два часа процесса сорбции. (табл. 1).

Таблица 1. Влияние размера частиц исходящего торфа на степень поглощенных металлов

Фракции	Степень поглощения, α , %	
	ион Cr ⁺²	ион Cu ⁺²
Крупные фракции	5	6
Средние фракции	7	8
Мелкие фракции	9	13

Термической модификации подвергалась самая мелкая фракция исходного торфа. Термообработка сорбента приводит к увеличению степени поглощения ионов как хрома, так и меди. Минимальная степень поглощения достигается для фракции, модифицированной при температуре 170 °С. За время процесса сорбции в течение 3 часов степень поглощения для иона хрома увеличилась в 6,6 раза, а для иона меди в 1,3 раза для модифицированного торфа при температуре 170 °С по сравнению с исходным (табл. 2).

Таблица 2. Влияние температуры модификации на степень очистки

Температура, °С	Степень очистки, α , %	
	α , %, ион хром	α , %, ион меди
20	11,7	15,1
100	66	16
170	70	20

Как видно из табл. 2, ионы Cr⁺³ значительно лучше сорбируются по сравнению с ионами Cu⁺². Эту зависимость, вероятно, можно объяснить образованием ионных комплексов хрома. Термическая модификация исходного торфа приводит к повышению его гидрофобности. Подтверждением этого являются результаты опытов, полученных по определению гигроскопической влажности (Г, %) сорбента в зависимости от температуры его обработки. Гигроскопическая влажность определялась эксикаторным методом при

влажности воздуха $\varphi = 100\%$. Значение гигроскопической влажности при достижении максимальной массы образца рассчитывалась по уравнению:

$$\Gamma = \frac{M_k - M_n}{M_n} \cdot 100\%,$$

где: M_n , M_k – начальная и конечная масса образцов, г.

Увеличение температурной обработки исходного торфа мелкой фракции до 170 °С приводит к ухудшению сорбционной способности сорбента паров влаги (табл. 3), то есть происходит повышение лиофобных свойств материала.

Таблица 3. Зависимость гигроскопической влажности сорбента от температуры обработки

Температура, °С	Гигроскопическая влажность, %
20	33
100	31
170	21

Это свойство лиофобности положительно влияет на процесс извлечения из водной среды тяжелых металлов, нефти и нефтепродуктов.

Таким образом, показано, что сорбент (торф) фирмы Shpag sorbins обеспечивает сорбцию из водной среды ионов Cr^{+3} на 70%, а ионы Cu^{+2} сорбируются недостаточно (на 20%). Улучшение сорбционной способности возможно достичь модификацией торфа при температурах 200 °С – 250 °С. Механизм сорбции в значительной степени осуществляется ионным взаимодействием с гуминовыми кислотами.

Список литературы

1. Кондауров Б.П. Сточные воды кожевенного предприятия: проблемы и решения / Б. П. Кондауров, А. А. Захарова, В. И. Александров, Л. Т. Бахшиева, В. С. Салтыкова. – М.: ИИЦ МГУДТ, 2011. – 285 с.
2. Лыч П.И. Гидрофильность торфа / П. И. Лыч. – Минск: Наука и техника, 1991 – 255 с.
3. Наумов Л. Б. Особенности процессов адсорбции и десорбции паров воды на исходных и модифицированных образцах торфа / Л. Б. Наумов, Т. С. Минакова, Е. Б. Чернов и др. // Журнал прикладной химии. – 2011. – т. 84, выпуск 5. – С. 762-767.
4. Новоселова Л. Ю. Сорбенты на основе торфа для очистки загрязненных сред / Л. Ю. Новоселова, Е. Е. Сироткина // Химия твердого топлива. – 2008. – №4 – С. 64-77.

УДК 678.03

**СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА**
SORPTION PROPERTIES OF THE FIBRE COMPOSITE MATERIAL

**Людмила Викторовна Моисеева, Александр Викторович Сухарев,
Станислав Антонович Иванов**
Liudmila V. Moiseeva, Aleksandr V. Suharev, Stanislav A. Ivanov

Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow State University of Design and Technology, Russia, Moscow
(e-mail: htipe-mgudt@yandex.ru, stascool@list.ru).

Аннотация: Рассмотрены особенности сорбционных свойств волокнисто-пористых материалов, полученных на основе коллагенсодержащих отходов кожевенного производства.

Abstract: This paper considers the features of fibro-porous materials absorbing properties, based on collagen-containing waste of tanning industry.

Ключевые слова: коллагенсодержащие отходы, волокнисто-пористые материалы, сорбция, хемосорбция.

Keywords: collagen-containing wastes, fibro-porous materials, absorption, chemical absorption.

В решении задач, направленных на создание природоподобных технологий, в которых сведены к минимуму потери вещества и энергии, важное место занимает использование отходов производств в качестве вторичного сырья. Особое внимание следует уделить рациональному использованию растительного и животного сырья. Во-первых, это возобновляемые природные ресурсы, во-вторых, действующие до настоящего времени технологии переработки этих видов имеют низкий процент перехода в целевой продукт, например, в кожевенном производстве только около 50% массы шкуры животного переходит в кожу, а кожа это только полуфабрикат, из которого изготавливают обувь, одежду и это изготовление тоже сопровождается потерями. И в-третьих, животное и растительное сырье представляет собой уникальные композиционные материалы, созданные природой на основе биополимеров, которым относится коллаген – основной белок шкуры животного и целлюлоза – основа древесины. Особенности многоуровневой структурной организации природных биополимеров, в частности коллаген, предопределяет образование капиллярно-пористого материала, способного к сорбционным процессам.

Путем их модификации можно создавать волокнисто-пористые материалы с широким спектром необходимых человеку потребительских и, отчасти, уникальных свойств. Создание искусственных и синтетических волокнисто-пористых материалов с заданными свойствами на базе восполняемого природного сырья является актуальной задачей современного периода развития прикладных наук.

В ранее представленных публикациях авторов [1,2] рассматривались пути решения указанных задач. Образующиеся на разных стадиях технологического цикла коллагенсодержащие отходы, сохранившие волокнистую макроструктуру, подвергают специальной механической (разволокнение) или химической (частичная дегградация) модификации, что позволяет получить необходимые компоненты волокнистых композиций: и волокна, и биополимерную матрицу, и активные наполнители.

Технологические возможности полученных биополимерных композиционных материалов на основе продуктов растворения коллагена далеко не исчерпаны. Различные способы модификации продуктов направленной дегградации нерастворимого белка – коллагена открывает широкие перспективы создания уникальных композиционных

материалов с широким спектром свойств. Проведенные исследования позволили определить пути его использования в качестве сорбирующего и фильтрующего материала [3].

Объектом исследования послужил волокнисто-пористый материал, представляющий собой композицию из волокнистых фрагментов коллагена, продуктов принудительного растворения коллагена – полидисперсной системы, включающей фрагменты с различной степенью деградации коллагена от полипептидных цепей с молекулярной массой до 25 тыс.ед. до фрагментов надмолекулярного уровня организации волокнистого белка с молекулярной массой около 200 тыс. ед. Продукты растворения коллагена выполняют роль связующего или биополимерной матрицы, а волокнистые частицы - роль активного наполнителя.

Для определения возможности использования полученного материала в качестве сорбента определяли его пористость и удельную поверхность пор.

Связующий компонент композиции фрагментарно покрывает поверхность волокнистых частиц, при этом обеспечивает увеличение количества свободных реакционноспособных групп поверхности белковых структур. Это важный фактор обеспечивает протекание последующих хемосорбционных процессов на поверхности. Важно отметить, что обладая при криоструктурировании способностью к волокнуобразованию в полидисперсной системе могут при возникать нановолокна. Известно, что волокна наноскопического и субмикронного диаметра в нетканых материалах обеспечивают ряд уникальных свойств, в числе которых большая удельная площадь поверхности и сверхмалый размер пор. Пористость исследуемых образцов волокнисто-пористого материала определяли на поромере - анализаторе Gemini VII. Анализ результатов позволил отметить, что эффективный диаметр микропор характеризуется величинами от 3 до 40 нм, а их удельная площадь поверхности составляет 0,93-0,99 м²/г.

Наличие свободных на белковой поверхности структурных элементов волокнисто-пористого материала обеспечивает их способность к различному химическому взаимодействию, частности, к комплексообразованию.

Комплексы водорастворимых полимерных реагентов с ионами тяжелых и переходных металлов обычно представляют собой хелаты. Их устойчивость и характер связи между ионами металла и макромолекулой определяются строением полимерной цепи, природой функциональных групп, длиной макромолекулы и другими факторами. Указанные свойства дают основание использовать полученные композиции для извлечения комплексообразующих металлов из различных сред. Интересные результаты были получены при использовании исследуемых композиций для реставрации металлических поверхностей. Для эксперимента была использована коллагенсодержащая дисперсия с рН 4,5-5,0 с содержанием белкового вещества 3%. В качестве объектов исследования были выбраны старые монеты и изделия из мельхиора. Поверхность металла обрабатывали препаратами и высушивали. После высыхания дисперсии образуется пленка, которую легко можно удалить с поверхности металла, а вместе с ней и продукты коррозии. Визуальная оценка результатов показала эффективность такой обработки. Композиция позволяет обеспечить бережную очистку поверхности металла, при этом предложенная для обработки дисперсия не реагирует с не окисленным металлом.

Таким образом, используя для получения новых композиционных материалов компоненты, обладающие полифункциональными свойствами, можно комплексно решать экологические и технологические проблемы современного производства.

Список литературы

1. Бычкова И.Н., Есина Г.Ф., Моисеева Л.В. Получение и модификация биополимерных композиций на основе продуктов растворения коллагена //Сборник научных статей и воспоминаний «Памяти В.А.Фукина посвящается» ч. 2, М. МГУДТ, 2014. С.59 – 61.
2. Сухарев А.В., Моисеева Л.В., Алефиров А.О. Исследование фильтрующего материала// Сб. научных трудов аспирантов, вып. 20, М., ФГБОВПО «МГУДТ», 2015,с.56-60.

3. Моисеева Л.В., Сухарев А.В. Глубокое обезвоживание жидких углеводов с использованием гидрофильных композиций, полученных из отходов кожевенного производства // Сб. докладов Первые международные Лыковские научные чтения МЛНЧ-2015, М.2015, с. 433-435

4 Моисеева Л.В., Моргун О.С, Филатов П.М. Новое направление использования биополимерных дисперсий, полученных из коллагенсодержащих отходов кожевенного производства //Сб. материалов Международной научно-технической конференции «Инновации-2015» М., ФГБОВПО «МГУДТ», ноябрь 2015,ч.3, с.131-133.

УДК 66.061

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД КОНДИТЕРСКИХ
ПРОИЗВОДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
IMPROVING THE EFFICIENCY OF WASTEWATER TREATMENT OF
CONFECTIONERY PRODUCTION WITH USE OF ULTRASONIC IMPACT**

**Марат Салаватович Муллакаев, Анна Вадимовна Киселева, Азат Ринатович Вахитов
Marat S. Mullakaev, Anna V. Kiseleva, Azat R. Vachitov**

*Московский государственный машиностроительный университет, Россия, Москва
Moscow State Engineering University, Russia, Moscow
(e-mail: kis.anna2014@yandex.ru)*

Аннотация: В работе экспериментально определены рациональные значения технологических параметров, обеспечивающих интенсификацию процесса очистки сточных вод предприятия «Марс», за счёт ультразвуковой активации реагентов. Предприятию рекомендуется рассмотреть целесообразность модернизации технологии очистки сточных вод на стадии флотации очистных сооружений за счёт ультразвуковой активации реагентов коагулянта, что позволит отказаться от использования флокулянта.

Abstract: In our experiments, we defined rational values of technological parameters, providing intensification of the process of wastewater treatment enterprise "Mars", due to the ultrasonic activation of reagents. The company is recommended to consider the feasibility of upgrading wastewater treatment technologies at the stage of flotation treatment plants due to the ultrasonic activation of reagents coagulant that will allow to refuse the use of flocculant.

Ключевые слова: сточные кондитерских производств, флотация, коагулянт, флокулянт, ультразвук, ультразвуковая активация, степень очистки, модернизация технологии очистки.

Keywords: waste confectionery industries, flotation, coagulant, flocculant, ultrasound, ultrasonic activation, the degree of purification, upgrading purification technology.

Сточные воды предприятий пищевой промышленности относят к категории высококонцентрированных стоков по органическим загрязнителям. Сложность решения проблемы очистки производственных сточных вод обусловлена разнообразием их состава, сложностью и биологических процессов, лежащих в основе их очистки, большими капитальными и эксплуатационными затратами [1-5].

Несмотря на значительные затраты энергии ультразвук, вследствие способности стимулировать физико-химические процессы, получил широкое распространение для интенсификации различных методов очистки сточных вод [6-8], в частности флотационной с ультразвуковой активацией (УЗА) реагентов [9-11].

Аппаратурно-технологическая схема очистных сооружений кондитерской фабрики «Марс» предусматривает предварительную очистку загрязненных вод с использованием механических грабель и барабанной решетки, их периодическое накопление в буферной ёмкости и обезвреживание во флотаторе и биореакторах, финишную очистку на песчаном и

угольном фильтре, обеззараживание на озонаторной установке, сброс очищенных и обезвреженных вод в пруд-отстойник и далее в реку Ситня.

Проектная производительность очистных сооружений 22,9 м³/ч, среднесуточное значение – 15,4 м³/ч. Флотатор работает в периодическом режиме по мере заполнения буферной емкости с производительностью 40 м³/ч. Перед поступлением во флотационную камеру предварительно очищенные стоки подщелачиваются с использованием 46% NaOH с расходом 0,75 л на 1 м³ воды (510 мг/л по сухому веществу). В качестве коагулянта применяется 10% Al₂(OH)_nCl (полиоксихлорид алюминия), расход которого составляет 0,33 л на 1 м³ воды (0,33 мл/л). Расход флокулянта Praestol K333L при этом в среднем – 6 г на 1 м³ воды (6 мг/л). Расход воздуха на флотатор для получения водовоздушной смеси – 8,7 л/мин. Рабочий объем флотационной камеры ~ 21 м³. Осреднённые показатели реагентной флотации сточных вод по данным аналитической лаборатории фабрики «Марс» приведены в табл. 1.

Таблица 1. Осреднённые показатели реагентной флотации сточных вод

Место отбора пробы	t, °С	pH	XПК, мг O ₂ /л	БПК, мг O ₂ /л	Взвешенные вещества, мг/л	Азот общий, мг/л	Фосфаты, мг/л
Буферная емкость	26,4	4,9	5756	2237	807	55,1	48,3
На выходе из флотатора	26,4	6,8	1657	685	22	24	20,7

Проведён комплекс лабораторных экспериментов по очистке проб стоков фабрики «Марс» с использованием флотационной установки фирмы «МЕДИАНА-ЭКО», портативного компрессора AVAC VOXY и ультразвуковой установки «Пульсар-2»

С помощью крана на линии опорожнения в сатураторе устанавливалось и поддерживалось давление в 6 атм, после 10 мин работы кран перекрывался и выключался компрессор. Давление в сатураторе при этом повышалось до 8 атм. Флотационное разделение осуществлялось в течение 15 мин при плавной подаче в течение 30 с водопроводной воды объёмом 150-200 мл, предварительно насыщенной воздухом в сатураторе.

УЗА реагентов проводили на установке, состоящей из генератора MUG 3/18–27 мощностью 2 кВт и преобразователя МСП 1/22, снабжённого волноводно-излучающей системой стержневого типа. УЗА реагентов осуществлялась в течение 30 - 60 с в стеклянном термостойком стакане ёмкостью 50 мл при резонансной частоте 24,4 кГц и амплитуде колебаний торца волновода в 5 - 10 мкм.

Задачей исследования было определение рациональных значений технологических параметров, обеспечивающих интенсификацию процесса за счёт ультразвуковой активации реагентов и максимальную степень очистки сточных вод предприятия.

В экспериментах были апробированы реагенты, которые используются на участке флотации очистных сооружений фабрики «Марс» а также проведена оценка целесообразности их ультразвуковой активации (УЗА). Результаты выполненных экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты очистки сточных вод ООО «МАРС»

Проба	УЗА	pH	XПК, мгО/л	PO ₄ ³⁻ , мг/л	БПК мгО/л
Исходная вода		6,15	2544	20,50±2,05	1510,0±181,2
NaOH 46% p-p, Al ₂ (OH) _n Cl, 10% p-p, Praestol K333L 0,1% p-p	-	10,6	1584	4,38±0,44	1460,0±175,2
NaOH 46% p-p, Praestol K333L 0,1% p-p	-	10,7	1021	7,50±0,75	910,0±101,2
NaOH 46% p-p, Al ₂ (OH) _n Cl, 10% p-p, Praestol K333L 0,1% p-p	+	10,5	702	6,38±0,64	1550,0±186,0

Как видно из табл. 2, заметное снижение ХПК в щелочной среде может быть достигнуто за счёт использования только флокулянта Praestol K333L. При совместном применении реагентов в этом случае весьма эффективна предварительная УЗА коагулянта $Al_2(OH)_nCl$.

Последующие опыты со сточными водами (значением ХПК - 1380 мгО/л и рН - 6,1), выполнялись с подщелачиванием стоков до значения рН = 7 с дозировкой из расчёта 46% NaOH 0,55 л/м³ и рН = 9,5 с дозировкой из расчёта 46% NaOH 0,88 л/м³.

Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

Как следует из табл. 3, при совместном использовании $Al_2(OH)_nCl$ и Praestol K333L (опыт № 1) наибольшее снижение значения ХПК имеет место в щелочной среде. В нейтральной среде (опыт № 1) применение этих реагентов менее эффективно. При значении рН 7 наибольшее снижение ХПК зафиксировано при предварительной УЗА алюмосодержащего коагулянта $Al_2(OH)_nCl$. Применение флокулянта Praestol K333L на основе полиакриламида (опыты № 1 и № 3, а также №4 и № 5), отрицательно влияет на этот показатель.

Без коагулянта флокулянт Praestol K333L (опыт № 2) позволяет получить в нейтральной среде снижение ХПК примерно на 20% меньшее, чем в щелочной. При использовании в нейтральной среде коагулянта $Al_2(OH)_nCl$ (опыты №3 и №4) без этого флокулянта значения ХПК сопоставимы с результатами при рН 9,5 (опыт № 1).

УЗА коагулянта $Al_2(OH)_nCl$ (опыт №4) позволяет получить при рН 7 значение ХПК, достигнутое при совместном использовании реагентов без ультразвукового воздействия (опыт № 1).

Таблица 3. Результаты очистки сточных вод ООО «МАРС»

№ п/п	Реагенты			ХПК очищенной воды, мгО/л			Степень очистки, %		
	NaOH	$Al_2(OH)_nCl$	Praestol K333L	рН 6,1	рН 7	рН 9,5	рН 6,1	рН 7	рН 9,5
1	+	+	+	—	1058	552	—	23	60
2	+	—	+	—	828	1012	—	40	27
3	+	+	—	—	644	598	—	52	55
4	+	УЗА	—	—	598	791	—	55	41
5	+	УЗА	+	—	1196	736	—	13	47
6	+	+	УЗА	—	—	690	—	—	50
7	+	УЗА	УЗА	—	—	644	—	—	53
8	—	—	—	920	—	—	33	—	—

На основе результатов работ рекомендуется рассмотреть целесообразность и возможность модернизации технологии очистки сточных вод фабрики «Марс» на стадии флотации очистных сооружений этого предприятия с использованием блока УЗА реагентов.

Рекомендуемая принципиальная технологическая схема стадии ультразвуковой реагентной флотационной очистки сточных вод фабрики «Марс» от органических загрязнений представлена на рис. 1.

Коагулянт поступает из ёмкости 4 с помощью гидродинамического излучателя 1 и насоса 2 после активации в ультразвуковом реакторе 3, вводится в поток загрязнённой воды, направляемой, после предварительной очистки, во флотационный аппарат 6. Подобным же образом последовательно в поток загрязнённой воды из ёмкости 5 вводится рабочий раствор флокулянта, приготовление которого происходит в отдельном ультразвуковом блоке.

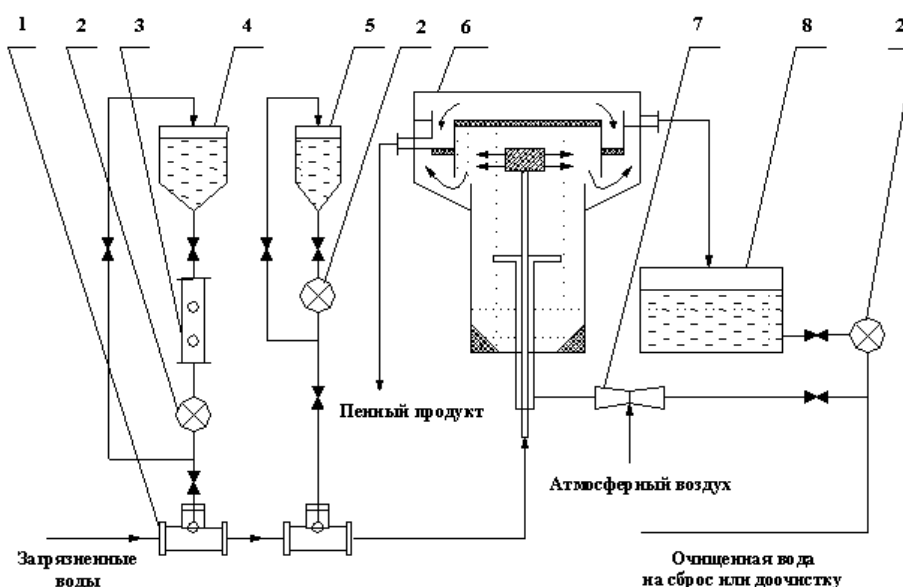


Рис.1. Принципиальная технологическая схема ультразвуковой реагентной флотации.

- 1- гидродинамический излучатель; 2 - насос; 3 - ультразвуковой реактор;
 4 - ёмкость коагулянта; 5- ёмкость флокулянта; 6 - флотационный аппарат;
 7 - гидродинамический кавитатор; 8 - ёмкость для сбора очищенной воды.

Регулирование расхода реагентов, поступающих в подлежащую очистке воду, осуществляется за счет рациональной организации циркуляционного движения в замкнутых контурах. Поток очищаемой воды равномерно смешанный с реагентами поступает в распределительное устройство флотатора, расположенное в его верхней зоне, ниже уровня отвода пены и обеспечивающее равномерное горизонтальное распределение потока по поперечному сечению. Отвод осветленной воды под перегородку приводит к формированию нисходящего течения жидкости.

С целью интенсификации процесса разделения в нижней части флотатора предусмотрен аэрирующий коллектор, в который поступает водовоздушная эмульсия, образующаяся в гидродинамическом кавитаторе 7, в который с помощью насоса 2 подается из емкости 8 вода для дальнейшей очистки. В активной зоне кавитатора образуются оптимальные по размеру (50...500 мкм) воздушные пузырьки, под действием которых возникает эрлифтный поток, направленный навстречу потоку очищаемой воды.

Выводы

1. Эксперименты по реагентной флотации сточных вод ООО «Марс» за счёт УЗА реагентов щелочного раствора NaOH, коагулянта $Al_2(OH)_nCl$, и флокулянта Praestol K333L, показали:

- при совместном использовании $Al_2(OH)_nCl$ и Praestol K333L наибольшее снижение значения ХПК имеет место в щелочной среде. Применение этих реагентов в нейтральной среде менее эффективно;

- при значении pH 7 наибольшее снижение ХПК зафиксировано при предварительной ультразвуковой активации алюмосодержащего коагулянта $Al_2(OH)_nCl$. Применение флокулянта Praestol K333L на основе полиакриламида, отрицательно влияет на этот показатель.

- флокулянт Praestol K333L позволяет получить в нейтральной среде снижение ХПК примерно на 20% меньше, чем в щелочной.

- при использовании в нейтральной среде коагулянта $Al_2(OH)_nCl$ без флокулянта Praestol K333L, значения ХПК сопоставимы с результатами при pH 9,5. УЗА коагулянта $Al_2(OH)_nCl$ позволяет получить при pH 7 значение ХПК, достигнутое при совместном использовании реагентов без ультразвукового воздействия.

2. На основе результатов работ предприятию ООО «Марс» рекомендуется рассмотреть целесообразность и возможность модернизации технологии очистки сточных вод на стадии флотации очистных сооружений этого предприятия с использованием блока УЗА реагентов.

Список литературы

1. Гавриленков, А. М. Экологическая безопасность пищевых производств / А. М. Гавриленков, С. С. Зарцина, С. Б. Зуева. СПб.: Гиорд, 2006. 272 с.
2. Запольский А. К., Баран Л. А. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды: Свойства, получение, применение. Л.: Химия, 1987. 208 с.
3. Chemistry with Ultrasound / Ed. by T.J. Maison. The Society of Chemical Industry. London. Elsevier, 1990. 195 с.
4. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов. Дис. докт. техн. наук. М.: Московский государственный университет инженерной экологии, 2011. 391 с.
5. Абрамов В.О., Булычев Н.А., Градов О.М., Кистерев Э.В., Муллакаев М.С. Исследование особенностей ультразвукового воздействия на гетерогенные системы жидкость - дисперсионные включения газовой, жидкой и твердой фазы // Сб. трудов II междунар. конф.: «Современные проблемы общей и неорганической химии». Москва. 2009. С. 479 - 490.
6. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация добычи и переработки нефти. - М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2014. 168 с.
7. Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Векслер Г.Б. Ультразвуковая техника в процессах добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов // Химическая техника. 2012. Ч. 2. № 11. С. 34 - 38.
8. Муллакаев М.С, Абрамов В.О., Векслер Г.Б., Муллакаев Р.М. Ультразвук в процессах очистки кислых рудничных вод // Экология и промышленность России. 2015. № 12. С. 9–14.
9. Аитова И.З., Векслер Г.Б., Гольберг Г.Ю., Муллакаев М.С. Интенсификация флотационной очистки нефтезагрязненных вод с предварительной ультразвуковой активацией реагента // Известия МГТУ (МАМИ). 2012. Т. 4. № 2. С. 129-135.
10. Abramov O.V., Abramov V.O., Veksler G.B., Kulov N.N., Zabolina E.V., Kashirskaya O.A., Shkolnikov A.V., Mullakaev M.S. Ultrasonic activation of reagent purification of surface wastewaters from oil products // Theoretical foundations of chemical engineering. 2009. Vol. 43.P. 568-574.
11. Абрамов В.О., Векслер Г.Б., Муллакаев М.С., Аитова И.З. Ультразвуковая интенсификация процессов очистки поверхностных вод Студенец–Ваганьковского ручья на Краснопресненской набережной г. Москвы. // Экология и промышленность России. 2011. № 1. С. 10-12.

УДК 628.3:67

**СОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВ ЛЕГКОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ОТ КИСЛОТНЫХ КРАСИТЕЛЕЙ**
**SORPTION SEWAGE TREATMENT OF LIGHT INDUSTRIES PRODUCTIONS
FROM ACID DYES**

**Валентина Сергеевна Салтыкова, Антонина Александровна Захарова,
Анна Васильевна Юркова**
Valentina S. Saltykova, Antonina A. Zakharova, Anna V. Yurkova

Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow State University of Design and Technology, Russia Moscow
(e-mail: Htipe-mgudt@Yandex.ru)

Аннотация: В работе представлены результаты исследования очистки сточных вод, содержащих органические кислотные красители, сорбционным методом. В качестве сорбента использован торф, применяемый в г. Москве для очистки ливневых стоков.

Abstract: The paper presents the results of research on purification of wastewater containing organic acid dyes, sorption method. At the sorbent used, the peat used in Moscow to clean stormwater

Ключевые слова: краситель, сорбция, степень поглощения, сорбционная способность.
Keywords: dye, sorption, absorption, sorption capacity.

Загрязнения сточных вод органическими соединениями, в том числе красителями, создают серьезную опасность для природных вод. Ухудшается качество природных вод в следствие изменения их свойств, изменяется кислородный режим водоемов, увеличивается минерализация, что уменьшает биохимическую жизнь в водоемах.

В связи с этим возникает необходимость очистки промышленных стоков от красителей. Для снижения концентрации красителей в сточных водах применяют физико–химические, деструктивные, биологические и другие методы очистки.

В данной работе для снижения концентрации красителей в водных растворах выбран сорбционный метод с применением природного сорбента – торфа канадской фирмы, который используется на очистных сооружениях г. Москвы для очистки ливневых стоков.

В качестве сточной воды были приготовлены модельные водные растворы кислотных красителей (кислотный красный и кислотный черный) с концентрацией 0,1 г/л. Концентрации красителей в рабочих растворах определялись фотометрическим методом на фотоколориметре КФК-2 по предварительно построенным тарировочным кривым.

Из исходного торфа были выделены в работе две фракции с размером частиц: 1 фракция – 0,4÷0,56мм; 2 фракция – 1,0-1,2 мм. Фракции исходного торфа подвергались термической модификации при температуре 175 °С [1, 2].

Результаты опытов, проведенных с кислотным красителем красным в стационарных условиях с крупной фракцией частиц сорбента, показали, что модифицирование торфа приводит к увеличению степени извлечения красителя с 55% до 61% (табл. 1). Степень извлечения (поглощения) рассчитывалась по уравнению:

$$\alpha = \frac{C_n - C_k}{C_n}, \%$$

где: C_n, C_k – начальная и конечная концентрации красителя в растворе.

Значительное изменение концентрации красного красителя происходит через 30 минут процесса сорбции.

Таблица 1. Влияние термообработки торфа на степень поглощения красного красителя

Тип торфа	Степень поглощения, α , %
Исходный торф, $t=20\text{ C}^0$	55
Модифицированный торф, $t=175\text{ C}^0$	61

Так как величина поглощенного вещества зависит от поверхности контакта фаз, то в работе было проведено изучение влияния размера частиц сорбента на степень поглощения красного красителя. Полученные результаты опытов показали, что размер частиц как исходного, так и модифицированного сорбента оказывал незначительное влияние на степень поглощения (1-2%).

Для интенсификации процесса сорбции красного красителя на модифицированном сорбенте мелкой фракции были проведены опыты по влиянию на степень поглощения перемешивания рабочих растворов. Перемешивание проводилось с помощью магнитной мешалки при числе оборотов 1500 об/мин. Проведение процесса сорбции при перемешивании модельного раствора увеличивало степень поглощения в течении 30 минут опыта с 37 до 53%, то есть повышалась в 1,4 раза (табл. 2)

Таблица 2. Влияние перемешивания раствора на степень поглощения красного красителя

Условие сорбции	Степень поглощения, α , %
Без перемешивания раствора	37
С перемешиванием раствора	53

Опыты с красным красителем (молярная масса 378 г/моль) показали, что наибольшее снижение концентрации данного красителя в рабочих растворах происходит с использованием модифицированного торфа мелкой фракции при проведении процесса с перемешиванием.

При данных условиях в работе было изучено влияние молярной массы красителя на процесс сорбции. Для этого использовали дополнительно водный раствор кислотного красителя черного (молярная масса 755 г/моль) с концентрацией 0,1 г/л. За время сорбции в течение 30 минут степень очистки для черного красителя составила 26%, для красного – 53%.

Для красного и черного красителей были построены сорбционные кривые (табл. 3) за время сорбции 1 час.

Таблица 3. Сорбционная емкость красителей.

Концентрация красителя, C , г/л	Сорбционная емкость, г/г	
	Краситель красный	Краситель черный
0,0125	0,017	0,011
0,025	0,04	0,018
0,05	0,068	0,044
0,1	0,126	0,11

Как видно из таблицы, сорбционная емкость красителя кислотного черного за 1 час процесса сорбции меньше, чем у красителя красного. Для черного красителя при концентрации красителя в растворе 0,1 г/л сорбционная емкость составила 0,126 г. красителя /г сорбента, для черного – 0,11 г/г. Молярная масса кислотного красного меньше по сравнению с черным. Вероятно, модифицированный торф представляет из себя мелкопористую структуру, которая в меньшей степени способствует сорбции красителя с большей молекулярной массой.

Таким образом, сорбционный способ очистки сточных вод от органических красителей пригоден для предварительной очистки стоков со степенью извлечения 30 – 60% в зависимости от условий проведения процесса.

Список литературы

1. Трифонова О. А. Угольные сорбенты; очистка сточных вод от красителей // Экология и промышленность России. – 2004. – № 12. – С. 10-12.
2. Новоселова Л. Ю., Сироткина Е. Е. Сорбенты на основе торфа для очистки загрязненных сред. // Химия твердого топлива. – 2008. – № 4. – С. 64-77
3. Волков В. А. Теоретические основы охраны окружающей среды. Учебное пособие. – СПб: Издательство «Лань», 2015. – 256 с.
4. Родионов А.И. Технологические процессы технологической безопасности / А. И. Родионов, Н. В. Клушин, В. Г. Систер. – Калуга: Издательство Н.Д. Бочкаровой, 2007. – 800 с.

УДК 544.723.212

ПРИМЕНЕНИЕ ГУМАТОВ В КАЧЕСТВЕ ПРИРОДНЫХ ДЕТОКСИКАНТОВ APPLICATION HUMATE AS A NATURAL DETOXIFIER

**Юлия Сергеевна Мирошниченко, Татьяна Николаевна Мясоедова,
Юлия Евгеньевна Зеленко
Julia S. Miroshnichenko, Tatyana N. Myasoedova, Julia E. Zelenko**

*Южный федеральный университет, Россия, Таганрог
Southern Federal University, Russia, Taganrog*

(e-mail: yuliya_pogotova@mail.ru, nazarova@hotmail.ru, efimenko-julia@rambler.ru)

Аннотация: Проведено исследование детоксицирующей способности гуматов по отношению к ионам меди (II) и свинцу (II). Установлено, что гуматы могут детоксицировать большие концентрации тяжелых металлов.

Abstract: The study of humates detoxifying ability in relation to ions of copper (II) and lead (II). Found that the humates can detoxify large concentrations of heavy metals.

Ключевые слова: гуматы, ионы меди, ионы свинца, детоксицирующая способность
Keywords: humates, copper ions, lead ions, detoxifying ability

Проблема очистки промышленных стоков и подготовки воды для технических и хозяйственно-питьевых целей с каждым годом приобретает все большее значение. Неочищенные воды, попадая в водоемы, ухудшают их санитарное состояние, в связи с чем необходима глубокая их очистка. В настоящее время большое внимание уделяется очистке производственных сточных вод от ионов тяжелых металлов. Главная опасность заключается в том, что эти металлы являются токсичными и могут накапливаться в организме, вызывая серьезные заболевания.

В настоящее время известно большое количество современных методов очистки вод от тяжелых металлов. Несмотря на это, многие ученые не списывают со счетов один из давних и эффективных методов очистки – сорбционный метод. В основе этого метода лежит использование различных сорбентов. Во всем мире сейчас большое внимание уделяется поиску природных, экономически и экологически выгодных сорбентов. К таковым относятся гуматы, исследованные в данной работе.

Основными источниками гуминовых веществ являются отходы бурого угля, торф и сапрпель. Гуминовые вещества выделяют щелочной экстракцией растворами аммиака или гидроксидами калия или натрия, а затем осаждают кислотой. Такая обработка переводит их в водорастворимые соли – гуматы калия или натрия, обладающие высокой биологической активностью. Альтернативный способ предполагает механическое измельчение бурого угля с твердой щелочью, в результате чего получается твердый, растворимый в воде гумат калия и натрия.

Гуматы содержат карбоксильные, гидроксильные, карбонильные группы и ароматические фрагменты. Благодаря им они вступают в ионные, донорно-акцепторные, гидрофобные взаимодействия, принимают участие в реакциях с образованием комплексов. Благодаря таким свойствам гуматы обладают широким спектром возможностей для восстановления окружающей среды. Они могут взаимодействовать со многими экотоксикантами, в том числе тяжелыми металлами [1].

В данной работе была изучена детоксицирующая способность водных гуматов натрия (ООО «Аграрные технологии», г. Иркутск) по отношению к ионам меди Cu^{2+} и ионам свинца Pb^{2+} (рис. 1). Для экспериментов готовили растворы CuSO_4 и $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ с концентрациями 0,3; 0,5; 0,8; 1 г/л (в пересчете на металлы). В колбы, содержащие по 50 мл тестовых растворов, добавляли концентрации водных гуматов натрия - 1 г/л для извлечения ионов меди и 0,4 г/л для извлечения ионов свинца. Добавление различной дозы гуматов объясняется тем, что для достижения одинаковой степени очистки от ионов меди и свинца требуются различные концентрации гуматов (установлено в результате предварительных исследований). Это связано с тем, что детоксицирующая способность ионов сильно зависит от радиуса иона и плотности заряда [2, 3]. Сорбцию проводили в статических условиях при перемешивании. После пробы выдерживали некоторое время при комнатной температуре. Для осаждения гуматов проводили центрифугирование. Содержание ионов меди контролировалось йодометрическим методом [4]. Содержание ионов свинца контролировалось комплексонометрическим методом [5]. Кривая 1 соответствует ионам меди (II). Кривая 2 соответствует ионам свинца (II).

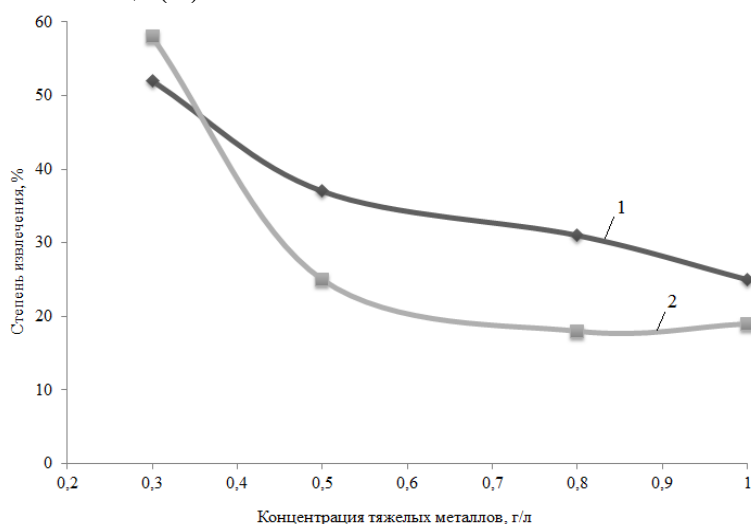


Рис. 1. Зависимость исходных концентраций тяжелых металлов от степени извлечения (концентрация водных гуматов натрия = 1 г/л для извлечения ионов меди (II), концентрация водных гуматов натрия = 0,4 г/л для извлечения ионов свинца (II), исходные концентрации ионов меди и свинца – 0,3; 0,5; 0,8; 1 г/л, pH = 6, время сорбции 1 ч, сорбция при комнатной температуре)

При повышении концентрации тяжелых металлов детоксицирующая способность водных гуматов натрия снижается. Наибольшая степень извлечения для ионов меди (II) составляет 52% при концентрации 0,3 г/л, а наименьшая 25% при концентрации 1 г/л. Для ионов свинца (II) наибольшая степень извлечения равна 58% при концентрации соответственно 0,3 г/л, тогда как наименьшая 19% при 1 г/л. Таким образом, показано, что, увеличивая дозу тяжелых металлов, необходимо увеличивать так же дозу гуматов. Из рисунка также следует, что гуматы могут детоксицировать достаточно большие концентрации тяжелых металлов, требуется лишь подобрать необходимые концентрации гуматов для более высокой степени очистки. Такие концентрации тяжелых металлов содержащиеся в сточных водах промышленных предприятий, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Концентрации тяжелых металлов в сточных водах промышленных предприятий

Тип промышленного предприятия	Концентрация тяжелых металлов в воде (неочищенной), г/л
Горнодобывающая промышленность [6]	0,05-0,2
Машиностроительные заводы [7]	0,4-0,5
Гальваническое производство [8]	3-113

Водные гуматы натрия могут очищать растворы с концентрациями тяжелых металлов 0,3-1 г/л, следовательно их можно использовать в качестве детоксикантов для очистки сточных вод горнодобывающей промышленности и машиностроительных заводов. Так же высока вероятность очистки гуматами вод, содержащих и более высокие концентрации тяжелых металлов.

В заключение статьи следует отметить, что водные гуматы натрия ООО «Аграрные технологии», г. Иркутск являются одними из перспективных природных детоксикантов. Полученные результаты показывают, что гуматы способны удалять из воды достаточно большие концентрации тяжелых металлов. Следовательно, их можно использовать в качестве детоксикантов для очистки сточных вод горнодобывающей промышленности и машиностроительных заводов.

Список литературы

1. *Перминова И.В., Жилин Д.М.* Гуминовые вещества в контексте зеленой химии // Зеленая химия в России: сб. ст. – М., 2004. С. 146 – 162.
2. *Ларионов Н.С. Боголицын К.Г., Богданов М.В., Кузнецова И.А., Ларионов Н.С.* Характеристика сорбционных свойств верхового торфа по отношению к d- и p-металлам // Химия растительного сырья. 2008. №4. С. 147 – 152.
3. *Ivana S.* Comparative study of binding strengths of heavy metals with humic acid // *Chem. ind.* 2013. 67 (5). P. 773–779.
4. *Портал аналитической химии:* <http://www.chemical-analysis.ru/analiz-na-elementy/svinets/priamoe-opredelenie-svintca-s-ksilenolovym-oranzhevym.html>.
5. *ГОСТ 32221-2013. Концентраты медные. Методы анализа* // 2014. М: Стандартиформ, 2014. 119 с.
6. *Мальцева В.С., Сазонова А.В.* Кинетика сорбции тяжелых металлов на природных модифицированных минералах // Дни науки-2012: Химия и химическая технология: материалы VIII Международной научно-практической конференции. - Прага, 2012. С. 86-90.
7. *Климов Е.С.* Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод. Ульяновск : УлГТУ, 2011. 201 с.
8. *Борбат В.Ф, Мухин В.А., Адеева Л.Н., Новикова И.М., Шаркова Г.И.* Способ очистки сточных вод гальванического производства от ионов тяжелых металлов. Патент на полезную модель № 2033972 Кл. C02F1/6230.04.1995.

УДК 504.03

**ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО АУДИТА В СИСТЕМЕ
МАРКЕТИНГА
DEVELOPMENT TRENDS OF ENVIRONMENTAL AUDIT IN THE MARKETING
SYSTEM**

**Валерий Павлович Титов, Заур Нурбиевич Османов
Valeriy P. Titov, Zaur N. Osmanov**

*Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва
Moscow state University of design and technology, Russia, Moscow
(e-mail: z.n.osmanov@ya.ru)*

Аннотация: Формирование общегосударственной системы наблюдения и контроля состояния природной среды тесно связано с экономико-статистическим учетом, анализом природопользования и природоохранной деятельности.

Abstract: Forming of the national monitoring system and control of the natural environment is closely linked with economic and statistical account and with the analysis of environmental management and protection activities.

Ключевые слова: экологический аудит, государственные кадастры природных ресурсов, охрана окружающей среды

Keywords: environmental audit, state cadastres of natural resources, environmental protection

В современных условиях происходит возрастание роли экологичности в производственной и маркетинговой деятельности многих зарубежных и российских предприятий различных сфер и форм деятельности. Согласно определению термина, данному известными отечественными экспертами в данной научной области, экологический аудит — это проведение ревизии экологической деятельности (экологичности) компаний.

В целом, общая концепция экологического аудита была разработана в конце 70-х прошлого века годов в США и впервые стала использоваться на практике для проверки соблюдения компаниями экологических требований законов, законодательных актов и нормативов США.

Современный экологический аудит включает, как правило, все более тщательную проверку следующих видов деятельности:

- выполнение экологических нормативов в соответствии с законодательством и внутрифирменными требованиями;
- определение уровня менеджмента экологической деятельности компании (проводится в случае, если данная компания не имеет официально принятых планов или программ в области охраны окружающей среды);
- функционирование системы экологического управления;
- получение экологического сертификата;
- выполнение финансовых обязательств и выплату долгов, правильность определения уровня рисков и эффективности риск-менеджмента при слиянии и приобретении компаний;
- составление экологической документации и отчетов компании об экологической деятельности в соответствии с современными нормативами.

В результате своего активного и динамичного развития современный экологический аудит представляет собой систематизированный, комплексный, документированный и верификационный процесс объективного выявления и оценки сведений для определения соответствия критериям проверки конкретных экологических мероприятий, видов деятельности, условий, управленческих систем или информации о них и информирования потребителя о полученных в ходе указанного процесса результатах.

Все более широко применяемые международные стандарты ИСО по экологическому аудиту включают методические материалы по принципам экологического аудита (ISO 14010), процедуре аудита систем экологического управления (ISO 14011.1) и квалификационные требования к специалистам по экологическому аудиту и их подготовке.

Напомним, что для создания маркетинговой системы важно, чтобы экологический аудит рассматривался в качестве особого управленческого инструмента и составной части систем экологического управления. В экономически развитых государствах экологический аудит проводится обычно высококвалифицированными экспертами - консультантами по заданию властных структур. В систему данных мероприятий входит проверка выполнения экологических положений законов и норм охраны окружающей среды, в том числе в деятельности банков или страховых компаний при принятии ими решений о предоставлении кредитов, ссуд или страхового полиса. Важное значение приобретает также и проверка деятельности крупных, средних и малых предпринимательских структур и всех частных компаний, в том числе при реструктуризации, при слияниях или приобретениях компаний.

В результате таких проверок очень часто налагаются высокие штрафы или применяется временное принудительное закрытие. Таким образом, результаты экологического аудита служат достоверным источником маркетинговой информации об экологических аспектах деятельности компании. Очевидно, что эта информация исключительно важна для принятия последующих управленческих решений внутри и вовне компаний.

Анализируя эффективность внедрения в компании экологических мероприятий и систем экологического управления, многие эксперты отмечают значительные прямые выгоды этого направления совершенствования управленческой и маркетинговой деятельности. Эти выгоды все чаще и очевиднее связаны с возможностью существенно расширить рынок сбыта продукции. При этом достигается также реальная возможность избежать ненужных расходов, снизить издержки производства и реализации продукции, сберечь основные фонды, получить нужные инвестиции для внедрения инновационных технологий. Как весьма важное косвенное обстоятельство эксперты отмечают и улучшение мотивации сотрудников компании, гармонизацию отношений с местным населением, снижение угроз и рисков репутации компании.

Характерно, что многие иностранные партнеры по совместным предприятиям, стремясь приспособиться к характеру деловых отношений в нашей стране, в том числе к бытующей практике грубого и безнаказанного нарушения природоохранных норм, на территории ряда субъектов Российской Федерации не соблюдают законодательные положения в области охраны окружающей среды.

Общественные природоохранные организации и СМИ часто публикуют материалы, касающиеся, например, нефтяной, нефтехимической, металлургической и горнодобывающей промышленности. В этой связи, очевидно, возрастает актуальность и роль экологического аудита и экологической отчетности в России в настоящее время и в обозримой перспективе.

Следует особо отметить, что значительные возможности для становления отрасли экологических услуг (аудит и страхование) возникают с развитием частного сектора. В российской экономике все больше закономерно преобладают малые предприятия, причем 20% из них — компании промышленного и строительного профиля, которые могут оказывать существенное влияние на окружающую среду. По авторитетным оценкам, не менее 250 тыс. компаний нуждаются в регулярном проведении экологического аудита производственных процессов и выпускаемой продукции.

Развитие широкого сотрудничества в области развития цивилизованного и экологически приемлемого предпринимательства предполагает следующие актуальные направления деятельности:

- конструктивное изучение положительного опыта зарубежных компаний, западного и международного законодательства в данной сфере;

- подготовку и профессиональную переподготовку кадров экологически ориентированных предпринимателей в ВУЗах и средних специальных учебных заведениях;

-обеспечение государственного участия в формировании специалистов по созданию систем управления экологической деятельностью компаний;

-широкое проведение регулярного экологического аудита на предприятиях различных масштабов и форм собственности.

Для учета количественных, качественных и иных характеристик природных ресурсов, а также объема, характера и режима их использования необходимо постоянно совершенствовать государственные кадастры природных ресурсов. Оценка рационального природопользования и природоохранной деятельности, принятие управленческих решений основываются на качественном статистическом и бухгалтерском учете.

В мировой практике кадастр природных ресурсов — систематизированный свод сведений количественных, качественных и территориально-адресных показателей о естественно-физических, экологических, хозяйственных, экономических характеристиках и правовом статусе природных ресурсов. Кроме того, кадастр отражает динамику и характер изменений состояния ресурсов под воздействием природных и антропогенных факторов, дает достаточно четко аргументированные рекомендации по рационализации использования ресурсов и необходимым мерам их охраны.

Сведения, составляющие кадастры, могут собираться, храниться и использоваться в текстовом, графическом и электронном виде. В структуре современных государственных кадастров природных ресурсов предусмотрены:

климатический, земельный, водный, лесной кадастры, кадастр животного, растительного мира, торфяного фонда, кадастр производственных и бытовых отходов.

Развитие рыночных отношений значительно расширяет сферу использования кадастровой информации, предъявляет к ней повышенные требования. Так, исходя из установленной в кадастрах ценности, могут определяться стоимость и покупная цена объектов кадастров, налоговые платежи и льготы по таким платежам, а также размер ущерба, убытков или вреда, которые причинены нарушением правил пользования этими объектами и требований их охраны.

Балансовый учет в сфере природопользования ведется в целях выявления и определения масштабов и качественных характеристик природных ресурсов, предназначенных для хозяйственного использования. Учет природных ресурсов, по различным причинам выпадающих из хозяйственного оборота, является забалансовым. В практике балансового учета составляются балансы недр, включая балансы полезных ископаемых, а также водохозяйственные балансы.

УДК 519.713: 631.411.6

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ TECHNOGENIC OBJECTS COMPLEX ANALYSIS AND ECOLOGICAL ASSESSMENT

**Дарья Игоревна Емельянова
Darya I. Emelianova**

*Харьковский политехнический институт, Украина, Харьков
Kharkov Polytechnic Institute, Ukraine, Kharkov
(e-mail: sone4ko-2008@yandex.ru)*

Аннотация: В работе предложен комплексный подход к оценке состояния природно-техногенных объектов на основе MIPS-анализа и риск-оценки с целью повышения качества принятия решения по снижению степени опасности для компонентов окружающей природной среды. Представлены результаты практической реализации разработанного методического обеспечения экологической оценки для технологии повторного использования очищенной воды при утилизации шламов.

Abstract: The new approach of natural-anthropogenic objects state-assessment based on MIPS-analysis and risk-estimation for decision-making enhancement decision-making security level upgrade of environment components is offered in this work. The paper presents the results of theoretical analysis of environmental assessment of studies treated water reuse technology for sludge recycling.

Ключевые слова: риск - анализ, комплексная оценка качества, MIPS - анализ, экологическая безопасность, утилизация шламов.

Keywords: risk - analysis, quality complex estimation, MIPS - analysis, ecological safety, sludge recycling.

Актуальным в пределах решения задач экологической безопасности и вопросов обеспечения высокого качества объектов окружающей природной среды (ОПС) является определение методики комплексной оценки экологичности природно-техногенных объектов.

Цель работы направлена на определение теоретических основ комплексной оценки экологичности природно-техногенных объектов (ПТО) на основе аналитической системы исследования «состояние₁-процесс-состояние₂», формирование методического обеспечения определения качества природных объектов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие теоретико-практические вопросы:

1) сформировать систему показателей комплексной оценки экологичности ПТО на основе анализа «состояние₁-процесс-состояние₂» с применением элементов MIPS-анализа и теории риск-оценки;

2) разработать алгоритмическое обеспечение реализации комплексной экологической оценки для объекта «техногенная система – ОПС».

Методика исследования и анализ результатов. Комплексность методики оценки экологичности, основанной на принципах гармонизации устойчивого развития эколого-экономической системы, заключается в возможности установления внешних и внутренних факторов деструктивных процессов, приводящих к уменьшению уровня опасности и снижения негативного техногенного воздействия на объекты ОПС.

Количественная характеристика комплексной оценки позволяет определить уровень экологичности ПТО на основе показателей MIPS-анализа. Полученные результаты подтверждаются последующей суммарной риск-оценкой, детальным анализом негативных факторов и процессов, происходящих в системе и ее взаимодействии с ОПС [1].

Методом обобщающей оценки качества исследуемых систем ПТО является MIPS-анализ, который представляет собой инструмент оценки экологической эффективности [2]. Специфика метода позволяет выявить точки опасных экологических воздействий, которые являются основой определения негативных факторов. При расчетах принимаются во внимание все материальные потоки с целью комплексного учета проблемные механизмы дестабилизации природного и техногенного характера.

Экологические риски ориентированы на оценку результативного состояния систем ОПС с определением степени дестабилизации состояний по уровню несоответствия нормативным показателям (предельно-допустимым концентрациям (ПДК)). Использование методики риск-анализа, основанной на учете показателей опасности источников воздействия, деструктивных явлений и процессов, проявления экологического ущерба позволяет комплексно решить задачу идентификации рисков в системе «состояние₁-процесс-состояние₂» и определения мер их регулирования.

Методика комплексной оценки безопасности ПТО апробирована на примере определения экологической целесообразности работы производства по утилизации шламов на основе повторного использования фильтрата (очищенной воды) в технологическом процессе. Расчеты проведены по данным экологического мониторинга «переработка шламов - состояние ОПС» согласно алгоритму оценки уровня экологичности исследованной системы «извлечение шламов – обработка шламов - влияние на ОПС» (рис. 1).

Представленная методика является альтернативой определения безопасности

производственного процесса на основе процедуры экологической оценки проекта и экологической экспертизы. Последовательность системного анализа (рис. 1) позволяет выявить факторы экологической дестабилизации и условия безопасной работы потенциального источника нагрузки.

Изъятие шламов рассматривается как положительный экологический фактор, который в дальнейшем сравнивается с негативным воздействием производственного процесса их обработки на ОПС по показателям MIPS-чисел и риск-анализа.



Рис. 1. Алгоритм комплексной оценки экологичности природно-техногенных объектов
 MI_i – материальная интенсивность i -го вещества (const), C_i – концентрация i -го вещества в j -й системе в количестве x_j , S_j – количество готовой продукции

Результаты оценки соответствия технологии извлечения шламов требованиям безопасности ОПС были получены на основе MIPS- анализа состояния шламов, шламовых вод, применяемых реагентов C_i . При этом использовалась следующая входная информация: исследуемый образец – 32 г, полученный раствор – 200 мл, NaOH – 2,5 мл; флокулянт – 3 мл; Na_2SO_4 – 1мл (x_j) и 90% – выход готовой продукции – очищенной воды для разбавления шламов для флокуляции (S_j) (табл. 1, табл. 2).

Негативный фактор по результатам исследования системы рассматривается как конечное влияние на ОПС процесса обработки шламов и оценивается по величине риска, полученного при сравнении измеряемых показателей с ПДК. Нормативная мера ПДК допускает ограниченное колебание в дестабилизации системы, то есть речь идет о приемлемой «цене» нагрузки на природную среду (табл. 3).

Таблица 1. MIPS-оценка экологичности извлеченных шламов

№	Составляющие шлама	MI-числа [3]	C_i	$MI_{общ}$	$MIPS_1$
1	Al ₂ O ₃	3,43	17	58,31	10,37
2	SiO ₂	1,4	40	56	9,96
3	Fe ₂ O ₃	6,7	3,6	24,12	4,29
4	CaO	5,6	0,7	3,92	0,7
5	MgO	1,6	1,2	1,92	0,34
6	Na ₂ O	2,3	0,41	0,943	0,17
7	K ₂ O	5,69	0,6	3,414	0,6
8	TiO ₂	40,7	0,84	34,188	6,08
Суммарное MIPS₁-число*					4,06

* $MIPS_1 > 1$ – при условии извлечения из ОПС определяется как положительный фактор

Таблица 2. Оценка экологичности процессов переработки шламов*

№	Вещество	MI- числа	C_i	$MI_{общ}$	$MIPS_2$
Шламовый раствор					
1	Хлориды	1,84	30	55,2	0,28
2	Сульфаты	2,1	40	84	0,42
3	Фенолы	18,7	0,005	0,0935	0,00047
4	Марганец	40,2	0,1	4,02	0,02
5	Алюминий	7,43	0,35	2,6005	0,013
6	Медь	85,5	0,01	0,855	0,004
7	Свинец	15,6	0,004	0,0624	0,0003
Реагенты					
8	NaOH+флокулянт+ Na ₂ SO ₄	23,78	6,5	55,2	0,119
Суммарное MIPS₂-число*					0,85

* Процессы флокуляции шламовых остатков представлены по определенной технологии ООО «Научно-технический центр «ЭКОМАШ»; $MIPS_1 > MIPS_2$, следовательно, установлен низкий риск-фактор производства – ситуация экологической безопасности [3].

Таблица 3. Оценка воздействия на объекты ОПС (уплотненный остаток, осадок)

№	Вещество сгущенного остатка (10% от начального объема)	MI-числа	C_i	$MIPS_3$	ПДК	I_i	Risk
Шламовый раствор							
1	Хлориды	1,84	3	0,028	300	0,01	0,046
2	Сульфаты	2,1	4	0,042	500	0,008	0,039
3	Фенолы	18,7	0,0005	0,000047	0,01	0,05	0,15
4	Марганец	40,2	0,01	0,002	0,2	0,05	0,15
5	Алюминий	7,43	0,035	0,0013	0,5	0,07	0,19
6	Медь	85,5	0,001	0,00043	0,02	0,05	0,15
7	Свинец	15,6	0,0004	0,00003	0,06	0,007	0,033
Реагенты							
8	NaOH+флокулянт+ Na ₂ SO ₄	23,78	0,6	0,01	7,5	0,08	0,2
Суммарное MIPS₃-число*				0,074	<<1		0,29

* Обобщенное влияние на объекты ОПС по составу осадка от флокуляции [3].

По полученным расчетам определяется оценка экологической целесообразности данного вида деятельности на основе сопоставлении данных состояния объекта до и после внедрения метода оборотного использования воды в технологии:

- $MIPS_{\text{шламов}} < MIPS_{\text{производства}}$ – высокая по значению риск-оценка – ситуация опасности при функционировании производства;
- $MIPS_{\text{шламов}} > MIPS_{\text{производства}}$ – низкий риск-фактор составляющих производства – ситуация экологической безопасности.

Таким образом, производство по утилизации шламов, предусматривающее повторное использование фильтрата (очищенной воды) в технологическом процессе является экологически целесообразным и безопасным, характеризуется низким уровнем риска по нормативным требованиям и высоким $MIPS$ -показателем, что является положительной характеристикой экологической эффективности производства.

Основные результаты. В работе обоснованы теоретико-методические основы комплексного анализа состояния ПТО на основе системы оценки экологического соответствия с помощью $MIPS$ - и риск-анализа для идентификации негативных нарушений в системе «техногенный объект – ОПС» и получено следующее:

- 1) экологичность ПТО обусловлена высоким уровнем экологической эффективности технологических процессов производства и снижением техногенной нагрузки (выбросов, сбросов, образования отходов) на ОПС, поддержкой на оптимальном естественном уровне биологической продуктивности экосистем;
- 2) работоспособность и действенность предложенной методики обеспечена предложенным алгоритмом комплексной оценки экологичности ПТО;
- 3) реализуемость на практике данной методики представлена на примере оценки экологического качества технологии повторного использования очищенной воды при утилизации шламов, возможностью определения механизмов повышения ее безопасности с целью принятия регулирующего воздействия (таблицы 2, 3).

Список литературы

1. Згуровский М. З., Гвишиани А. Д. Глобальное моделирование процессов устойчивого развития в контексте качества и безопасности жизни людей. К.: Політехніка. 2008. 331 с.
2. Козуля Т. В., Шаронова Н. В., Емельянова Д. И., Козуля М.М. Теоретико-практические основы методологии комплексной оценки экологичности территориальных и объектовых систем // Проблеми інформаційних технологій. 2012. № 01 (011). С. 37.
3. Ritthoff M., Rohn H., Liedtke C. Calculating MIPS – Resource Productivity of Products and Services // Wuppertal. 2003. <http://www.mips.online.info>.

УДК 66.061

**ОЧИСТКА КИСЛЫХ РУДНИЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
CLEANING OF ACID MINE WATERS USING ULTRASOUND EXPOSURE**

**Марат Салаватович Муллакаев, Георгий Борисович Векслер
Marat S. Mullakaev, George B. Wexler**

*Московский государственный машиностроительный университет, Россия, Москва
Moscow State Engineering University, Russia, Moscow
(e-mail: mullakaev@mail.ru)*

Аннотация: В работе изложены результаты экспериментов по очистке кислых рудничных вод (КРВ) с целью разработки комплексной технологии на основе гальванокоагуляционного метода. Предложена аппаратно-технологическая схема комплексной переработки КРВ, с использованием ультразвуковой активации магнетита. Разработанные основы комплексной технологии могут стать основой принципиально нового подхода при решении широкого спектра проблем в процессах водоочистки КРВ.

Abstract: The results presented here are made in the laboratory and pilot-scale experiments on the purification of acid mine water (AMW) for the purpose of developing a comprehensive technology-based galvanocoagulation method. A hardware-technological scheme of complex processing AMW, using ultrasonic activation of magnetite. Develop a framework of complex technology may become the basis of a new approach in dealing with a wide range of problems in the processes of water treatment AMW.

Ключевые слова: Кислые рудничные воды, гальванокоагуляционный метод, магнетит, ультразвук, ультразвуковая активация, комплексная технология, мобильный комплекс.

Keywords: Acid mine waters, galvanocoagulation method, magnetite, ultrasound, ultrasound activation, complex technology, mobile complex.

Особую роль в загрязнении водных систем играют старопромышленные районы добычи и переработки ископаемых. Так при нейтрализации шахтных вод медных рудников г. Карабаша в Челябинской области (Урал) гашеной известью образовалась шламовая долина, содержащая не менее 0,5 млн. тонн шламов и представляющая реальную экологическую угрозу. Максимальная минерализация КРВ при минимальном значении водородного показателя, зарегистрирована в районе источника подотвальных вод трёх хвостохранилищ, известного под названием «Рыжий ручей» на участке его впадения в р. Сак-Элга [1]. Процесс образования КРВ типичен для этих месторождений, состав сформированных техногенных вод достаточно близок, что даёт возможность разработки унифицированной технологии очистки КРВ [2].

В последние годы для интенсификации процессов очистки и обеззараживания загрязнённых вод используются физические методы, в частности ультразвуковое (УЗ) воздействие, эффективность которого для очистки загрязнённых вод с использованием флотационного метода показана в работах [3 - 7], гальванокоагуляционного - [8-12], причём эти технологии запатентованы и прошли опытно-промышленные испытания [13-17].

Аппаратура и методы анализа

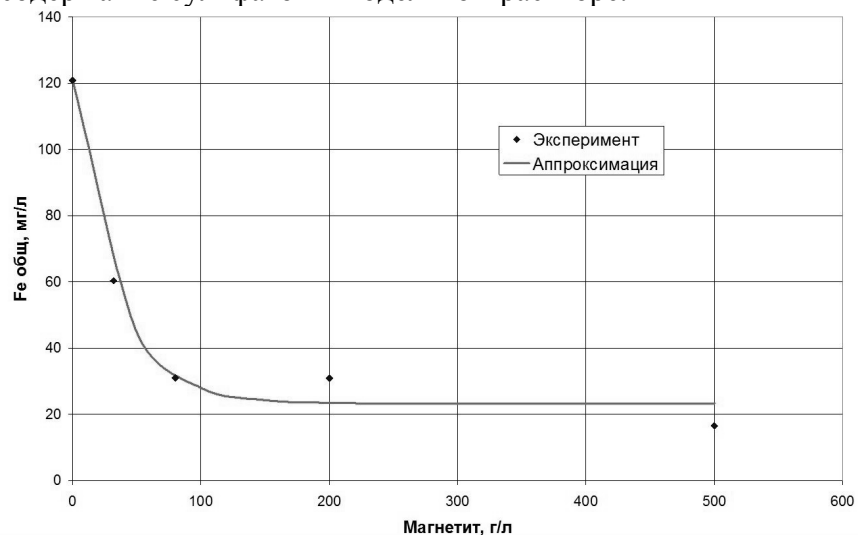
Средне-сезонный состав техногенных КРВ "Рыжего ручья" (г. Карабаш, Челябинская обл.), мг/л: Mg^{2+} – 415,8; Fe^{2+} – 398; Zn^{2+} – 53,0; Mn^{2+} – 35; Al^{2+} – 24,9; Cu^{2+} – 17,3; Ca^{2+} – 360,3; SO_4^{2-} – 3760; Na^+ – 233; Cl^- – 214,4; K^+ – 14,9. Модельные растворы были подготовлены с использованием дистиллированной воды и химических реагентов, г/л: кальция хлорид ($CaCl_2$) – 1; магния сульфат ($MgSO_4$) – 4,2; алюмокалиевые квасцы ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) – 0,4; натрия сульфат (Na_2SO_4) – 0,7; железо (II) сернокислое ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) – 1,2; марганец(II)

сернокислый ($\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) – 0,17; цинк (II) сернокислый ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) – 0,23; медь(II) сернокислая ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) – 0,07. Для подкисления раствора до $\text{pH} = 3$ использовалась разбавленная 10 %-ная кислота H_2SO_4 .

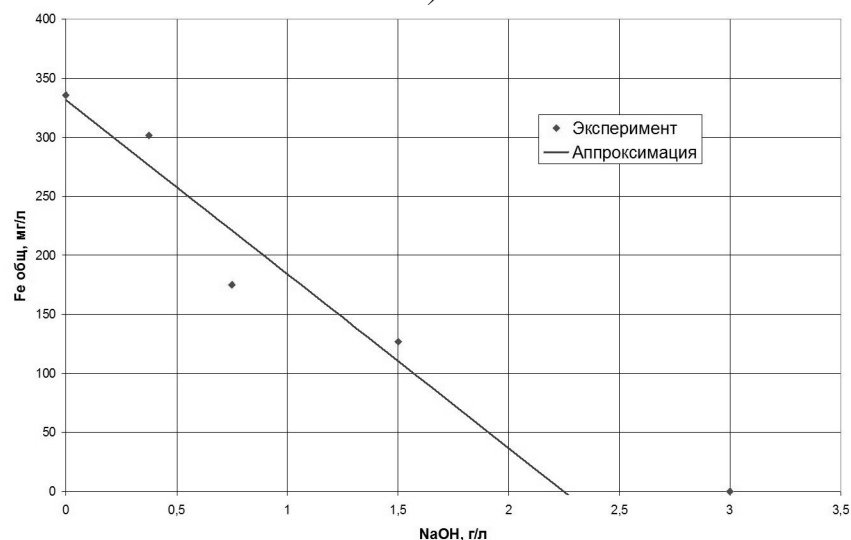
В экспериментах использовали порции магнетита, наработанные в гальванокоагуляторе с гальванопарами Fe-C, Fe-Cu (из расчёта 100 мл на 40 г) при перемешивании в течение 10 мин. УЗ обработка водных суспензий магнетита в стальном реакторе периодического действия с использованием преобразователя МСП 2/24, соединённого с УЗ генератором МУГ 4/18-27 мощностью 4 кВт. Упругие колебания вводились в жидкую дисперсную среду с помощью стержневого волновода с диаметром рабочего торца 20 мм, амплитуда колебаний которого составляла 5-10 мкм при резонансной частоте 24,3 кГц, время обработки 2 - 5 мин. Остаточные концентрации загрязнений измерялись вольтамперометрическим анализатором «Экотест ВА».

Результаты экспериментов и их обсуждение

Очистка модельных растворов с помощью магнетита проводилась в диапазонах доз магнетита 0...500 г/л. Существенное снижение концентрации ионов железа в модельном растворе происходит при увеличении дозы магнетита до 100 г/л и более (рис. 1.). Магнетит также снижает содержание сульфатов в модельном растворе.



а)



б)

Рис.1. Очистка модельных растворов от $\text{Fe}_{\text{общ}}$ с помощью:
а) магнетита (0..500 мг/л); б) щелочи NaOH

Как видно на рис. 1б при добавлении щелочи к модельному раствору происходит осаждение ионов тяжёлых металлов в виде гидроксидов, щёлочь, взятая в избытке, осаждает ионы тяжёлых металлов, благодаря малому произведению растворимости их гидроксидов, практически до нуля. Отклонение от линейной зависимости остаточного содержания железа при постепенном добавлении щелочи связано с тем, что гидроксид железа не выпадает, пока не выпадут менее растворимые гидроксиды – алюминия, меди, цинка. Для данного модельного раствора достаточно 2,5..3,0 г/л NaOH, чтобы осадить все тяжёлые металлы

Результаты первого этапа экспериментов по гальванохимической очистке модельных растворов при последовательном одноступенчатом и двухступенчатом обезвреживании порциями магнетита, наработанными с гальванопарами Fe-C, Fe-Cu представлены в табл. 1.

На втором этапе с целью интенсификации гальванохимической очистки модельных растворов проведена серия экспериментов с использованием щелочи NaOH (примерно 1 г/л NaOH) и магнетита, предварительно активированного ультразвуком. При этом после подщелачивания использовалась уменьшенная до 20 г порция активированного реагента без изменения остальных параметров.

Таблица 1. Результаты гальванохимической очистки модельных растворов

Состав загрязнения	Исходная концентрация	Норма СанПиН 2.1.4-1074-01	Концентрация после одностадийной очистки, мг/л		Концентрация после двухстадийной очистки, мг/л	
			Гальванопара Fe-C	Гальванопара Fe-Cu	Гальванопара 1 стадия: Fe-Cu 2 стадия: Fe-C	Гальванопара 1 стадия: Fe-C 2 стадия: Fe-Cu
Mg ²⁺	415.8	40	64,2	98,1	14,3	32,8
Fe ²⁺	398	0,3	85,0	450	следы	123
Zn ²⁺	53	5,0	5,8	7,3	0,28	0,9
Mn ²⁺	35	0,1	6,0	4,2	0,6	0,07
Al ³⁺	24.9	0,5	1,8	2,4	н/о	н/о
Cu ²⁺	17.3	1,0	н/о	1,6	н/о	0,5
Ca ²⁺	360.3	-	170	143	-	-
SO ₄ ²⁻	3760	500	1320	-	462	516
Na ⁺	233	120	210	198	230	175
Cl [*]	214.4	350	-	-	-	-
K ^{+*}	14.9	180	-	-	-	-
pH	3,0	6-9	8,8	4,8	7,9	6,4

В связи с незначительной концентрацией Cl и K в модельном растворе их содержание в очищенной воде не определялось.

В результате подщелачивания до значения pH=10 удалось установить, что понижение концентрации Fe и Cu примерно на 98%, а Zn на 97%. Эксперименты по очистке модельных растворов до и после подщелачивания с использованием предварительной УЗ активации магнетита проводились только для доочистки от ионов Fe²⁺, Zn²⁺ и Cu²⁺ (табл. 2).

Таблица 2. Результаты очистки модельных растворов с УЗ активацией магнетита

Состав загрязнений	Концентрация, мг/л		
	исходная	после очистки магнетитом	после очистки магнетитом с УЗ активацией
Fe ²⁺	7,8	0,63	0,28
Zn ²⁺	1,6	0,20	0,15
Cu ²⁺	0,6	0,03	н/о

Аппаратурно–технологическая схема комплексной ультразвуковой очистки КРВ, разработанные с целью создания мобильного комплекса очистки и стерилизации подземных вод, представлена на рис. 2.

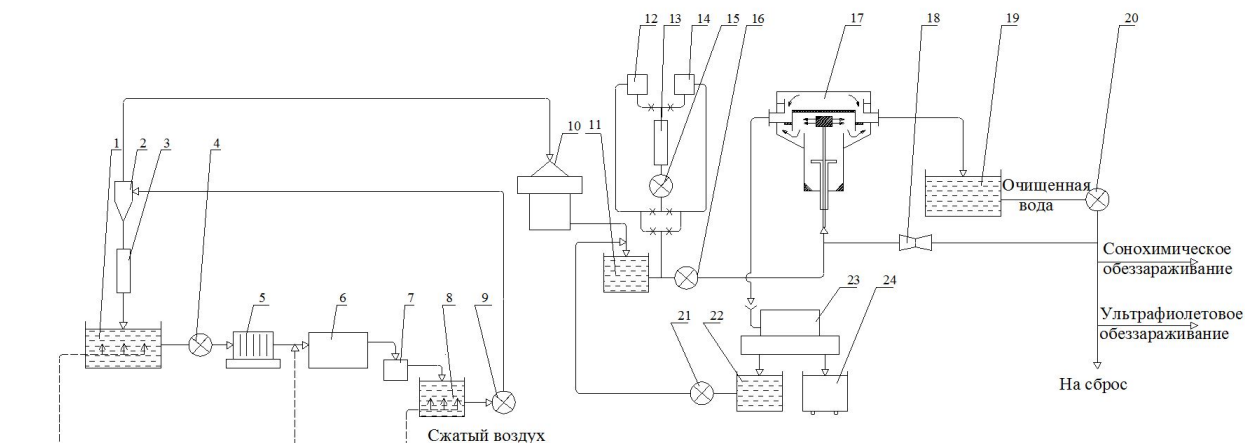


Рис. 2. Аппаратурно–технологическая схема комплексной очистки КРВ:

1 – усреднитель; 2 – гидроциклон; 3, 13 – УЗ реактор; 4, 9, 15, 16, 20, 21 – насосы;
5 – фильтр; 6 – гальванокоагулятор; 7 – скрапоулавитель; 8, 11, 19 – промежуточные ёмкости; 10 – сепаратор; 12, 14 – баки с реагентом; 17 – флотатор; 18 – кавитатор;
22 – ёмкость с фугатом; 23 – центрифуга; 24 – тележка с осадком

КРВ из усреднителя 1, подаются в гальванокоагулятор 6, после которого смесь очищенной воды, магнетита, скрапа проходит через скрапоулавитель 7 и попадает в накопительную ёмкость 8. Из накопительной ёмкости смесь очищенной воды и магнетита насосом 9 подаётся на разделение в гидроциклон 2, откуда сгущённый магнетит поступает сначала в УЗ реактор 3, а затем в усреднитель 1, где осуществляется предварительная очистка КРВ. Отделение магнетита от предварительно очищенных КРВ осуществляется на фильтре 5. Осветлённые воды после гидроциклона попадают в сепаратор 10, где происходит очистка воды от тонких частиц магнетита; после сепаратора очищенная вода накапливается в промежуточной ёмкости 11. Для дальнейшей очистки вода из промежуточной ёмкости 11 подаётся на флотатор 17, где осуществляется процессы реагентной коагуляции и флотации. Очищенная вода накапливается в ёмкости 19. Для реагентной флотации используются реагенты, предварительно обработанные УЗ в реакторе 13 в циклическом режиме, затем накапливаются в ёмкости 12. Пока происходит накопление, использование реагентов происходит из ёмкости 14. Шлам, образующийся при флотации, поступает на центрифугу 23, из которой образующийся при разделении фугат возвращается в промежуточную ёмкость 11, а осадок попадает в тележку 24. После флотации очищенная вода подаётся частично на сброс, частично на блок ультрафиолетового или соноплазменного обеззараживания.

Выводы

1. Эксперименты по реагентной очистке модельных растворов с использованием ультразвукового воздействия показали:

- для очистки КРВ от ионов тяжёлых металлов на первом этапе рекомендуется использовать щёлочь, т.к. гидроксиды большинства из них мало- или нерастворимы в воде. Концентрация щелочи NaOH 2,5..3,0 г/л достаточна для того, чтоб осадить тяжёлые металлы;
- существенное снижение концентрации ионов железа в модельном растворе происходит при увеличении дозы магнетита до 100 г/л и более;
- при очистке сточных вод медеплавильного комбината п. Карабаш рекомендуется использовать гальванокоагуляционный способ для снижения концентрации тяжёлых металлов до 20-30 мг/л, после чего проводить доочистку с помощью щелочи примерно 1 г/л NaOH.

2. На основе результатов экспериментальных работ предложены аппаратурно-технологические решения по комплексной переработке КРВ, направленные на создание универсального мобильного комплекса очистки КРВ в местах добычи полезных ископаемых.

Список литературы

1 Разработка ультразвукового оборудования и типовой комплексной технологии для глубокой очистки кислых рудничных вод в районах добычи и переработки полезных ископаемых (на примере Урала). Финальный отчёт по проекту МНТЦ -3923. - ФГУП РФЯЦ имени академика Е.И. Забабахина. Снежинск. - 2013. – 35 с.

2. Удачин В.Н., Аминов П.Г., Вильямсон Б.Д., Китагава Р., Лонщикова Г.Ф., Удачина Л.Г. Химический состав и механизмы формирования кислотных рудничных вод Южного Урала // Вода: химия и экология. 2011. № 10. С. 3 –8.

3. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов. Дис. докт. техн. наук. М.: Московский государственный университет инженерной экологии, 2011. 391 с.

4. Абрамов В.О., Булычев Н.А., Градов О.М., Кистерев Э.В., Муллакаев М.С. Исследование особенностей ультразвукового воздействия на гетерогенные системы жидкость – дисперсионные включения газовой, жидкой и твёрдой фазы // Сб. трудов II междунар. конф.: «Современные проблемы общей и неорганической химии». Москва. 2009. С. 479 - 490.

5. Abramov O.V., Abramov V.O., Veksler G.B., Kulov N.N., Zabolina E.V., Kashirskaya O.A., Shkolnikov A.V., Mullakaev M.S. Ultrasonic activation of reagent purification of surface wastewaters from oil products // Theoretical foundations of chemical engineering. 2009. Vol. 43. Issue 4. P. 568–574.

6. Абрамов В.О., Векслер Г.Б., Муллакаев М.С., Аитова. Ультразвуковая интенсификация процессов очистки поверхностных вод Студенец–Ваганьковского ручья на Краснопресненской набережной г. Москвы. // Экология и промышленность России. 2011. № 1. С. 10 - 12.

7. Аитова И.З., Векслер Г.Б., Гольберг Г.Ю., Муллакаев М.С. Интенсификация флотационной очистки нефтезагрязненных вод с предварительной ультразвуковой активацией реагента // Известия МГТУ (МАМИ). 2012. Т. 4. № 2. С. 129 - 135.

8. Абрамов О.В., Кошелева М.К., Кереметин П.П., Муллакаев М.С. Очистка сточных вод текстильных предприятий гальванохимическим методом с использованием ультразвукового поля // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2009. № 3. С. 107 -110.

9. Кошелева М.К., Булеков А.П., Кереметин П.П., Чабаева Ю.А., Муллакаев М.С., Векслер Г.Б. Оценка эффективности ультразвуковой обработки реагента при очистке сточных вод от органических загрязнений // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2011. № 5. С. 125 - 129.

10. Keremetin P.P., Parilov P.S., Mullakaev M.S., Vexler G.B., Kruchinina N.E., Abramov V.O. Definition of regime and technological parameters of sonochemistry clearing of the petropolluted waters // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2011. Vol. 45, Issue 4, P. 931 – 937.

11. Abramov V. O., Abramova A.V., Keremetin P.P., Mullakaev M.S, Vexler G.B., Mason T.J. Ultrasonically improved galvanochemical technology for the remediation of industrial wastewater // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21, Issue 2, P. 812- 818.

12. Абрамов В.О., Векслер Г.Б., Муллакаев М.С., Баязитов В.М, Кручинина Н.Е., Кереметин П.П., Париков П.С. Ультразвуковой гальванокоагуляционный комплекс очистки загрязненных вод // Экология и промышленность России. 2009. № 10. С. 46 - 49.

13. Кошелева М.К., Кереметин П.П., Булеков А.П., Муллакаев М.С., Солдатова Н.А. Устройство для гальванокоагуляционной очистки сточных вод. Патент на полезную модель 94967. Кл. МПК7: C02F1/463. 10.03.2010.

14. Абрамов В.О., Баязитов В.М., Золеззи Г.А.А., Векслер Г.Б., Муллакаев М.С.

Комплекс сорбционной очистки загрязнённых вод. Патент на изобретение № 2422383 - Кл. МПК: C02F9/08; C02F1/28; C02F1/36; C02F1/463. 15.05.2009.

15. Абрамов О.В., Абрамов В.О., Андрианов Ю.В., Градов О.М., Муллакаев М.С., Булычев Н.А. Соноплазменный разряд в жидкой фазе // Материаловедение. 2009. № 2. С. 57 - 63.

16. Абрамов О.В., Абрамов В.О., Андрианов Ю.В., Кистерев Э.В., Градов О.М., Шехтман А.В., Классен Н.В., Муллакаев М.С., Булычев Н.А. Плазменный разряд в кавитирующей жидкости // Инженерная физика. 2009. № 8. С.34 - 38.

17. Муллакаев М.С, Абрамов В.О., Векслер Г.Б., Муллакаев Р.М. Ультразвук в процессах очистки кислых рудничных вод // Экология и промышленность России. 2015. № 12. С. 4–10.

УДК 621.928.37

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД IMPROVING THE EFFICIENCY OF WASTEWATER TREATMENT

**Максим Игоревич Филимонов, Андрей Евгеньевич Новиков,
Мария Игоревна Ламскова
Maksim I. Filimonov, Andrei E. Novikov, Mariya I. Lamskova**

*Волгоградский государственный технический университет, Россия, Волгоград
Volgograd State Technical University, Russia, Volgograd
(e-mail: maks.filimonov.1986@mail.ru, novikov-ae@mail.ru, lamskov@yandex.ru)*

Аннотация: Предложен аппарат для очистки сточных вод промышленных предприятий от механических примесей под действием центробежной силы. Вращательное движение корпуса обеспечивается давлением струй жидкости, подаваемых в аппарат. Для отделения примесей размером менее 50 мкм предусмотрено наличие фильтровального материала, обеспечивающего удаление частиц мелких фракций.

Abstract: The proposed device for wastewater treatment of industrial enterprises from mechanical impurities under the action of centrifugal force. The rotational motion of the housing is ensured by the pressure of the jets of liquid supplied to the apparatus. For separation of impurities of less than 50 microns provides for a filter material using for the removal of particulate small fractions.

Ключевые слова: сточные воды, суспензия, механические примеси, фильтрование.
Keywords: waste water, slurry, mechanical impurities, filtering.

Увеличение темпов роста химической, нефтяной, металлургической промышленности неизбежно приводит к повышению количества отходов, сбрасываемых в окружающую среду. Для защиты природы и человека от негативного воздействия этих отходов необходимо наличие очистных сооружений, отвечающих требованиям современных производств.

При проектировании очистных сооружений необходимо стремиться к:

- повышению эффективности процесса улавливания отходов;
- увеличению надёжности, как отдельных аппаратов, так и целиком всей стадии;
- минимизации производственных площадей, необходимых для очистных сооружений;
- сокращение затрат энергии на проведение процесса очистки.

Учитывая эти требования, нами предложена конструкция аппарата, предназначенного для очистки сточных вод промышленных предприятий.

Конструкция аппарата представлена на рисунке 1.

Предлагаемое устройство состоит из цилиндрикоконического корпуса 1, установленного на опорах-подшипниках 2, что даёт возможность корпусу свободно вращаться, причём коническая часть корпуса имеет равномерную перфорацию. К корпусу жестко крепятся лопатки 4, которые могут быть выполнены в виде крыльчатки с лопастями, турбинки либо импеллера. Цилиндрикоконический корпус 1 с закрепленными лопатками 4 устанавливается в герметичный кожух 3, который снабжен тремя тангенциально расположенными входными штуцерами 5 и одним сливным патрубком 7 для отведения очищенной жидкости.

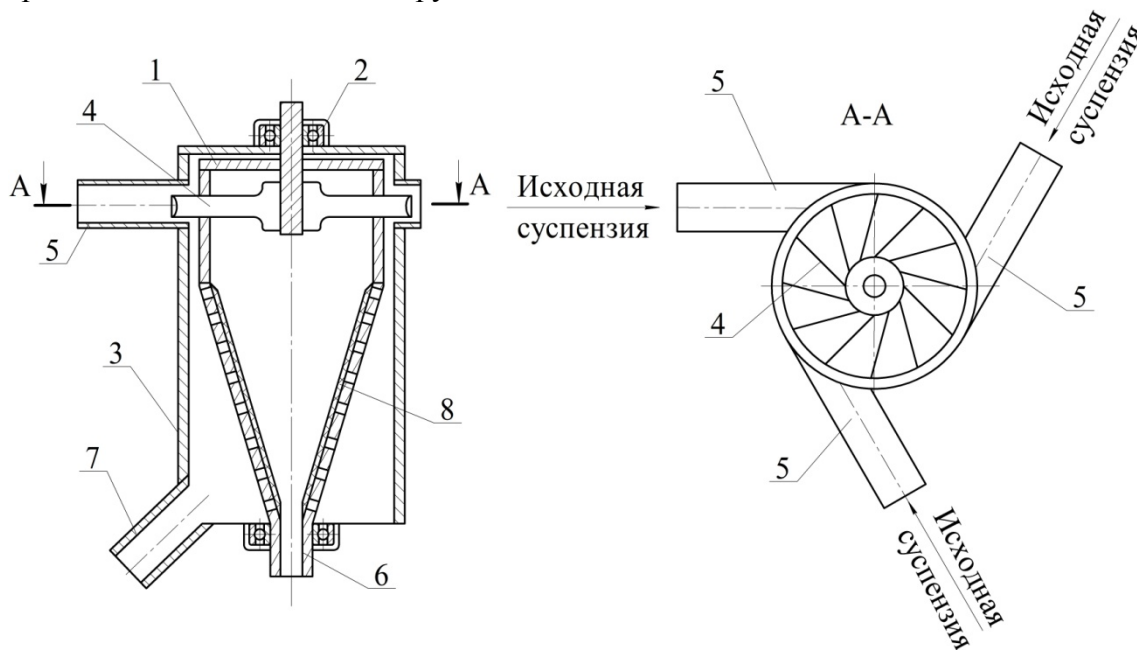


Рисунок 1 – Центриклон для очистки сточных вод

К перфорированной конической части цилиндрикоконического корпуса крепится фильтровальный материал.

Аппарат работает следующим образом.

Сточные воды, загрязненные механическими примесями, подаются в корпус аппарата 1 через три тангенциально расположенных входных патрубка 5. Давление струй жидкости, попадая в корпус аппарата, передают момент импульса лопаткам 4 и приводят их во вращение, а заодно и цилиндрикоконический корпус. Одним из основных условий обеспечения надёжной работы аппарата является постоянное давление на входе в диапазоне от 0,5 до 1,0 МПа.

Вращательное движение корпуса индуцирует в нём центробежную силу, которая действует на механические примеси суспензии. Под действием этой силы твёрдые частицы отбрасываются к стенкам корпуса и опускаются по конической части к шламовому штуцеру. Такая траектория движения возможна только для частиц размером более 50 мкм. Для отделения примесей размером менее 50 мкм предусмотрено наличие фильтровального материала, на котором будут задерживаться частицы мелких фракций.

По ходу проведения процесса очистки будет происходить забивание пор фильтровальной перегородки, что в итоге приведёт к снижению производительности и необходимой степени очистки фильтруемой суспензии. С целью предотвращения этого явления конструкцией аппарата предусмотрена возможность промывки фильтровального материала обратным током очищенной жидкости. Необходимость проведения промывки определяется по перепаду давления на входе и выходе из аппарата.

Выбор фильтровального материала зависит от характеристики суспензии, в частности, от концентрации дисперсной составляющей, размеров частиц и сжимаемостью осадка.

В качестве фильтровального материала допустимо применение как широко распространённых в нефтехимической промышленности тканей (бельтинг, лавсан, капрон и др.), так и мембран, которые дают возможность проводить ультра- и наночистку.

Таким образом, предлагаемое устройство позволяет:

- достичь высокой степени очистки с помощью подбора фильтровального материала;
- оптимизировать производственные площади за счёт совмещения в одном аппарате грубой и тонкой очистки;
- снизить энергетические затраты на очистку сточных вод, так как процесс осуществляется только за счёт импульса струи жидкости.

Список литературы

1. М.И. Филимонов, А.Б. Голованчиков, А.Е. Новиков, М.И. Ламскова Гидроциклон. Патент на полезную модель № 160196 Кл. МПК - В04С9/00.10.03.2016.

УДК 641.51.06:628.517

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПИТАНИЯ TRANSFORMATION OF VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS OF EQUIPMENT OF FOOD COMPANIES

Игорь Николаевич Заплетников, Ирина Сергеевна Севаторова
Igor N. Zapletnikov, Irina S. Sevatorova

*Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского, Украина, Донецк
Donetsk National University of Economics and trade Called Mikhail Tugan-Baranovsky,
Ukraine, Donetsk
(e-mail: sevatorovairina@rambler.ru)*

Аннотация: В статье выявлены статистические зависимости шумовых характеристик очистительного и измельчительного технологического оборудования от основных параметров оборудования: производительности, массы и установленной мощности электродвигателя. Эти характеристики использовались в виде относительных величин для низких, средних и высоких октавных частот, а также для характеристики А.

Abstract: The article reveals the statistical noise characteristics depending on the cleaning and grinding process equipment on the basic parameters of equipment: performance, weight and the installed capacity of the electric motor. These characteristics are used in the form of relative values for low, medium and high frequency octave, and to characterize A.

Ключевые слова: шумовая характеристика, технологическое оборудование, ресторанное хозяйство, параметры оборудования.

Keywords: noise characteristic, technological equipment, restaurant management, parameters of equipment.

Оборудование ресторанного хозяйства создает в производственных помещениях уровень шума, который регламентируется отечественными стандартами и санитарными нормами. Исследованиями кафедры оборудования пищевых производств ДонНУЭТ установлено, что наибольший уровень шума создает очистительное и измельчительное оборудование (машины очистки картофеля, свеклы, лука, овощерезательные и протирачные машины различной модификации и фирм-производителей) [1]. С механической точки зрения весь ряд оборудования объединяет одинаковая кинематическая схема, включающая двигатель, клиноременную передачу и подшипниковый вал с рабочим органом. Превышение

допустимых норм по шуму возникает как по уровню звука, так и по уровню звукового давления в отдельных октавных полосах частот.

Наиболее существенное влияние на виброакустические характеристики (ВАХ) в машинах очистки корнеклубнеплодов оказывает рабочий процесс. В этом оборудовании наиболее высокий уровень шума наблюдается на низких частотах 63-250 Гц в пределах 10-25 дБ. Источником повышенного шума в оборудовании является столкновение корнеклубнеплодов со стенками рабочей камеры машины. Для улучшения ВАХ машин очистки корнеклубнеплодов необходимо предусматривать конструктивные элементы, демпфирующие колебания от ударов продукта о стенки рабочих камер машин. Несущие конструкции стенок рабочих камер должны иметь достаточную жесткость [2].

На формирование ВАХ овощерезательного оборудования типа МРО существенное влияние также оказывает процесс взаимодействия рабочего органа с продуктом. В овощерезательной машине типа МРО этот процесс наиболее значимый на высоких частотах. Высокочастотные колебания возникают в результате ударов продукта и толкателя о стенки загрузочного приспособления при подаче продукта к вращающимся ножам [3]. Демпфирование этих колебаний возможно при армировании отверстий под толкатели пластмассовыми втулками, материал которых разрешен к контакту с пищевыми продуктами, например из фторопласта 4. К снижению энергии ударов продукта о стенки загрузочного приспособления приведет и своевременная заточка ножей рабочего органа.

В протирочной машине типа МП влияние процесса протирания на ВАХ оборудования на низких и средних частотах не отмечено и только на высоких частотах это влияние проявилось в машине МП-1000. Источником высоких частот является загрузочное устройство, выполненное в форме полусферы, о поверхности которого ударяются при загрузке куски продукта, вращающиеся лопастным ротором. Подобная форма загрузочного приспособления является звуковым излучателем. С целью улучшения ВАХ этого оборудования необходимо изменить форму загрузочного приспособления, например на коническую, и на лопастной ротор установить ножи предварительного измельчения загружаемого продукта.

При проектировании нового оборудования или совершенствовании существующего возникает задача - спрогнозировать шумовые характеристики (ШХ) оборудования, исходя из основных параметров машины: производительности, массы и установленной мощности электродвигателя [4]. Аналитических зависимостей этой связи установить невозможно, поэтому решить ее целесообразно статистическими методами, используя не абсолютные значения ШХ, а относительные к производительности $P - Q_P$, массе $M - Q_M$ и мощности электродвигателя $N - Q_N$.

Целью работы является определение относительных ШХ в октавных полосах частот и установление статистических закономерностей их связи с основными параметрами оборудования: производительностью, массой, установленной мощностью электродвигателя для очистительного и измельчительного оборудования.

ШХ оборудования отличаются при работе их на холостом ходу и с продуктом. Поэтому относительные шумовые характеристики (ОШХ) тоже отличаются между собой и их исследования проводились отдельно [5].

Были определены значения ОШХ в октавных полосах частот 63-8000 Гц и скорректированному по А уровню звуковой мощности.

На основании базы данных ОШХ получены статистические зависимости от основных параметров оборудования. Наибольшую тесноту связи имеют регрессионные уравнения, в которых коэффициент множественной корреляции R^2 не менее 0,9. Эти уравнения для различных параметров отличаются и имеют следующий вид (1-3):

$$Q_P = e_P - p \ln P \quad (1)$$

$$Q_M = e_M - m_1 M + m_2 M^2 - m_3 M^3 + m_4 M^4 - m_5 M^5 \quad (2)$$

$$Q_N = e_N - n_1 N - n_2 N^2 - n_3 N^3 + n_4 N^4 - n_5 N^5 \quad (3)$$

С помощью этих уравнений и полученных коэффициентов регрессии рассчитываются ШХ оборудования на основании основных параметров П, М, N на стадии разработки технического задания при проектировании аналогичных машин. Регрессионные коэффициенты уравнений приведены в таблицах 1-2:

Таблица 1 – Коэффициенты регрессии уравнений (1-3) для работы машин без продукта

Октавные полосы частот, Гц, А	Q _П			Q _М							Q _Н			
	в _П	Р	R ²	в _М	m	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	R ²	в _Н	n	n ₂	R ²
63	0,69	0,27	0,96	5,66	2,56	0,62	0,08	0,003	-	0,96	147,6	1,71	0,67	0,95
125	0,8	0,31	0,99	8,38	5,8	2,15	0,38	0,032	0,001	0,99	193,8	5,28	0,38	0,96
250	0,8	0,31	0,97	4,81	0,75	0,036	-	-	-	0,96	220,3	12,11	0,05	0,98
500	0,8	0,3	0,96	4,51	0,61	0,025	-	-	-	0,94	226,2	10,42	0,2	0,98
1000	0,77	0,3	0,98	4,3	0,61	0,026	-	-	-	0,98	202,0	7,25	0,26	0,94
2000	0,68	0,26	0,98	3,83	0,5	0,02	-	-	-	0,96	194,8	7,92	0,24	0,98
4000	0,59	0,22	0,98	3,36	0,44	0,018	-	-	-	0,97	176,7	9,26	0,04	0,98
8000	0,59	0,23	0,94	3,51	0,37	0,009	-	-	-	0,93	150,2	5,63	0,23	0,99
А	1,26	0,52	0,96	4,64	0,64	0,027	0,94	-	-	0,94	224,8	8,91	0,29	0,97

Таблица 2 – Коэффициенты регрессии уравнений (1-3) для работы машин с продуктом

Октав- ные полосы частот, Гц, А	Q _П			Q _М							Q _Н						
	в _П	Р	R ²	в _М	m	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	R ²	в _Н	n	n ₂	n ₃	n ₄	n ₅	R ²
63	0,78	0,3	0,91	4,52	1,32	0,26	0,025	0,001	-	0,91	201,9	660,6	401,5	113,8	16,3	1,41	0,94
125	0,86	0,33	0,94	8,34	6,59	2,8	0,55	0,048	0,002	0,93	92,66	127,1	47,49	7,86	0,63	0,019	0,9
250	0,91	0,35	0,97	4,63	0,68	0,03	-	-	-	0,92	219,48	1,26	1,23	-	-	-	0,92
500	0,87	0,33	0,95	4,61	0,57	0,02	-	-	-	0,94	240,1	6,9	0,61	-	-	-	0,93
1000	0,84	0,32	0,97	4,52	0,57	0,02	-	-	-	0,9	278,3	120,7	60,8	12,64	1,11	0,035	0,91
2000	0,74	0,28	0,98	3,98	0,46	0,015	-	-	-	0,9	202,3	2,31	0,81	-	-	-	0,92
4000	0,65	0,24	0,97	3,51	0,37	0,01	-	-	-	0,93	199,5	7,16	0,41	-	-	-	0,95
8000	0,65	0,24	0,95	7,27	6,45	2,97	0,61	0,06	0,002	0,96	254,1	247,7	177,2	52,83	7,59	0,53	0,81
А	1,38	0,58	0,95	4,77	0,59	0,021	-	-	-	0,92	243,3	4,75	0,81	-	-	-	0,92

Исходя из этих данных, нами были получены графические зависимости ОШХ от типа оборудования для работы на холостом ходу и с продуктом. В качестве примера приведена графическая интерпретация полученных зависимостей на примере отдельных профилограмм для средних частот (рис. 1).

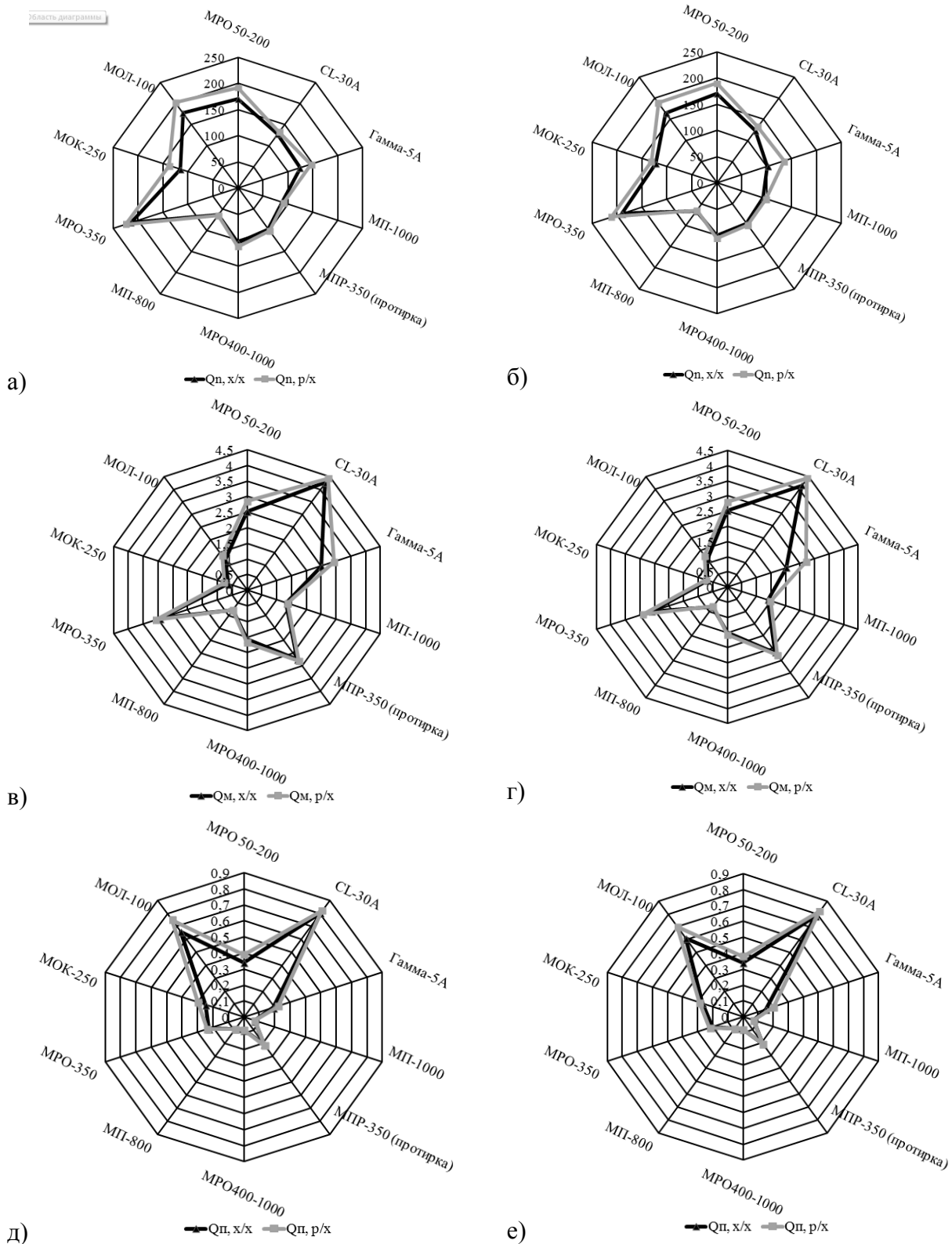


Рис. 1. Зависимости ОШХ по:

*а), б) установленной мощности электродвигателя при 500 и 1000Гц;
в), г) массе оборудования при 500 и 1000 Гц; д), е) производительности при 500 и 1000 Гц*

Данные профилограммы позволяют оценить качество оборудования в зависимости от его основных параметров: установленной мощности электродвигателя, массы, производительности.

Среди исследуемого оборудования худшие ОШХ в зависимости от установленной мощности электродвигателя соответствуют овощерезательным машинам МРО-350, МРО50-

200, Гамма-5А и машине для очистки лука МОЛ-100, в зависимости от массы оборудования - овощерезательным машинам СL-30А, МРО-350 и протирочной машине МПР-350, в зависимости от производительности - овощерезательной машине СL-30А и машине для очистки лука МОЛ-100. При конструировании или модернизации подобного оборудования следует обратить внимание на необходимость улучшения прежде всего их ШХ.

Выводы:

1. ОШХ очистительного и измельчительного оборудования ресторанного хозяйства характеризуют статистическую взаимосвязь ШХ оборудования с его основными параметрами - производительностью, массой, установленной мощностью двигателя.

2. Полученные регрессионные зависимости позволяют рассчитать ШХ оборудования на стадии его проектирования.

3. Расчет и анализ ОШХ позволяет выявить технологическое оборудование, которое нуждается в улучшении.

Список литературы

1. *Заплетников И.Н.* Виброакустические характеристики оборудования предприятий питания и методы их улучшения; Моногр. – Донецк, ДонГУЭТ, Украина, 2005. 265с.

2. *Заплетников И.Н.* Снижение шума торгово-технологического оборудования. – К.: Выща школа, 1990. 150 с.

3. *Заплетников І.М., Кіріченко В.О., Севаторова І.С.* Визначення порівняльних шумових характеристик овочерізок. Наукові праці ОНАХТ. Вип. 37. Одеса, 2010. С.303-307.

4. *Заплетников И.Н., Севаторова И.С., Иванов Н.И., Дроздова Л.Ф., Жидков Ю.В.* Об использовании относительных шумовых характеристик в акустическом проектировании машин. Міжнар. наук.-техн. конф. ДонНУЕТ Проблеми харчових технологій і харчування. Сучасні виклики і перспективи розвитку. Донецьк, 2011. С. 145-149

5. *Заплетников І.М., Севаторова І.С., Жидков Ю.В.* Залежності шумових характеристик обладнання ресторанного господарства від його основних параметрів. Наукові праці ОНАХТ. Вип. 39. Одеса, 2011. С. 121- 125

УДК 677.027.162

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ СУШКИ ЛЕГКИХ ХЛОПЧАТОБУМАЖНЫХ ТКАНЕЙ IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF CONTACT DRYING OF LIGHT COTTON FABRICS

Людмила Владимировна Гурьева*, Татьяна Александровна Новикова,
Марина Сергеевна Апалькова****

Ludmila V. Guryeva*, Tatyana A. Novikova, Marina S. Apalkova****

**Московский государственный университет технологий и управления
имени К.Г. Разумовского, Россия, Москва*

**Moscow State University of Technologies and Management
named after K.G. Razumovskiy, Russia, Moscow
(e-mail: vburovtsov@mail.ru)*

***Московский государственный университет дизайна и технологии, Россия, Москва*

***Moscow State University of design and technology, Russia, Moscow
(e-mail: Halihalo@yandex.ru)*

Аннотация: показано, что при контактной сушке хлопчатобумажной легкой ткани до кондиционной конечной влажности возможно сокращение времени сушки, снижение расхода теплоты, расхода греющего пара, экономия электроэнергии, повышение производственной и экологической безопасности.

Abstract: it was shown that during contact drying of light cotton fabrics to conditioned final humidity it may be reduced of the drying time, consumption of heating steam, energy saving, increase of industrial and environmental safety.

Ключевые слова: контактная сушка, легкая хлопчатобумажная ткань, эффективность

Keywords: contact drying, light cotton fabrics, efficiency.

Известно, что эффективный технологический процесс должен быть интенсивным, обладать экологической и производственной безопасностью, экономичностью, обеспечивать высокое качество готового продукта.

Анализ технологического режима процесса сушки в условиях хлопчатобумажных фабрик на контактных барабанах показывает, что легкие хлопчатобумажные ткани, как правило, в производственных условиях высушиваются до остаточной влажности $U_k = 2\%$. Из литературных источников [1, 2] известно, что на выходе из сушильной машины волокнистый материал должен иметь влагосодержание равное или близкое к кондиционному U_k ($\varphi = 65\%$, $t = 20-21^\circ\text{C}$). Для хлопчатобумажных тканей и пряжи $U_k = 0,05-0,07$ кг/кг, для мерсеризованных хлопчатобумажных тканей и пряжи $U_k = 0,09$ кг/кг [1, 2]. Следовательно, высушиваясь до остаточной влажности $U_k = 2\%$, ткани существенно пересушиваются.

Изучение технологических процессов отделочного производства текстильных предприятий позволило установить, что в ходе отделки одна и та же ткань может неоднократно подвергаться высушиванию. В результате химических и тепловых обработок при отделке ткани наблюдаются изменения их механических и физико-химических свойств, в том числе и пористой структуры, которая, как известно, оказывает существенное влияние на величину диффузионного сопротивления переносу влаги в процессах сушки [1, 3, 4].

Пересушивание тканей недопустимо как с точки зрения расхода электрической и тепловой энергии, так и по соображениям производственной и экологической безопасности. Ниже приводятся результаты расчета процесса сушки типовой легкой хлопчатобумажной ткани с поверхностной плотностью $M = 99$ г/м² по технологическому режиму хлопчатобумажных фабрик до $U_k = 2\%$ и до кондиционной влажности $U_k = 9\%$ для определения возможного сокращения времени сушки, сокращения затрат тепловой энергии и электроэнергии.

Расчеты проводились при следующих параметрах работы контактной барабанной сушилки: производительность по ткани, $G_{\text{тк}} = 170$ кг/ч; поверхностная плотность абсолютно сухой ткани, $M = 99$ г/м²; ширина полотна ткани, $b = 0,8$ м; начальная влажность ткани, $U_n = 0,86$ кг/кг; конечная влажность ткани, $U_k = 0,02$ кг/кг и $U_k = 0,09$ кг/кг; средняя температура ткани на цилиндре, $t_{\text{тк}} = 93^\circ\text{C}$; коэффициент теплоотдачи от стенки цилиндра к ткани, $\alpha_2 = 275$ Вт/(м²·К); давление греющего пара в цилиндрах $P_{\text{ц}} = 0,3$ МПа; температура воздуха, выходящего из сушилки, $t_{\text{в}} = 60^\circ\text{C}$; относительная влажность воздуха, выходящего из сушилки, $\varphi_k = 0,54$.

Полученные результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 Основные результаты расчета процесса контактной сушки легкой хлопчатобумажной ткани.

Конечная влажность, U_k , кг/кг	Производительность по абсолютно сухой ткани, $G_{\text{тк}}$, кг/ч	Количество удаляемой влаги, ΔW , кг/ч	Необходимый расход воздуха, L , кг/ч	Общий расход теплоты с учетом потерь в окружающую среду, Q , кДж/ч	Расход греющего пара, $D_{\text{п}}$, кг/ч	Требуемое число цилиндров, $n_{\text{ц}}$, шт.	Продолжительность сушки, τ , с
0,02	166,7	140	$2,84 \cdot 10^3$	$5,81 \cdot 10^5$	267,6	12	51
0,09	156,0	128,4	$2,64 \cdot 10^3$	$5,44 \cdot 10^5$	254,1	10	35,5

При расчете процесса сушки до кондиционной влажности ($U_k = 9\%$) установлено, что продолжительность сушки сокращается на 30%, при этом несколько снижается расход теплоты и греющего пара, может быть уменьшено количество сушильных барабанов.

На рис. 1 приведена кривая кинетики сушки легкой хлопчатобумажной ткани до кондиционной влажности.

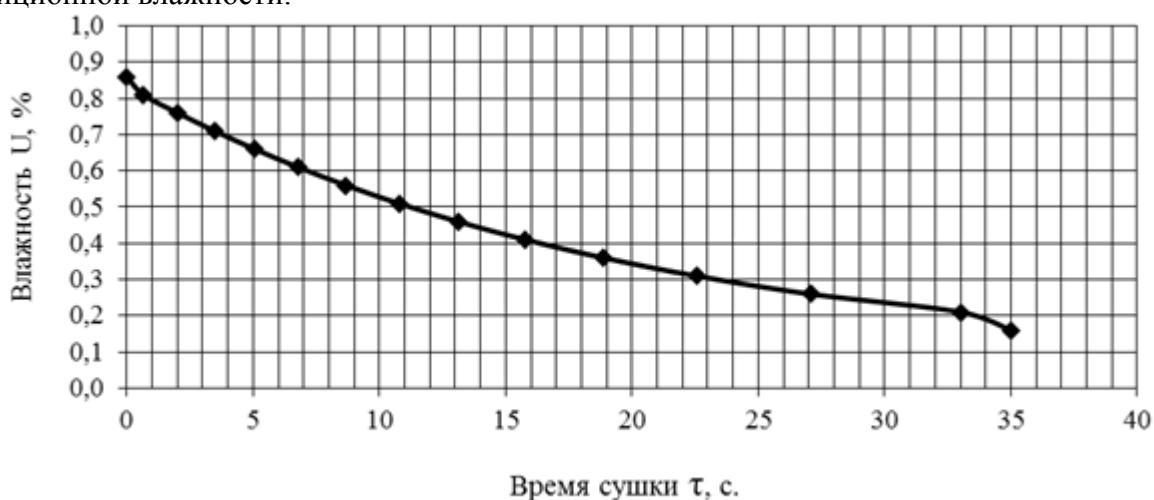


Рис. 1 Кривая кинетики сушки легкой хлопчатобумажной ткани.

Анализ экологической и производственной безопасности в цехах мокрой и сухой отделки текстильных фабрик показывает, что процесс сушки является не только одним из самых энергоемких, но и наиболее травмоопасным процессом [1, 5].

При работе на сушильных машинах нередки случаи механических травм, ожогов о раскаленную поверхность. Машины скапливают статическое электричество, а при случайном обрыве проводов или замыканиях могут быть источником электротравм. В сушильном цехе имеют место не нормативные температура и влажность. Сушильные барабанные машины являются источником шума и вибрации. Пар, поступающий в сушильные барабанные машины через трубопроводы от парового котла, находится под давлением. С течением времени паропроводы и котел изнашиваются, при этом возникает определенная вероятность аварийных ситуаций [5-7].

При сокращении продолжительности процесса сушки работник, находящийся непосредственно рядом с сушильной барабанной машиной, меньшее время будет подвергаться воздействию негативных факторов производственной среды [6]. Несмотря на все разнообразие и эффективность средств индивидуальной и коллективной защиты от механических, термических, электрических, шумовых, вибрационных воздействий на организм человека, не перестает быть актуальной и защита временем. Чем меньше работник находится в зоне вредного воздействия, тем он менее подвержен воздействию данных факторов. Интенсификация сушки способствует улучшению состояния здоровья работников, т.к. они меньше времени находятся в рабочей зоне. При совершенствовании процесса сушки сокращается расход теплоты и водяного пара, снижается количество необходимых сушильных барабанов.

Таким образом, показано, что при контактной сушке хлопчатобумажной легкой ткани до кондиционной конечной влажности возможно сокращение времени сушки примерно на 30%, снижение расхода теплоты, расхода греющего пара, экономия электроэнергии.

Список литературы:

1. Сажин Б.С., Кошелева М.К., Сажина М.Б. Процессы сушки и промывки текстильных материалов. М.: ФГБОУ ВПО МГУДТ, 2013.
2. Кричевский Г.Е. Химическая технология текстильных материалов: Учеб. для вузов в 3-х т., Т. 1. Теоретические основы. Волокна. Загрязнения. М.: РосЗИТЛП, 2000. 436 с.

3. Богачева Т.И. Анализ текстильных материалов как объекта сушки и разработка методов расчета кондуктивной сушки тканей: Дисс... канд.техн. наук. М.: МТИ, 1981. 200 с.

4. Кошелева М.К., Дорняк О.Р., Апалькова М.С. Выбор параметров процесса сушки капиллярно-пористого материала // Промышленная теплотехника. 2015. Т. 37. № 7. С. 166-167.

5. Садова С.Ф., Кривцова Г.Е., Коновалова М.В. Экологические проблемы отделочного производства. Учеб. Для вузов / Под ред С.Ф. Садовой/. М.: РИО МГТУ, 2002. 284 с.

6. Кошелева М.К., Щеголев А.А., Листова М.И. Совершенствование экологической и производственной безопасности отделочного производства хлопчатобумажных фабрик // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2006. № 1. С. 120-123.

7. Кошелева М. К. Повышение производственной и экологической безопасности отделочного производства тонкосуконных фабрик за счёт совершенствования технологии // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2005. № 2. С. 100-105.

УДК 664.03-752

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВУКА ПРИ РЕЗАНИИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ EXPERIMENTAL STUDIES OF EMISSION SOUND CUTTING FOOD PRODUCTS

Антон Константинович Пильненко, Игорь Николаевич Заплетников
Anton K. Pilnenko, Igor N. Zapletnikov

*Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила
Туган-Барановского, Украина, Донецк*
*Donetsk national university of economics and trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky,
Ukraine, Donetsk*
(e-mail: pilnenko_a@mail.ru, oblagn@kaf.donnuet.dn.ua)

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования излучения звука при резании наиболее распространенных овощей в октавных полосах частот и по уровню звука. Установлено влияние толщины режущего ножа и модуля упругости продукта на акустические параметры процесса, а также получена его многофакторная модель.

Abstract: Presents experimental results research of sound emission at cutting the most common vegetables in octave frequency bands and in the level sound. The influence of the thickness of the cutting blade and product of the elastic modulus in the acoustic parameters of the process.

Ключевые слова: уровень звукового давления, резание, овощи.

Keywords: sound pressure level, cutting vegetables.

На современном этапе развития техники выделяют следующие основные способы резания: механические, гидравлические, электрофизические [1]. В работах по резанию пищевых продуктов рассматриваются вопросы кинематики и динамики взаимодействия рабочих органов разнообразной конструкции с продуктом, влияния свойств продуктов, трения и износа рабочих органов, энергетические вопросы и др.

Изучение процесса резания пищевых материалов, необходимо решать как задачу со сложной структурой, в которых большое количество различных явлений влияет на конечный результат не посредством простого их сложения, но как комплекс сравнимых по величине, одновременно действующих факторов, находящихся в сложном взаимодействии между собой [1, 2].

Однако вопросы излучения акустической энергии в виде звуковых волн остаются без внимания. В процессе резания пищевых продуктов, даже в бытовых условиях, наблюдается характерный шум, связанный с этим излучением. Что касается режущего оборудования пищевых производств, то величина акустического излучения окажется более значительной. С точки зрения снижения уровня шума, излучаемого режущим оборудованием в производственных цехах пищевых производств, общественного питания это явление заслуживает основательного исследования как с технической, так и с экологической стороны.

Как показали наши исследования шумовых характеристик ряда режущего оборудования пищевых производств – овощерезок, протирочных машин, мясорубок, картофелечисток и др. [3-5] уровни излучаемого ими звука составляют от 70 до 89 дБА при работе с продуктом и на 10-12 дБА меньше при работе без продукта. Превышение санитарных норм по шуму достигается при работе машин с продуктом.

Целью данной работы является количественная оценка влияния технологических факторов на излучение звука при резании пищевых продуктов. За критерий количественной оценки принимается уровни звукового давления, возникающие при резании пищевых продуктов.

Предварительные исследования показали, что уровни звукового давления в этих исследованиях меняются в пределах 30-40 дБА. Для получения корректных результатов необходимо соблюдать соответствующие акустические условия измерения [6].

Измерения проводились в реверберационной камере объемом 71 м^3 в соответствии со стандартом ИСО 3743-1-94; 3743-2-94. Расхождение между внешним шумом и источником звука составило более 10 дБ (дБА) как в октавных полосах частот, так и по скорректированному по А уровню звука. Измерения уровней звукового давления (УЗД) проводилось аттестованным шумомером «Ассистент» (Россия) в октавных полосах частот и уровню звука. Анализатор шума и вибрации «Ассистент» удовлетворяет требованиям ГОСТ 17187-81 «Шумомеры». Шумомер «Ассистент» имеет первый класс точности по ГОСТ Р 53188.1-2008 (МЭК 61672). Для регистрации параметров на персональном компьютере использовалось программное обеспечение Assistant Tools. Измерения проводились в соответствии со стандартом ИСО «Акустика» 3743-1-94; 3743-2-94. Микрофон устанавливался на технологическом столе, измерительное расстояние 1 м. Продукт закреплялся на штативе. Резание продукта осуществлялось вручную лезвиями различной толщины: $0,1 \times 10^{-3} \text{ м}$; $0,2 \times 10^{-3} \text{ м}$; $0,4 \times 10^{-3} \text{ м}$; $1,6 \times 10^{-3} \text{ м}$. Использовались сырые овощные продукты: капуста, картофель, свекла, лук и морковь, а также яблоко.

Результаты экспериментальных исследований изменения уровней звукового давления при резании пищевых продуктов в октавных полосах частот и по уровню звука представлены в таблице 1. Графическая интерпретация результатов проведенных экспериментов представлена на рисунках 1-3.

Исходя из полученных результатов можно сделать следующие заключения:

1. При резании пищевых продуктов происходит излучение звука с изменением звукового давления в диапазоне от 15 до 45 дБ в октавных полосах частот и от 23 до 37 дБА по уровню звука.

2. Наибольшая величина УЗД приходится на низкие частоты 63 и 125 Гц. На средних частотах 500 и 1000 Гц наблюдается снижение УЗД, а затем снова увеличение на высоких частотах не зависимо от вида продукта и толщины лезвия.

3. При резании продуктов с более низким модулем упругости (капуста, лук, яблоко) излучается меньше УЗД для ножей меньшей толщины на средних частотах. На излучение звука при резании продуктов с большим модулем упругости (свекла, морковь, картофель) влияние тонких лезвий сказывается в меньшей степени.

4. Наиболее существенное снижение УЗД наблюдается при резании наиболее тонким ножом $0,1 \times 10^{-3} \text{ м}$ продуктов с меньшим модулем упругости (лук, капуста) (Рис. 1) и картофель на высоких частотах (Рис.2).

5. На высоких частотах 2000-8000 Гц УЗД для продуктов с высоким модулем упругости (свекла, морковь, картофель) графики ШХ носят идентичный характер в пределах точности измерений. Они имеют линейную зависимость от частоты. Можно полагать, что излучение звука от взаимодействия ножа с этими продуктами на высоких частотах стабильно.

6. Несколько отдельно следует остановиться на излучении звука при резании продуктов с низким модулем упругости. Характер ШХ напоминает ШХ при резании продуктов со средним модулем упругости (капуста, лук), но влияние наибольшей толщины лезвия $1,6 \times 10^{-3}$ м имеет место быть при резании тонкими лезвиями $0,1-0,4 \times 10^{-3}$ м, ШХ практически совпадают, но при резании толстым лезвием $1,6 \times 10^{-3}$ м происходит возрастание УЗД на 5-17 дБ в диапазоне 1000-4000 Гц.

7. При измерениях по уровню звука (Рис. 3) наблюдается возрастание УЗД при резании моркови, лука и яблока с увеличением толщины ножа на 2-7 дБА, для капусты – УЗД не изменяется, а для свеклы и картофеля даже снижается на 3 дБА. Можно предположить, что измерения по уровню звука дают неоднозначный результат. Данные следует перепроверить.

8.

Таблица 1. Уровень звуковой давления при резании пищевого продукта, дБА

Продукт	Толщина ножа $0,1 \cdot 10^{-3}$ м	Толщина ножа $0,2 \cdot 10^{-3}$ м	Толщина ножа $0,4 \cdot 10^{-3}$ м	Толщина ножа $1,6 \cdot 10^{-3}$ м
Внешний шум	11,9			
Лук	24,15	33,65	30,15	33,65
Яблоко	29	29,9	32,5	36,4
Картофель	27,3	28,15	34,47	30,2
Капуста	31,6	33,38	37,35	37,27
Свекла	29,25	30,14	28,4	26,23
Морковь	32,2	31,5	32,7	33,83

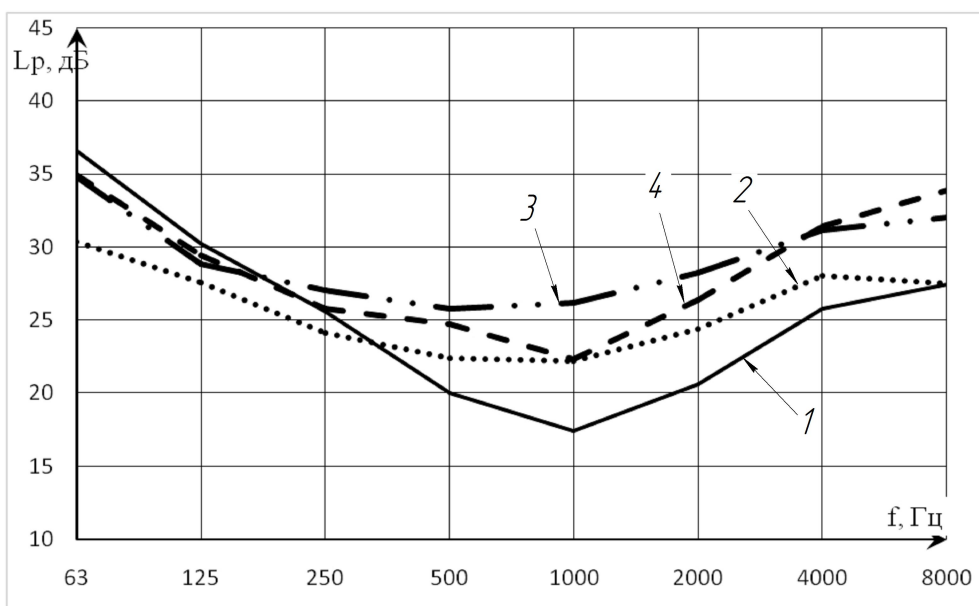


Рис. 1. Уровень звукового давления при резании пищевого продукта – капусты, лезвием толщиной t , мм: 1 – $t=0,1$ мм; 2 – $t=0,2$ мм; 3 – $t=0,4$ мм; 4 – $t=1,6$ мм

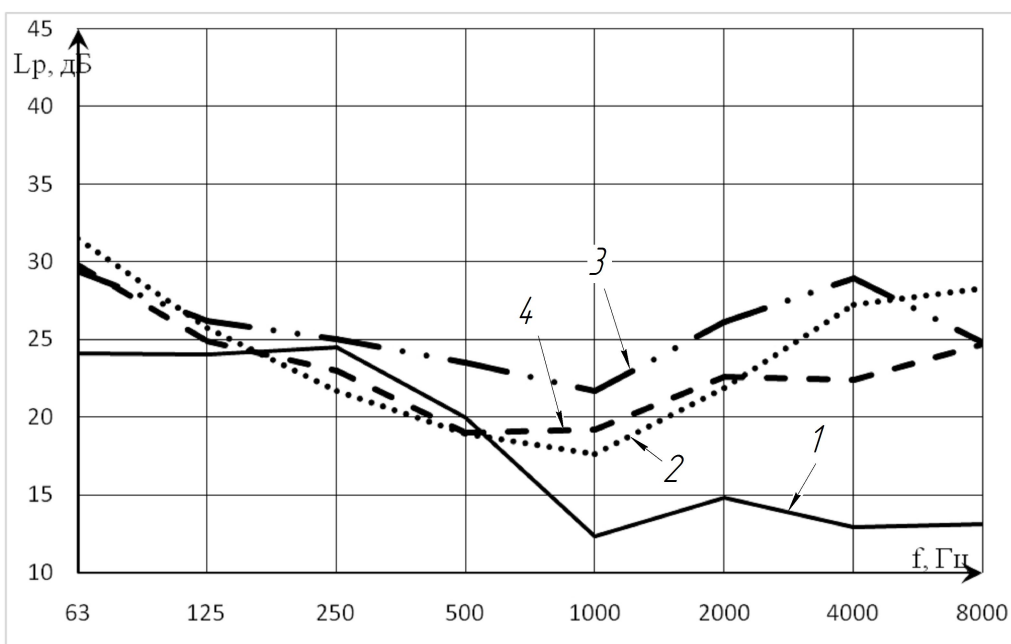


Рис. 2. Уровень звукового давления при резании пищевого продукта – картофеля, лезвием толщиной $t, \text{мм}$: 1 – $t=0,1 \text{мм}$; 2 – $t=0,2 \text{мм}$; 3 – $t=0,4 \text{мм}$; 4 – $t=1,6 \text{мм}$

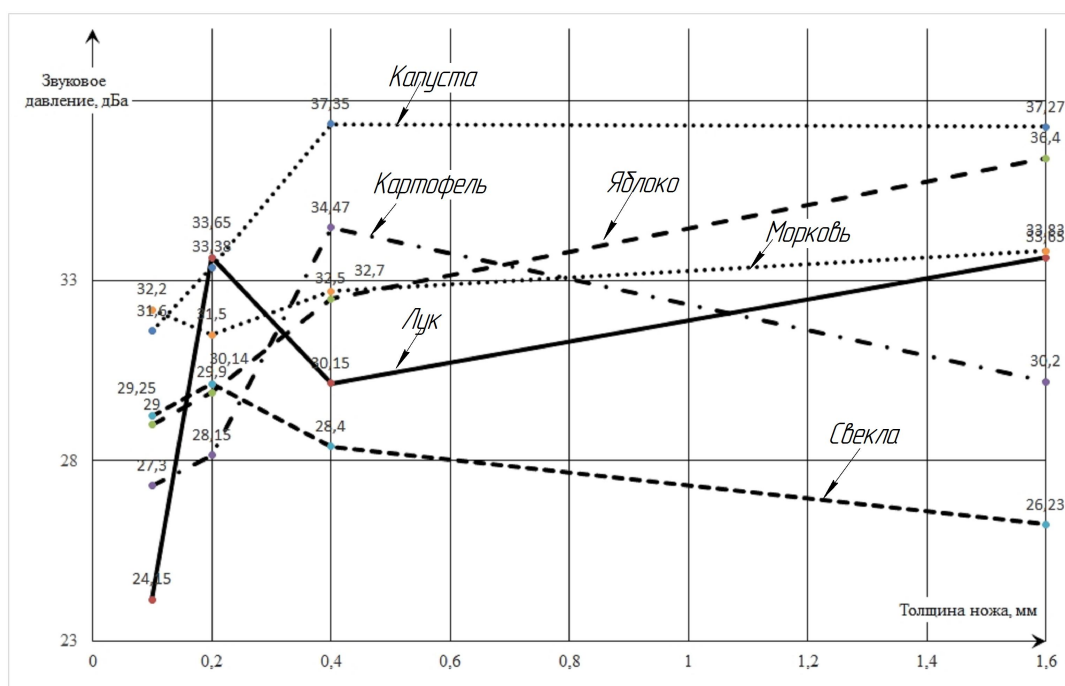


Рис. 3. Изменение уровня звука при резании пищевых продуктов ножами различной толщины

С целью получения количественной информации о влиянии переменных факторов толщины ножа (x_1) и модуля упругости продукта (x_2) на излучение звука использован метод Бокса-Уилсона [8]. В качестве целевой функции y применен уровень звука, излучаемый при резании продукта с наибольшим модулем упругости – моркови. Матрица планирования 2^2 . Толщина режущего инструмента $X_1=0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Модуль упругости продукта, $X_2=3,8 \text{ МПа}$ и $6,5 \text{ МПа}$.

После проверки коэффициентов регрессии и адекватности получена многофакторная модель уровня звука в кодированных значениях факторов:

$$y(x_1, x_2) = 32,24 + 1,986 \cdot x_1 + 0,96 \cdot x_2 - 1,26 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (1)$$

Для получения уравнения (1) в натуральных переменных использованы зависимости

$$x_1 = \frac{h - h_{осн}}{\Delta h} = \frac{h - 0,85}{0,75}; x_2 = \frac{E - E_{осн}}{\Delta E} = \frac{E - 5,15}{1,35}; \quad (2)$$

Уравнение в натуральных переменных имеет вид

$$y(h, E) = 20,88 + 9,1 \cdot h + 1,77 \cdot E - 1,24 \cdot h \cdot E, \text{ дБА} \quad (3)$$

В качестве примера, если подставить в полученное уравнение по верхнему (максимальному) уровню $h=1,6\text{мм}$; $E=6,5\text{МПа}$, тогда $y=33,93$ дБА, а если подставить в полученное уравнение по нижнему (минимальному) уровню $0,1\text{ мм}$; $E=3,8\text{ МПа}$, тогда $y=28,03$ дБ. График и уравнения регрессии для верхнего уровня приведены на рисунке 4.

$$y(x_1, x_2) = 32,24 + 1,986 \cdot x_1 + 0,96 \cdot x_2 - 1,26 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (4)$$

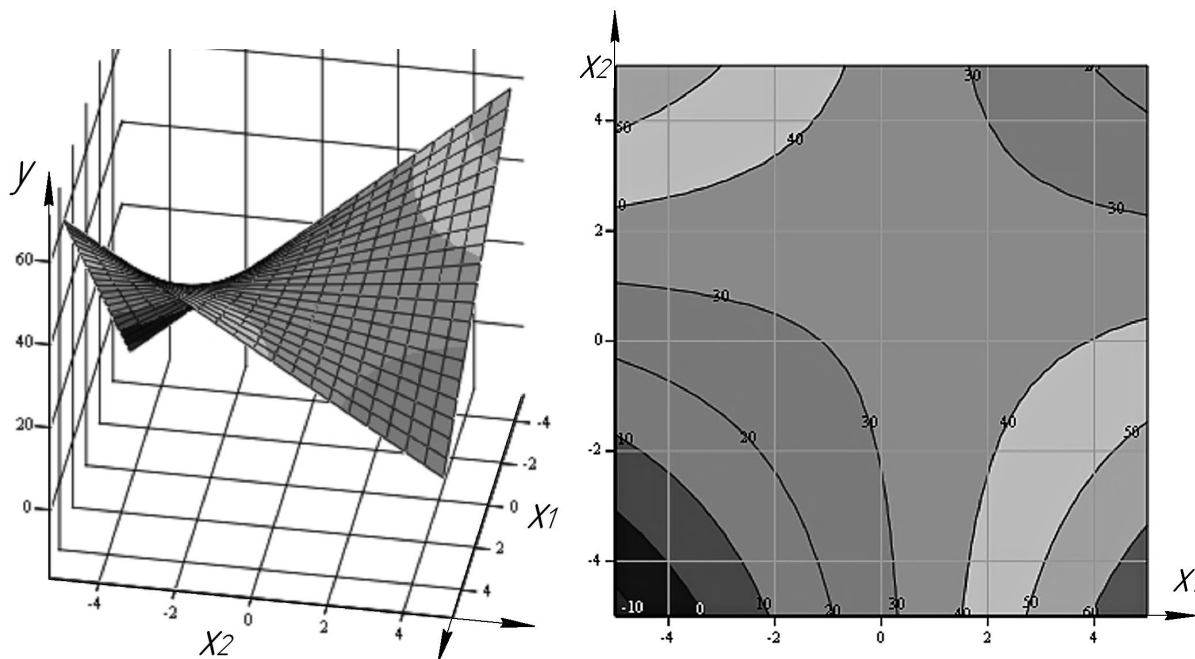


Рис.4. Графическая интерпретация уравнения (4)

Анализ многофакторной модели (1) и ее графической интерпретации показал, что при резании моркови на уровень звука наиболее существенное влияние оказывает толщина ножа и в меньшей степени модуль упругости, с возрастанием этих факторов уровень звука увеличивается в исследуемом диапазоне варьирования переменных факторов. Парное взаимодействие факторов x_1 и x_2 положительно сказывается на величину излучаемого звука. Вместе с тем, наблюдается и область минимальных значений уровня звука при резании данного продукта, если $x_1=1 \times 10^{-3}$ м и $x_2=1,7$ МПа.

При резании пищевых продуктов происходит излучение звука с изменением звукового давления в диапазоне от 15 до 45 дБ в октавных полосах частот и от 23 до 37 дБА по уровню звука. Наибольшие уровни звукового давления, создаваемого от взаимодействия режущего инструмента с пищевым продуктом, возникают на низких частотах, на средних частотах уровня снижаются, на высоких частотах могут возрастать для продуктов с низким модулем упругости или оставаться стабильными для продуктов с высокими модулями упругости. На параметры акустического процесса при резании пищевых продуктов влияет толщина лезвия и модуль упругости продукта. Получена математическая зависимость этого влияния для продукта с наибольшим модулем упругости (сырая морковь). Наиболее значимым фактором оказалась толщина лезвия. Установлена область переменных факторов с минимальным уровнем звукового давления.

Список литературы

1. *Резник Н.Е.* Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. М.: «Машиностроение», 1975. – 311 с.
2. *Даурский А.Н., Мачихин Ю.А.* Резание пищевых материалов. М.: Пищевая пром-сть, 1980. – 240 с.
3. *Zapletnikov I.N., Gordienko A.V., Kirichenko V.A., Pilnenko A.K.* Noise characteristics of universal kitchen vegetable cutter // The advanced science journal, USA, 2014, p. 19–22.
4. *Заплетников И.Н.* Виброакустика оборудования пищевых производств: монография / И.Н. Заплетников. – Харьков: Вид-во НТМТ, 2015, - 542 с.
5. *Заплетніков І.М., Кіріченко В.О., Севаторова І.С.* Визначення порівняльних шумових характеристик овочерізок / Заплетніков І.М., Кіріченко В.О., Севаторова І.С. // Наукові праці / Одеська нац. акад. харч. технол. – 2010. – Вип. 37. – С.303-307.
6. *Иванов Н.И.* Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник/ Н.И. Иванов. – 3-е изд. Переаб. – М.: Лотос, 2013. – 432 с.
7. *Степанова Е.Г., Причко В.А.* Реологические свойства яблок при различных способах их обработки/ Е.Г. Степанова. – Краснодар: Известия вузов. Пищевая технология, № 5-6, 1999г. – С. 72-73.
8. *Адлер Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений [Текст] : монография / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

Научное издание

Международная научно-техническая конференция,
посвящённая 105-летию со дня рождения
А. Н. Плановского
(МНТК ПЛАНОВСКИЙ - 2016)
**«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ В
ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»**
Сборник научных трудов
(Том 2)

8 - 9 сентября 2016 года

Технический редактор Бородина Е. С.
Компьютерная верстка и макет Бородина Е. С.

Материалы публикуются в авторской редакции.